



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการ
แบบจำลองการทำงานเซลล์สุริยะแบบคลื่นวิทยุใน 2 มิติ
(ระยะที่ 1)

โดย
บำรุง สมสวัสดิ์ และ คณะ

31 พฤษภาคม 2546

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการ
แบบจำลองการทำงานเซลล์สุริยะแบบคลับแซนวิชใน 2 มิติ
(ระยะที่ 1)

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. นายบำรุง สมสวัสดิ์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.ขอนแก่น
2. นายวิทยา อมรกิจบำรุง	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.ขอนแก่น
3. นายอนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.ขอนแก่น

ชุดโครงการ เซลล์แสงแดดไทย
สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

โครงการนี้เป็นการวิจัยในเชิงการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อสร้างคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่สามารถจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงแดดได้โดยสมบูรณ์ การจำลองแบบจะเริ่มต้นจาก กฎเกณฑ์พื้นฐานทางฟิสิกส์ทั้งหมด(เป็น first principle simulation) การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดำเนินการโดยใช้ภาษา FORTRAN 90 บนระบบปฏิบัติการ LINUX ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการแบบเปิด(Open Source Operating System) ชุดของคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น จะเป็นชุดโปรแกรมที่สามารถทำงานการจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงแดดใน 2 มิติได้ครบถ้วน ชุดโปรแกรมเหล่านี้ประกอบไปด้วย โปรแกรมการแบ่งกริด โปรแกรมการกำหนด doping profile ของเซลล์แสงแดด โปรแกรมการหาค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุที่ใช้ทำเซลล์ ตัวโปรแกรมการจำลองแบบ(simulation routine) และ โปรแกรม visualization เพื่อการแสดงผล นอกจากนี้ ยังได้มีการพัฒนาชุดโปรแกรมนี้ ให้สามารถทำการคำนวณแบบขนานบน cluster ที่พัฒนาขึ้นเอง(โดยการทำ technology transfer) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านความเร็วในการจำลองแบบด้วย

ในการดำเนินงานมีการเขียนโปรแกรมขึ้นทั้งสิ้น ประมาณ 50,000 บรรทัด ผลการดำเนินงานได้ผลสำเร็จประมาณ 80% เนื่องจากพบว่าผลการจำลองแบบที่ได้สามารถให้ภาพทางฟิสิกส์ของเซลล์แสงแดดได้ถูกต้อง(qualitatively correct) แต่ค่าในเชิงปริมาณของกระแสไฟฟ้า มี systematic error ที่ผิดความจริงอยู่ ด้วยอัตราส่วน 10^3 ทำให้เราต้องใช้เวลามากในการตรวจสอบ และทำให้โครงการนี้ไม่สามารถทำตามเป้าหมายที่จะใช้โปรแกรมชุดนี้ในการออกแบบเซลล์แสงแดดได้ แต่อย่างไรก็ตามเราคิดว่าโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ในการดำเนินการในระยะ (Phase) ที่ 2 ของชุดโครงการเซลล์แสงแดดไทยต่อไปได้

โครงการนี้มีผลกระทบต่อหน่วยงานที่เห็นได้ชัดคือ ได้ช่วยเปิดโอกาสให้ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยขอนแก่นได้มีโอกาสพัฒนา Know-how เกี่ยวกับระบบระบบคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง (PC Cluster) และ มีระบบคอมพิวเตอร์ดังกล่าว สำหรับการดำเนินงานด้าน High Performance Computing ต่อไปในอนาคต และโครงการนี้ยังมีส่วนช่วยกระตุ้นให้เกิดการเรียนการสอนทางด้าน Computational Physics อย่างเป็นทางการขึ้นอีกด้วย

ในแง่ของการพัฒนานุคลากร โครงการนี้ทำให้เกิดการผลิตมหาบัณฑิตโดยตรง 2 คน และ โดยอ้อม 1คน(งานวิจัยเป็นเรื่องใกล้เคียงกับงานของโครงการ แต่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับโครงการ ฯโดยตรง) มหาบัณฑิตทั้งหมดได้ทำงานให้กับหน่วยงานของรัฐอยู่ในขณะนี้

บทคัดย่อ

ได้ทำการวิจัยพัฒนาชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงแดดใน 2 มิติขึ้น โดยการเขียนโปรแกรมในภาษา FORTRAN 90 การจำลองแบบทำโดยใช้ทฤษฎีทางฟิสิกส์เป็นจุดเริ่มต้นเท่านั้น (first principle simulation) วิธีการทางตัวเลขที่ใช้เป็นวิธีผลต่างสืบเนื่อง(finite difference) และใช้การหาค่าผลเฉลยแบบ successive relaxation ซึ่งมีผลทำให้เราสามารถตามพฤติกรรมที่เปลี่ยนตามเวลาของเซลล์แสงแดดได้ ชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วย โปรแกรมการแบ่งกริด โปรแกรมการกำหนด doping profile ของเซลล์แสงแดด โปรแกรมการหาค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุที่ใช้ทำเซลล์ ตัวโปรแกรมการจำลองแบบ(simulation routine) และ โปรแกรม visualization เพื่อการแปรผล รวมทั้งได้มีการพัฒนาโปรแกรมการจำลองแบบที่ใช้เทคนิคการคำนวณแบบขนานบน PC Cluster เพื่อเร่งความเร็วในการจำลองแบบด้วย ผลจากการจำลองแบบเซลล์แสงแดดในกรณีต่าง ๆ ได้ข้อสรุปว่าชุดโปรแกรมนี้สามารถจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงแดดได้เกือบสมบูรณ์ โดยสามารถแสดงออกถึงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเซลล์แสงแดดในภาพรวมได้ถูกต้อง แต่ โปรแกรม จะทำนายค่ากระแสที่ได้จากเซลล์แสงแดดโดยมี systematic error ที่ทำให้ค่ากระแสสูงเกินจริงด้วยอัตราส่วน 10^3 เท่า การแก้ไขข้อบกพร่องนี้ยังคงมีการดำเนินการอยู่

Abstract

Development of a computer package for solar cell simulation has been done using FORTRAN 90 programming language. First principle simulation is performed employing finite difference with successive relaxation technique, which enable us to simulate time dependent behaviors of the solar cell under studied. The package consists of the following program: doping profile designator, grid generation, material property calculation, simulation routine, and visualization. Parallel simulation program, employing parallel programming technique running PC clusters, has also been developed to speed up the simulation. The results of simulation show that the simulation package is capable of simulate the working of solar cells almost completely. The result is qualitatively correct; but, quantitatively, it contains some systematic error, which estimate too high the value of output current of the cell by a factor of 10^3 . Investigation to correct this is currently underway as of this report is written.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สกว. ที่ได้สนับสนุนและเปิดโอกาสให้ดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ชี้แนะ ให้กำลังใจ และให้คำแนะนำที่มีค่าสูงยิ่ง หากปราศจากคำชี้แนะจากท่าน เราคงไม่สามารถทำได้ถึงครึ่งทางที่หวังไว้

ขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้สนับสนุน งบประมาณเป็นกรณีพิเศษ สำหรับการจัดหาครุภัณฑ์ สำหรับการสร้าง PC Cluster จำนวน 16 nodes ที่ได้ช่วยให้การดำเนินงานของโครงการเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

สุดท้ายเราขอแสดงความซาบซึ้งต่อครอบครัวของเราที่ได้ช่วยสนับสนุน และเป็นกำลังใจในการทำงานด้วยดีเสมอมา

พฤษภาคม 2546

สารบัญ

	หน้า
1. บทนำ	1
2. การจำลองแบบเซลล์แสงแดด	2
3. การพัฒนาโปรแกรมการแบ่งกริด	4
4. โปรแกรมจำลองแบบ (Simulation Routine)	9
5. ผลของการจำลองแบบ	11
5.1 ผลการจำลองแบบในเชิงคุณภาพ	11
5.2 ผลการจำลองแบบในเชิงปริมาณ	14
6. สรุปและวิจารณ์	17
ภาคผนวกที่ 1	18
ภาคผนวกที่ 2	19

1. บทนำ

โครงการนี้เป็นการวิจัยเพื่อประมวลองค์ความรู้และ Know-how เพื่อการสร้างชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจำลองแบบ(simulation) การทำงานของเซลล์แสงแดดโดยเริ่มจากกฎเกณฑ์พื้นฐานทางฟิสิกส์ที่เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่าง ๆ ของ semiconductor devices จุดมุ่งหมายหลักของโครงการคือการสร้างชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้น และใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองแบบเพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่จะทำให้เซลล์แสงแดดมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงที่สูงสุดเท่าที่จะสามารถทำได้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสร้างเซลล์จริงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

การดำเนินงานเราใช้ FORTRAN 90 เป็นภาษาในการพัฒนาชุดโปรแกรม และใช้ระบบปฏิบัติการ(Operating System) Linux ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการแบบเปิด (Open Source Operating System) เป็นฐานในการดำเนินงาน เราได้พัฒนาโปรแกรมทั้งหมดขึ้นมาเอง โดยได้ใช้ Public Domain Library 2 ชิ้นคือ Parallel Virtual Machine (PVM) version 3.4 เป็นเครื่องมือช่วยในการพัฒนาโปรแกรมแบบขนาน และ PGPLOT Graphics Library version 5.2 เป็นเครื่องมือในการพัฒนาโปรแกรม Visualization เท่านั้น เหตุผลที่สำคัญที่ดำเนินการดังนี้ก็เพราะ ชุดโครงการของเราต้องการมีความสามารถในการแข่งขัน(competitive) ในระดับสากล เราจำต้องมีโปรแกรมที่เราสามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่มีข้อติดขัด และ นอกจากนี้การพัฒนาชุดโปรแกรมนี้ขึ้นมาเอง จะเป็นการสร้างฐานความรู้และ Know-how ที่จะทำให้นักวิจัยต้นสังกัดสามารถทำการวิจัยในสาขา Semiconductor Device ต่อไปในอนาคตได้

ในการดำเนินการ โครงการ ฯ ได้มีการพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงในรูปแบบของ Linux Beowulf Cluster ขึ้น (โดยการสนับสนุนงบประมาณเป็นกรณีพิเศษจากคณะวิทยาศาสตร์ มข.) เพื่อใช้ในการดำเนินงานของโครงการ ซึ่งเป็นการขยายขีดความสามารถ ทางด้านการคำนวณสมรรถนะสูง(High Performance Computing) และ การเรียนการสอนในสาขาวิชา Computational Science ของหน่วยงานโดยตรง นอกจากนี้เราได้ผลิตมหัศจรรย์ทางฟิสิกส์ 2 คนจากงานของโครงการ ฯ โดยวิทยานิพนธ์เรื่อง “**การใช้เทคนิคโปรแกรมแบบขนานเพื่อการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ใน 2 มิติ**” โดย นายเชษฐา รัตนพันธ์ (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2546, ISBN 974-367-418-7) ที่ได้แนบไว้ใน ภาคผนวกที่ 1 และวิทยานิพนธ์เรื่อง “**การศึกษาและสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่า Generation Rate (G) และ Recombination Rate (R) สำหรับเซลล์สุริยะที่ทำจากซิลิกอน**” โดย นายอนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์ (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัย

* ขณะนี้เป็นอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มข. และได้เข้าร่วมเป็นผู้ร่วมวิจัยของโครงการ ฯ

ชอนแก่น 2545, ISBN 974-668-760-3) ที่ได้แนบไว้ใน **ภาคผนวกที่ 2** ซึ่งทั้งหมดนี้ ได้มีการรวบรวมองค์ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงแดดไว้โดยครบถ้วน

เนื่องจากการได้มีการทำการสืบค้นงานที่มีผู้ทำไว้ก่อนและได้รวบรวมนำเสนออย่างเป็นระบบไว้ตามที่กล่าวแล้ว รายงานนี้จึงจะนำเสนอเนื้อหาทางเทคนิค หรือ ทฤษฎีของการจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงแดด ไว้โดยสรุปเท่านั้น รายละเอียดต่าง ๆ จะได้มีการอ้างถึง **ภาคผนวกที่ 1** และ/หรือ **ภาคผนวกที่ 2** ตามความเหมาะสมเป็นกรณีไป

2. การจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงแดด

ในการทำงานของเซลล์แสงแดด กฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์ที่บังคับพฤติกรรม ของอนุภาคนำกระแส คือ สมการสถานะ (State Equations) ของ Solid State Devices 3 สมการหลักคือ

- Poisson's Equation :

$$\nabla^2 \psi = -\frac{q}{\epsilon} (p - n + n_0 - p_0)$$

- Current Density Equation :

$$J_n = -q(\mu_n n \nabla \psi - D_n \nabla n)$$

$$J_p = -q(\mu_p p \nabla \psi + D_p \nabla p)$$

- Continuity Equation :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = +\frac{1}{q} \nabla \cdot \overline{J_n} + G - R$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot \overline{J_p} + G - R$$

โดยที่ q คือ ขนาดของประจุไฟฟ้ามูลฐาน (C)

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (cm⁻³)

p คือ ความหนาแน่นของโฮล (cm⁻³)

n₀ คือ ความหนาแน่นของโดเนอร์ (cm⁻³)

p₀ คือ ความหนาแน่นของแอคเซ็ปเตอร์ (cm⁻³)

ψ คือ ศักย์ไฟฟ้า (V)

ϵ คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของวัสดุ (F/cm)

($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ (F/cm)

ϵ_r คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ หรือ คงตัวไดอิเล็กตริก)

J_n, J_p คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของ อิเล็กตรอน และ โฮล (A/cm²)

μ_n, μ_p	คือ ค่าโมบิลิตีของ อิเล็กตรอน และ โฮล ($\text{cm}^2/\text{V s}$)
D_n, D_p	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ อิเล็กตรอน และ โฮล (cm^2/s)
G	คือ อัตราการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (cm^{-2})
R	คือ อัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอน-โฮล (cm^{-2})

ในการจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงแดด สิ่งที่เราต้องการทราบในขั้นสุดท้ายคือ ค่า J ที่ได้จากเซลล์ภายใต้เงื่อนไข (boundary conditions) ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งหมายความว่าเราจะต้องหาผลเฉลยของ differential equation ทั้ง 5 สมการที่เกี่ยวข้อง (coupled) กันอยู่ สิ่งสำคัญก็คือ ภายใต้เงื่อนไข (boundary conditions) ของเซลล์โดยทั่วไป เราไม่สามารถหาผลเฉลยแน่นอนตรง (exact solution) ของสมการข้างบนได้โดยคณิตวิเคราะห์ (mathematical analysis) และเราจะต้องใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลข (numerical analysis) เพื่อหาผลเฉลยของชุดสมการสถานะนี้ ดังนั้น ขั้นตอนของการพัฒนาชุดโปรแกรมการจำลองแบบจะมีดังต่อไปนี้คือ

- (ก) การแบ่งกริด ซึ่งเป็นการกำหนดจุดที่จะเป็นตัวแทนของบริเวณต่าง ๆ ของเซลล์ที่กำลังพิจารณา รายละเอียดของการพัฒนาในส่วนนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป
 - (ข) การแปลงสมการสถานะให้เป็นชุดของสมการผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) ณ จุดกริดต่าง ๆ ในเซลล์ที่พิจารณา
 - (ค) การหาผลเฉลยของชุดสมการที่ได้จากการดำเนินงานในข้อ (ข) ซึ่งเราเลือกใช้วิธี successive relaxation ในการดำเนินงาน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ทำให้เราสามารถรับมือสภาพการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของการทำงานของเซลล์ได้
- รายละเอียดของ (ข) และ (ค) มีอยู่ในบทที่ 3 ของ **ภาคผนวกที่ 1** (หน้า 14-36)

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็น input ให้แก่โปรแกรมจำลองแบบแยกออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

- (1) ค่าที่เป็นการออกแบบสร้างเซลล์ซึ่งกำหนดขึ้นเองตามเงื่อนไขขีดความสามารถของการผลิตจริงในห้องปฏิบัติการ ค่าเหล่านี้ได้แก่ ค่ามิติ (ความกว้าง ความยาว ตำแหน่งรอยต่อระหว่างชนิดของสาร (n หรือ p) ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้า และ doping profile เป็นต้น
- (2) ค่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของระบบที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสาร (ขณะนี้เราพิจารณาเป็น ซิลิกอน เท่านั้น) ซึ่งได้แก่ ค่าโมบิลิตี และ ค่าอัตราการเกิด และการรวมกันของคู่อิเล็กตรอน และ โฮล (G และ R) ค่าเหล่านี้มีการรวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไว้ในบทที่ 2-4 ของ **ภาคผนวกที่ 2** (หน้า 3-52) และวิธี

การ และผลลัพธ์ที่ได้รายงานไว้ใน บทที่ 5 และ 6 ของ *ภาคผนวกที่ 2* (หน้า 53-112) ได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาชุดโปรแกรมนี้

- (3) ค่าสภาวะและ เงื่อนไขการทำงานของเซลล์ ค่านี้ได้แก่ค่า bias voltage จะ ถูกกำหนดขึ้น ในตอนรันโปรแกรม

การกำหนดค่า doping profile ของเซลล์จะมีที่มา 2 แบบคือ (1) มาจาก การกำหนดโดย ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (empirical formula) ล้วน ๆ เช่นการใช้ รูปฟังก์ชัน

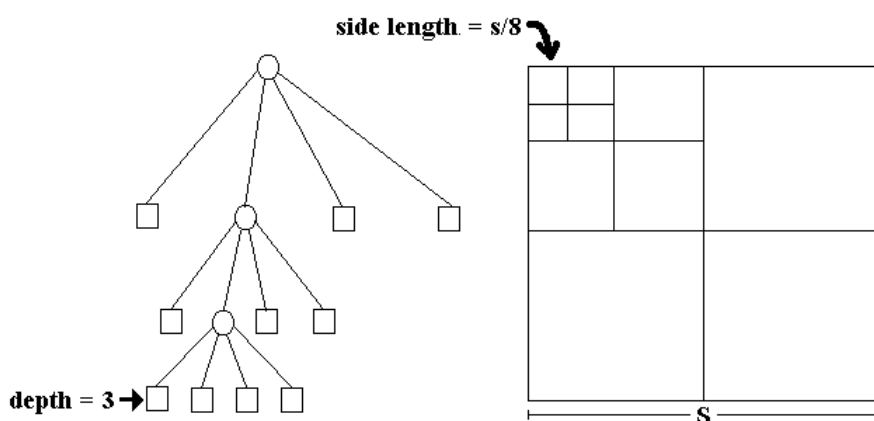
$$f(x) = C - A \exp(-Bx)$$

โดยที่ A, B, และ C เป็น พารามิเตอร์ที่ ปรับค่าได้ และ x เป็นค่าระยะห่างจากรอยต่อ pn เป็นต้น และ (2) มาจากผล (output) ของโปรแกรมการจำลองแบบการปลูกฟิล์ม(process simulation) เช่น TSUPREM เป็นต้น

3. การพัฒนาโปรแกรมการแบ่งกริด

(3.1) แนวคิดหลัก

แนวความคิดหลักในการแบ่งกริดของเราได้อาศัยแนวความคิดการแบ่งกริดแบบ Quadtree¹ ซึ่งได้ใช้วิธีการแบ่ง mesh เริ่มต้นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสออกเป็น 4 ส่วน (quadrants) เท่า กัน โดยมีการแบ่งส่วนต่างๆ ต่อไปอีกตามความละเอียดในส่วนที่จำเป็น ตามรูปที่ 1 แต่ในการนำ แนวความคิดนี้มาประยุกต์ใช้เราได้มีการปรับเปลี่ยนใน 3 ส่วนหลักดังนี้

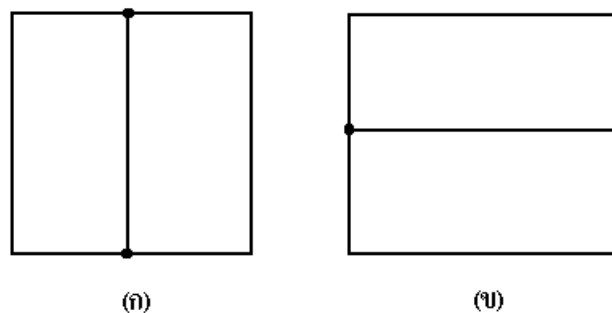


รูปที่ 1 การแบ่ง domain แบบ Quadtrees

¹ M. deBerg, M. Overmars, and O. Schwarz; *Computational Geometry : Algorithm and Application*; Springer-Verlag, pp.289-300(1997)

(ก) mesh เริ่มต้นไม่จำเป็นต้องเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะ และการวางรอยต่อ p-n ใน devices ของเรา

(ข) เพื่อให้รับกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ doping profile แบบ club sandwich จำต้องมีการอนุญาตให้มีการ “แบ่งสอง” เข้ามาด้วย เนื่องจากในบริเวณหนึ่งๆ ของ Solar cell อาจจะมีการเปลี่ยน doping profile ในทิศ x หรือ y เพียงทิศเดียว การ “แบ่งสอง” นี้ จะมีได้ 2 ลักษณะ ตามรูปที่ 2 คือ แนวตั้งและแนวนอน และมีเงื่อนไขข้อจำกัดที่สำคัญคือ ความยาวระหว่าง ด้านสองด้านของ mesh จะต้องไม่น้อยกว่า 1:8



รูปที่ 2 การ “แบ่งสอง” ที่เพิ่มเข้ามาจาก Quadtree ปกติ (ก) แบ่งแนวตั้ง และ (ข) การแบ่งแนวนอน

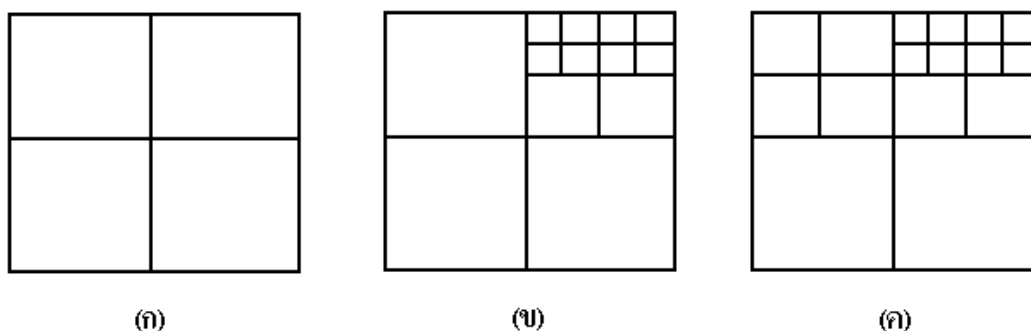
การแบ่ง mesh ย่อยจะใช้เงื่อนไขของค่า gradient ของ doping (ค่า n_0 และ p_0) เป็นหลัก (ซึ่งอาจจะเปลี่ยนเป็นค่า gradient ของ voltage หรือ อื่นๆ ได้โดยง่าย) เงื่อนไขการแบ่ง “แบบสี่” (Quadtree) ก็คือค่า gradient ระหว่างมุมบนด้านต่างๆ (บน, ล่าง, ซ้าย, ขวา) จะต้องมีความมากกว่า ค่า limit ที่สามารถกำหนดได้โดยผู้ใช้โปรแกรม และเงื่อนไขของการ “แบ่งสอง” ในแนวตั้ง ก็คือ gradient ด้านบนและด้านล่างของ mesh เท่านั้นที่มีค่าเกิน limit (รูปที่ 2(ก))

(ค) นอกจากนี้เมื่อมีการ “แบ่งสี่” หรือ “แบ่งสอง” จนได้ความละเอียด (ค่าของ gradient ระหว่างมุมของ mesh box ไม่เกินค่าที่ตั้งไว้) ตามความต้องการแล้ว จะต้องมีการนำเงื่อนไขของ finite box² เข้ามาร่วมพิจารณาด้วย ซึ่งผลในทางปฏิบัติคือ ใน mesh box ที่ติดกันจำนวนระดับชั้น (dept) ของการแบ่งจะต้องต่างกันเพียง 1 เท่านั้น ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3 ซึ่ง

² A. F. Franz, G. A. Franz, S. Selberherr, C. Ringhofer, and P. Markowich; “Finite Box-A Generalization of the Finite Difference Method Suitable for Semiconductor Device Simulation”; *IEEE Trans. Electron. Devices*, Vol. ED-30, pp.1070-1082, 1983.

เป็นการพิจารณา การแบ่ง mesh หลักอันหนึ่งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง doping profile ที่รุนแรงที่มุมบนขวา (Quadrant ที่1) ทำให้มีการแบ่งแบบ Quadtree ในบริเวณนี้ มากครั้ง (ถึงครั้งที่ 3) ซึ่งทำให้เกิดจุด กริดที่เป็นจุดสิ้นสุดของเส้นกริดขึ้น 2จุด บนด้านขวามือ mesh box บนขวา (Quadrant ที่2) ตามรูปที่ 3(ข) ดังนั้นจึงต้องมีการแบ่ง mesh box ของ Quadrant ที่ 2 นี้ อีก ครั้งหนึ่งเพิ่มให้เป็นไปตามเงื่อนไข finite box ดังรูปที่ 3(ค)

เมื่อการแบ่งตามแบบ Quadtree ตามรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วสิ้นสุดลง จุดกริดที่จะเป็นตัวแทนของ device ทั้งหมดจะเป็นจุดมุมของ mesh box ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการแบ่งในทุกระดับที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3 แสดงการแบ่งแบบ Quadtree ของ mesh Box อันหนึ่ง

- (ก) เป็นการแบ่งระดับที่ 1 (ครั้งแรก) ตามเงื่อนไขของ Gradient
- (ข) มุมบนขวา (Quadrant ที่ 1) มีการเปลี่ยนแปลงรุนแรง จึงมีการแบ่ง mesh Box ลงไปอีก 2 ครั้ง
- (ค) Quadrant ที่ 2 จึงต้องมีการแบ่งแบบ Quadtree อีกครั้งหนึ่ง เพื่อไม่ให้ขัดกับเงื่อนไข Finite Box (มีจุดกริดบนด้านของ mesh box ได้ไม่เกิน 1)

(3.2) การออกแบบโปรแกรม

โปรแกรมการแบ่งกริดจะมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้คือ

(ก) classical tensor grid จะถูกสร้างขึ้นมาก่อนจากจุดตัดของเส้นกริดในแนวตั้งและแนวนอนที่เหมาะสมกับเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของ device ซึ่งได้แก่ ขนาดและตำแหน่งของรอยต่อ pn ในรูปแบบของ club sandwich

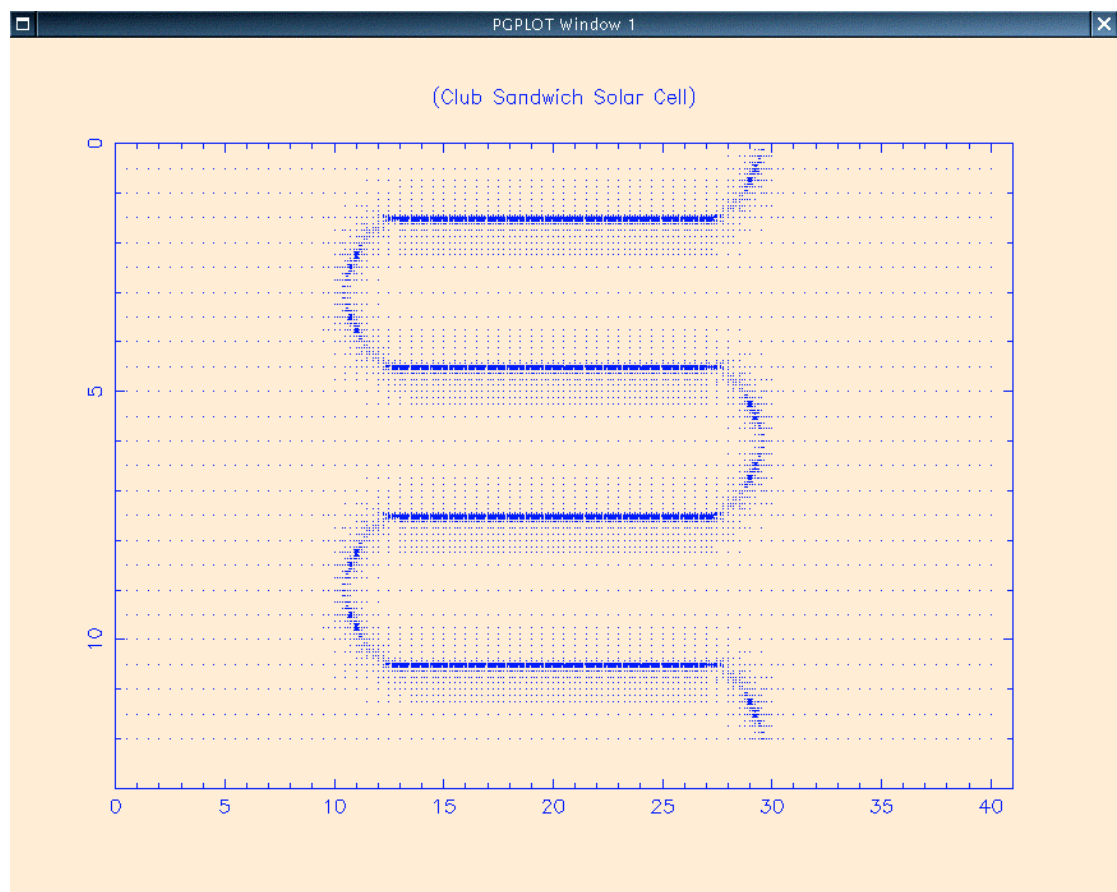
(ข) ดำเนินการตรวจสอบค่า gradient ของ บนด้านต่างๆ ของ mesh Box ที่เกิดขึ้นในข้อ (ก) แล้วทำการแบ่งกริดในรูปแบบ “แบ่งสี่” (Quadtree) หรือ “แบ่งสอง”ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

จุดยุ่งยากของการดำเนินงาน ในขั้นตอนนี้ก็จะต้องมีการจัดระบบในการกำหนด
ดัชนีของ mesh Box และจุดกริดที่เป็นมุมต่างๆของ mesh และที่สำคัญที่สุดก็คือจุดกริดทั้งหมดจะ
ต้องมีดัชนีไปถึงเพื่อนบ้านทั้งสี่ด้านด้วย

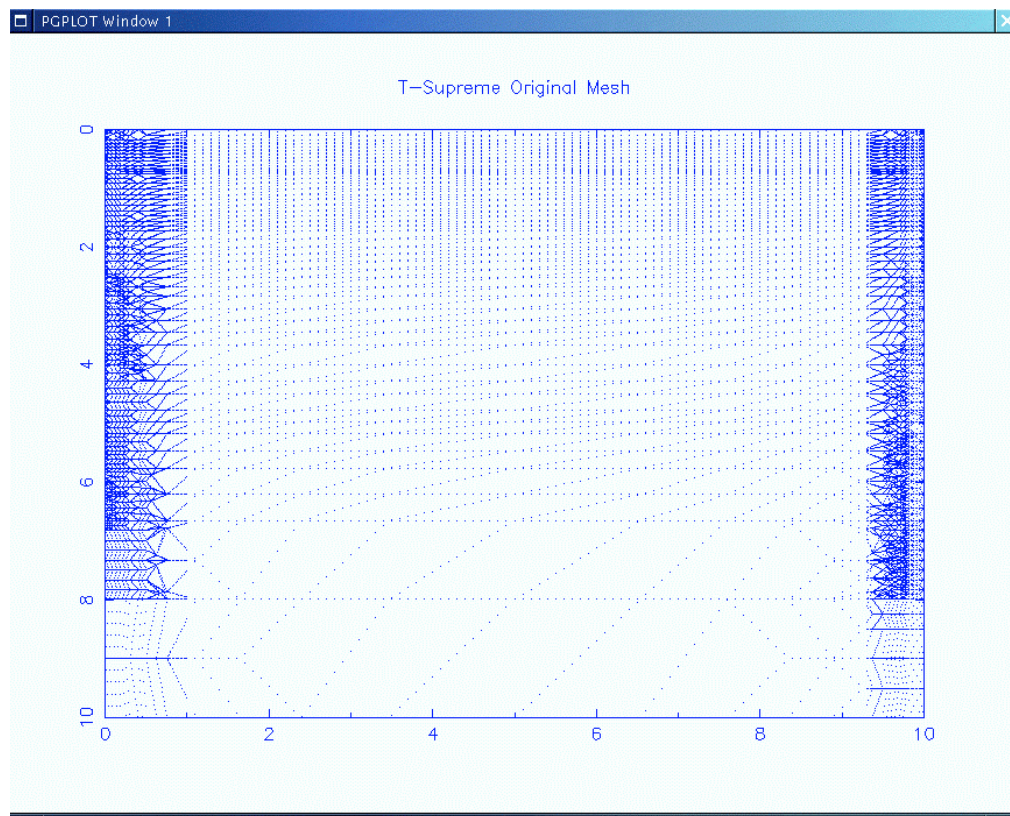
(ค) ดำเนินงานตามข้อ(ข) ต่อ mesh Box ย่อย ที่เกิดขึ้นมาใหม่ โดยวนซ้ำจนไม่มีความ
จำเป็นต้องแบ่ง mesh Box อีกต่อไป หรือ อาจจะมีการกำหนดโดยผู้ใช้ได้ว่าจะมีการ iterate แบ่ง
mesh ได้กี่ระดับ ตามที่ผู้ใช้อยู่ต้องการ

(ง) ตรวจสอบเงื่อนไข finite box ของ mesh Box ทุกอันที่เกิดขึ้นว่าจำเป็นต้องมีการ
ดำเนินตามหัวข้อ 1(ค)หรือไม่ ซึ่งถ้ามีการดำเนินการตามนั้น mesh Box ที่เกี่ยวข้อง (เป็น “เพื่อน
บ้าน”)ทั้งหมด จะต้องถูกนำมาพิจารณาใหม่ทั้งหมด

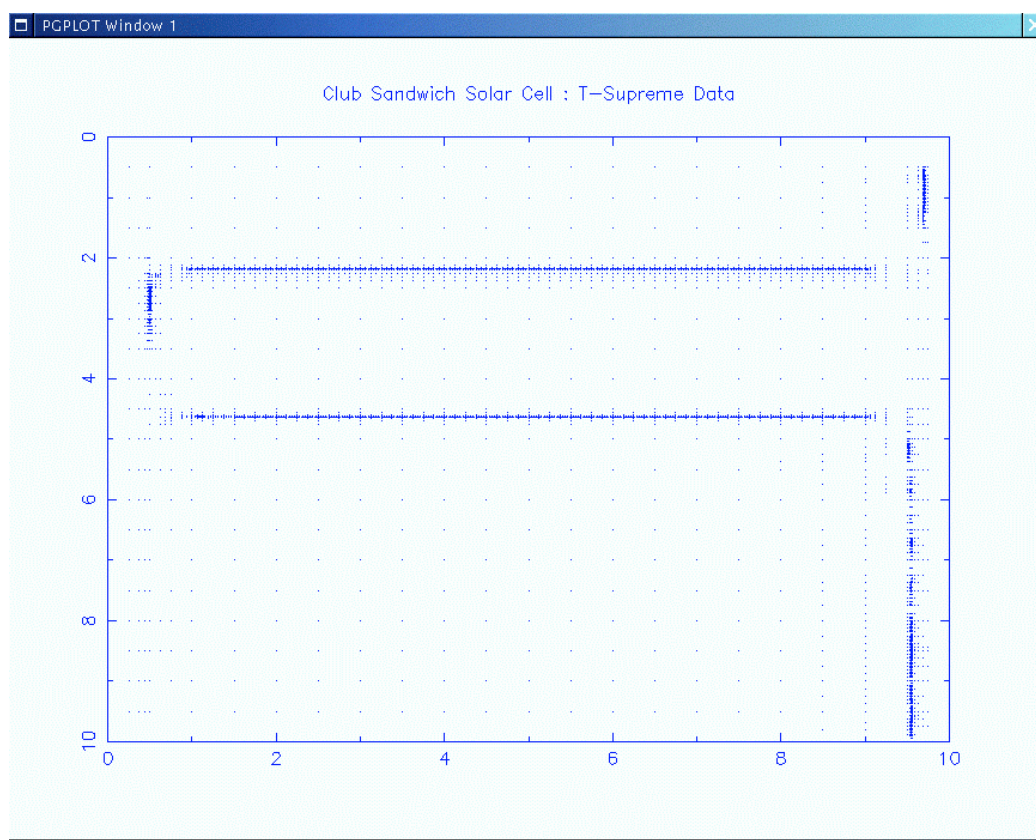
โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความยาวประมาณ 20,000 บรรทัด ได้ผลการสร้างกริด
ตาม doping profile ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5



รูปที่ 4 แสดงกริดที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 5 กริดเริ่มต้นจาก output ของ TSUPREM



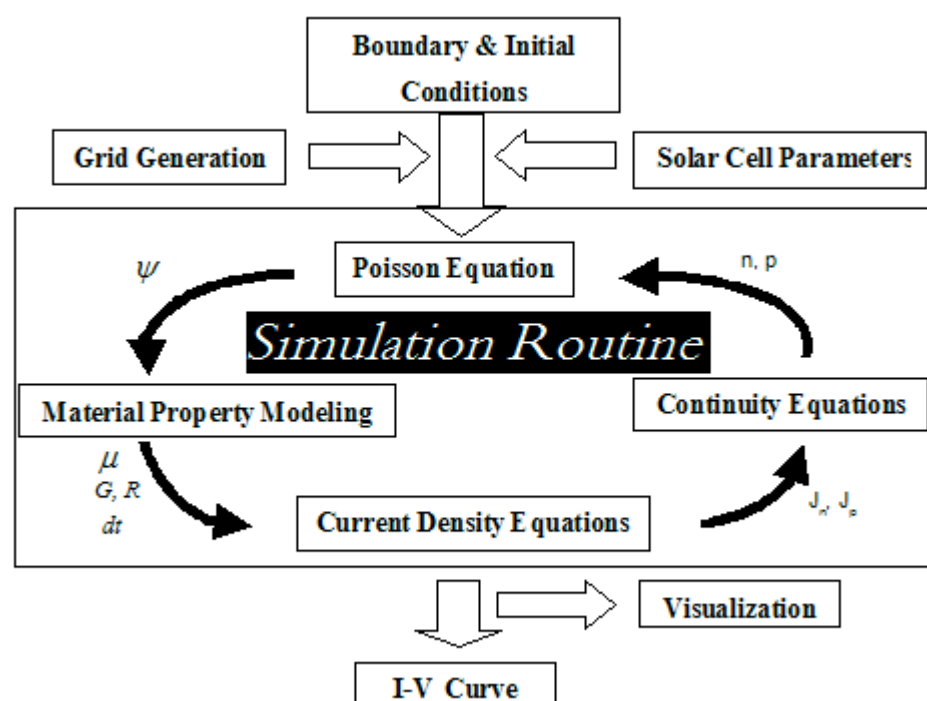
รูปที่ 6 กริดที่สร้างจาก doping profile และ กริดเริ่มต้นของ TSUPREM

โปรแกรมนี้สามารถปรับเปลี่ยนให้ใช้เงื่อนไขอื่น ๆ มาร่วมพิจารณาในการแบ่งกริดได้โดยง่าย นอกจากนี้ เมื่อได้มีการพัฒนา Routine การ Mapping ค่าพารามิเตอร์ระหว่างกริด 2 ชุดขึ้น เราสามารถ สร้างกริดชุดใหม่ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองแบบโดยชุดโปรแกรมของเราได้ดังที่ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 5 ซึ่งเป็นกริดเริ่มต้นจาก output จากโปรแกรม TSUPREM และ รูปที่ 6 ซึ่งเป็นกริดที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรมของเรา

ในขั้นสุดท้ายภายหลังจากที่ได้มีการกำหนดจุดกริดเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะสร้างไฟล์ข้อมูลขึ้น โดยไฟล์ข้อมูลนี้เป็นไฟล์แบบ random access file โดยที่จะมีการกำหนดหมายเลขประจำตัว (serial number) ให้กับกริดทุกกริด และจะใช้เลขประจำตัวนี้เป็น record number ของข้อมูลของกริดนั้น ๆ ในแต่ละ record ของข้อมูล จะมี field ของข้อมูลจัดเตรียมไว้ โดยจะมี field ของข้อมูลทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบ ณ จุดกริดนั้น ๆ field เหล่านี้ได้แก่ serial number ของกริดเพื่อนบ้านทั้งสี่ทิศ (เหนือ ใต้ ตะวันออก และ ตะวันตก) ค่า n_0 , p_0 , n , p , voltage, current density J และอื่น ๆ

เป็นที่น่าสังเกตว่า จาก mesh box ที่ได้ เราสามารถ สร้างกริดสำหรับการวิธีการ Finite Element ได้โดยไม่ยากนัก โดยสามารถสร้าง mesh สามเหลี่ยมขึ้นจากการลากเส้นทะแยงมุมเพียง 1 เส้นเท่านั้น

4. โปรแกรมจำลองแบบ (Simulation Routine)



รูปที่ 7 แผนภาพสรุปการทำงานของ Simulation Routine

จากแผนภาพการทำงานของ Simulation routine ใน **รูปที่ 7** โปรแกรมจำลองแบบจะอ่านไฟล์ข้อมูลของเซลล์แสงแดด ซึ่งสร้างโดยโปรแกรมการแบ่งกริด แล้ว โปรแกรมจะทำ Jacobi Iteration สมการทั้ง 5 สมการไปพร้อม กันเพื่อหาสถานะสุดท้ายของเซลล์ โดยจะมีการคำนวณค่า μ , G , R , และ dt ต่อจากการ iterate Poisson's Equation และ การ iterate จะหยุดลงเมื่อ dn/dt และ dp/dt มีค่าน้อยมาก

สมการ Finite Difference ที่เราใช้ในการพัฒนาโปรแกรม มีดังนี้คือ

(1) Normalized Poisson's Equation

$$\Psi_K = \frac{h_N \cdot h_S \cdot h_E \cdot h_W}{2(h_N \cdot h_S + h_E \cdot h_W)} \cdot \left\{ \frac{2\Psi_N}{h_N(h_N + h_S)} + \frac{2\Psi_E}{h_E(h_E + h_W)} + \frac{2\Psi_S}{h_S(h_N + h_S)} + \frac{2\Psi_W}{h_W(h_E + h_W)} - n_k + p_k + n_{0k} - p_{0k} \right\}$$

โดยที่ subscript N,E,S,W หมายถึงค่าของเพื่อนบ้านในทิศ เหนือ ,ตะวันออก, ใต้ และ ตะวันตก ตามลำดับ

h_L เป็นระยะห่างระหว่างจุด k ไปยังเพื่อนบ้าน L โดยที่ L = N, E, S, หรือ W

(2) Normalized Current Density Equation และ Continuity Equation

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} &= \frac{\partial J_n}{\partial x} + \frac{\partial J_n}{\partial y} + (G_n - R_n) \\ &= \frac{J_{KE}^n - J_{WK}^n}{(h_E + h_W)/2} + \frac{J_{KS}^n - J_{NK}^n}{(h_S + h_N)/2} + (G_n - R_n) \end{aligned}$$

โดยที่

$$J_{KL}^n = \frac{\mu_{KL}^n}{h_L} \{n_L B(\Psi_L - \Psi_K) - n_K B(\Psi_K - \Psi_L)\}$$

เมื่อ L = N, E, S และ W

μ_{KL}^n = เป็นการหาค่า ณ จุดกึ่งกลางระหว่าง K+ L

B(x) = Bernoulli's function

$$= \frac{x}{e^x - 1}$$

และ สำหรับ p

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= - \frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{\partial J_p}{\partial y} + (G_p - R_p) \\ &= - \frac{J_{KE}^p - J_{WK}^p}{(h_E + h_W)/2} - \frac{J_{KS}^p - J_{NK}^p}{(h_S + h_N)/2} + (G_p - R_p) \end{aligned}$$

โดยที่

$$J_{KL}^p = \frac{\mu_{KL}^p}{h_L} \{p_K B(\Psi_L - \Psi_K) - p_L B(\Psi_K - \Psi_L)\}$$

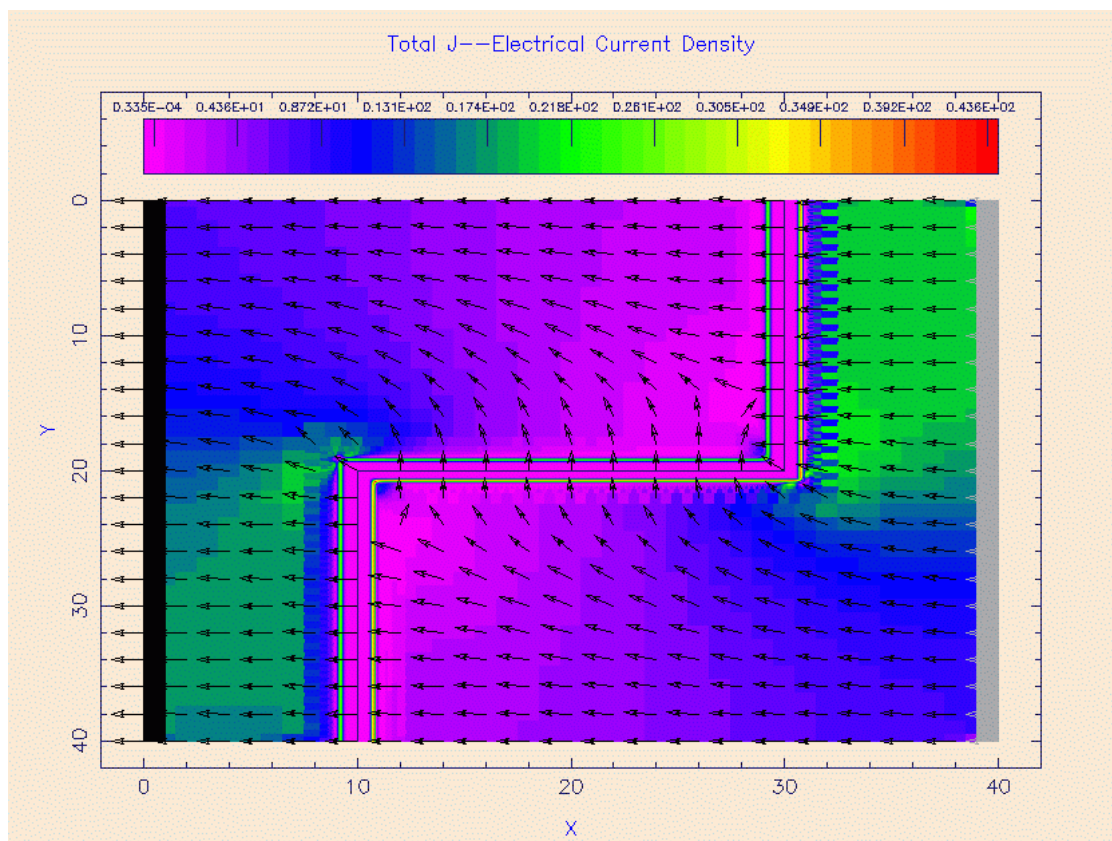
รายละเอียดทางเทคนิคของการพัฒนาโปรแกรม รวมทั้งเทคนิคการโปรแกรมแบบขนาน มีอยู่ในบทที่ 4-5 ของ **ภาคผนวกที่ 1** หน้า 37– 90 สำหรับการ normalized สมการสถานะ หน้า 19-22 และ การแสดงถึงที่มาและการพิสูจน์สมการที่ใช้ หน้า 124-146

5. ผลของการจำลองแบบ

ผลของการจำลองแบบจะได้แยกกล่าวถึงเป็น 2 กรณีด้วยกันคือ การจำลองแบบเพื่อดูพฤติกรรมทางฟิสิกส์โดยรวมในเชิงคุณภาพ(qualitative) และ การจำลองแบบเพื่อหา J-V Curve ในเชิงปริมาณ(quantitative) เพื่อนำไปหาพลังงานปลดปล่อย(power output) จากเซลล์ ซึ่งจะนำไปสู่ค่า ประสิทธิภาพ (efficiency) เซลล์แสงแดดต่อไป

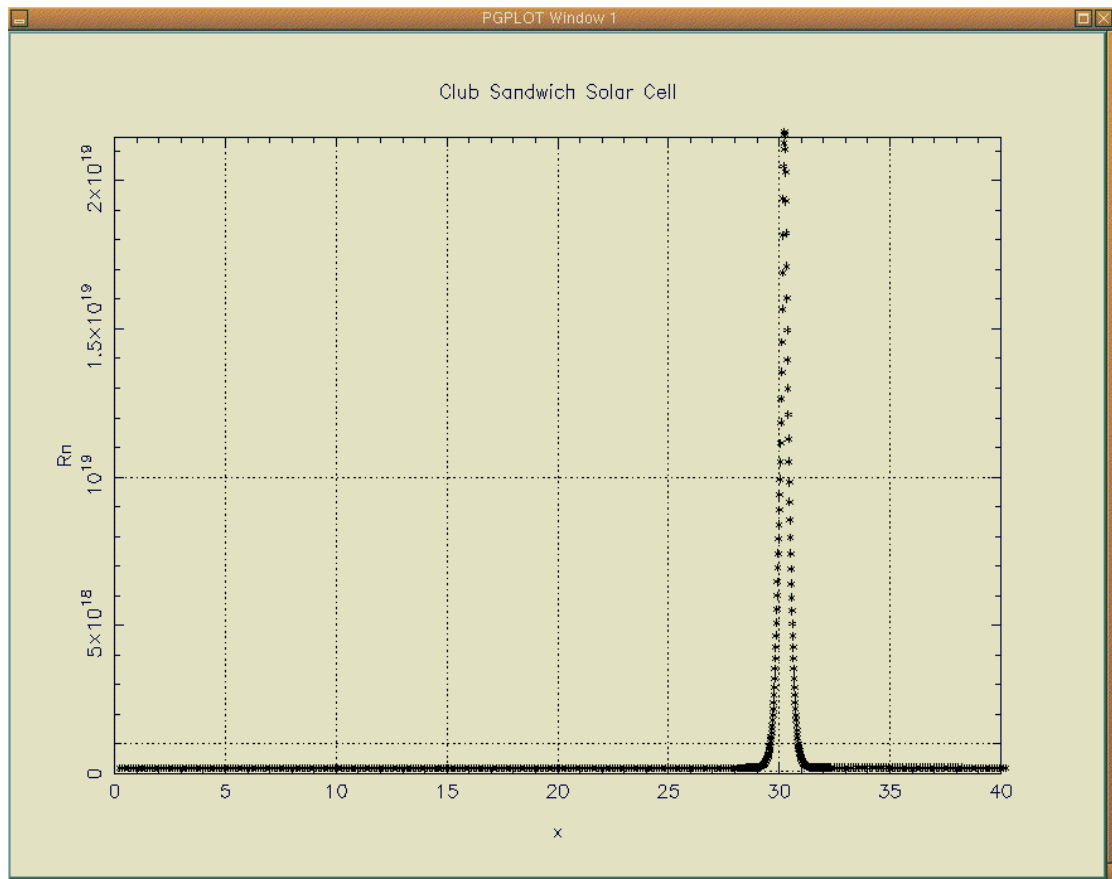
5.1 ผลการจำลองแบบในเชิงคุณภาพ

5.1.1 การเกิดของ space charged region



รูปที่ 8 snap shot ของผลการจำลองแบบในช่วงแรก ๆ การเกิด pn-junction

5.1.2 การดูพฤติกรรมการรวมตัวกลับ(recombination)ของ electron-hole pair



รูปที่ 9 กราฟของ Recombination Rate (R) เมื่อพลอตตามตำแหน่งภายในเซลล์ รอยต่อ pn อยู่ที่ $x=30$

ค่า Recombination rate เราคิดจาก

$$R = \frac{np - n_i^2}{\tau(n + p)}$$

โดยที่ n และ p คือ electron , hole densities

n_i คือ intrinsic carrier density

τ คือ life time ของ charge carrier

ได้การตรวจสอบการจำลองแบบโดยกำหนดค่า $\tau = 10^{-9}$ sec. แล้วเขียนกราฟระหว่างค่า R กับระยะทางผ่านรอยต่อ pn เราพบว่า ค่า R จะเพิ่มสูงขึ้นเป็นพีค(Peak)ในช่วงของ Dead layer(space charged region) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9 และเราได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อวัดค่าความกว้าง(ค่า FWTM และ FWHM)ของพีคนี้เพื่อการเปรียบเทียบผลจากการเปลี่ยนค่า τ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองแบบ เราพบปรากฏการณ์ดังนี้

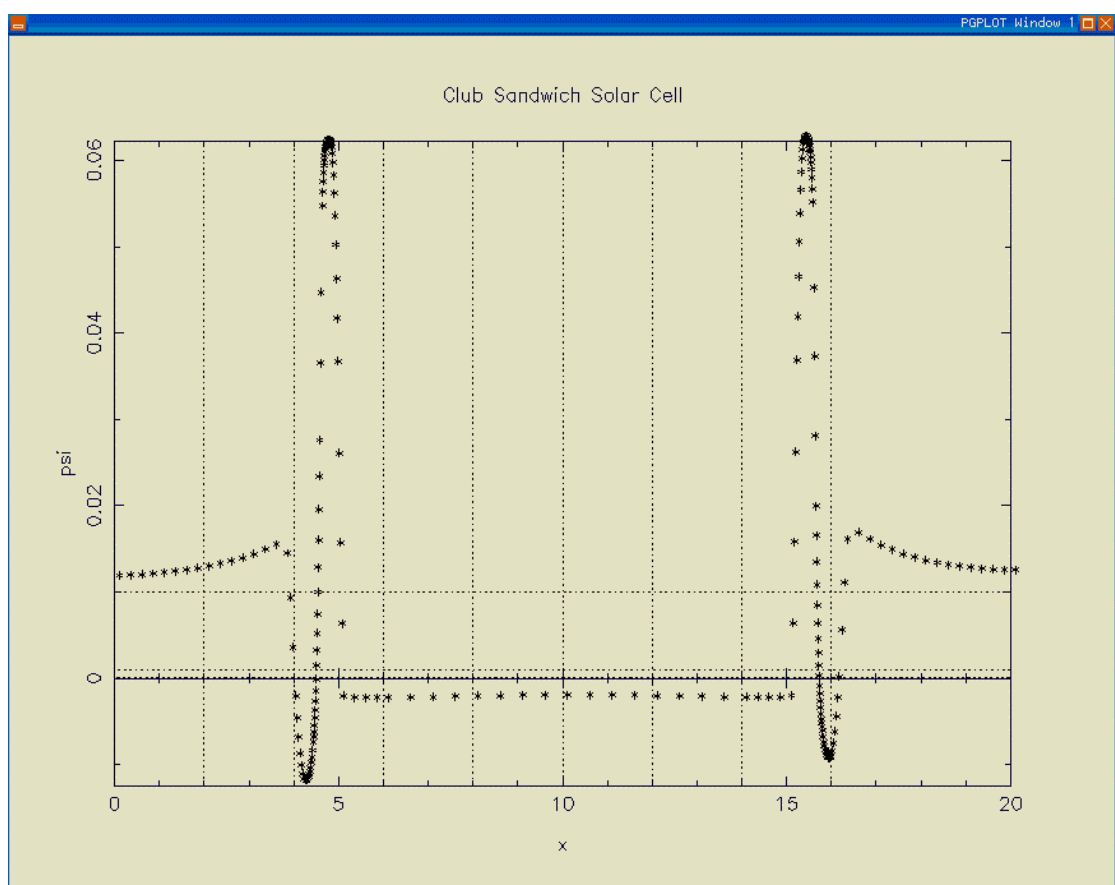
- เมื่อเพิ่ม τ จาก 10^{-9} sec เป็น 10^{-7} sec เราจะเห็นการหดตัวของ Dead layer ชัดเจน กล่าวคือ ค่า FWTM จะลดลง ประมาณ 20%
- การเปลี่ยน Bias voltage จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความกว้าง ดังนี้

bias(Volts)	FWTM(micron)
0.2	5.3281
0.4	3.9844

- นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่ม τ จาก 10^{-9} sec เป็น 10^{-7} sec กระแส (J) จาก device จะลดลงจาก $0.121 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ เป็น $0.078 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ถูกต้อง

5.1.4 การเกิด Built-in Potential

เมื่อทำการพลอตกราฟ ของ voltage ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเซลล์แสงแดด พบว่า จะมี built-in potential เกิดขึ้นที่ pn junction ตรงตามทฤษฎี ดังที่ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงการเกิด built-in potential ภายในเซลล์แสงแดด ณ ตำแหน่งรอยต่อ pn

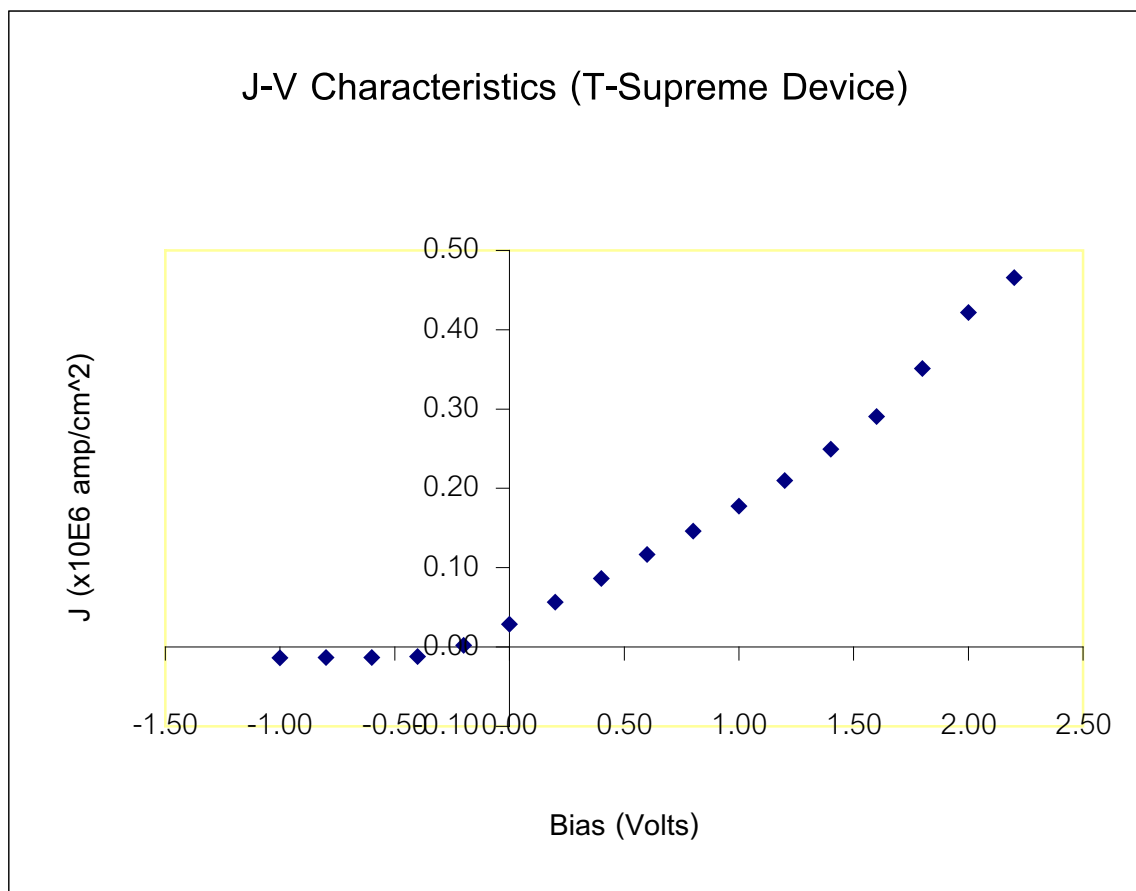
5.1.3 J-V Characteristic Curve

เราพบว่าลักษณะของ J-V Characteristic Curve ที่ได้จากการจำลองแบบมีลักษณะรูปร่างที่ถูกต้อง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 11-12

5.2 ผลการจำลองแบบในเชิงปริมาณ

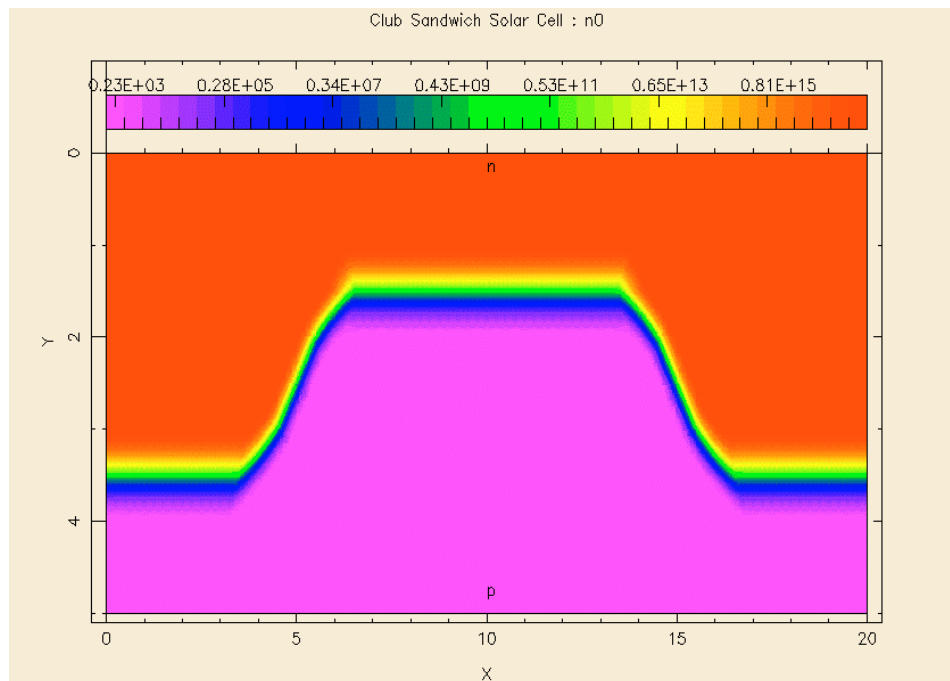
ได้มีการจำลองแบบเพื่อหา J-V Characteristic Curve ในหลายกรณีดังนี้

(ก) เซลล์ที่ได้จาก TSUPREM Doping 10^{19} cm^{-3} ได้ผลที่แสดงไว้ในรูปที่ 11

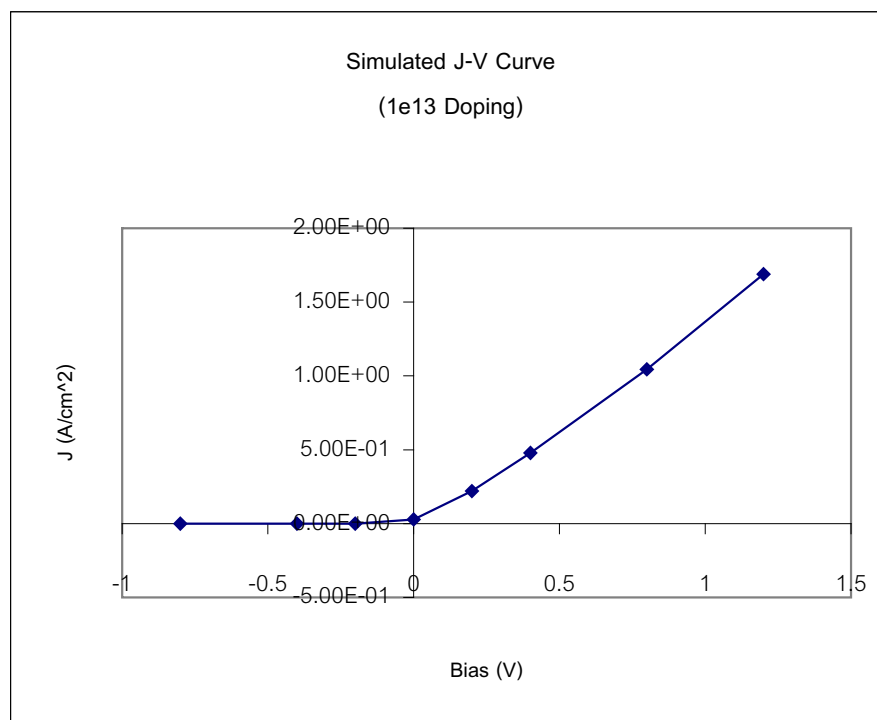


รูปที่ 11 J-V Curve ของเซลล์ที่สร้างโดย TSUPREM Process Simulator

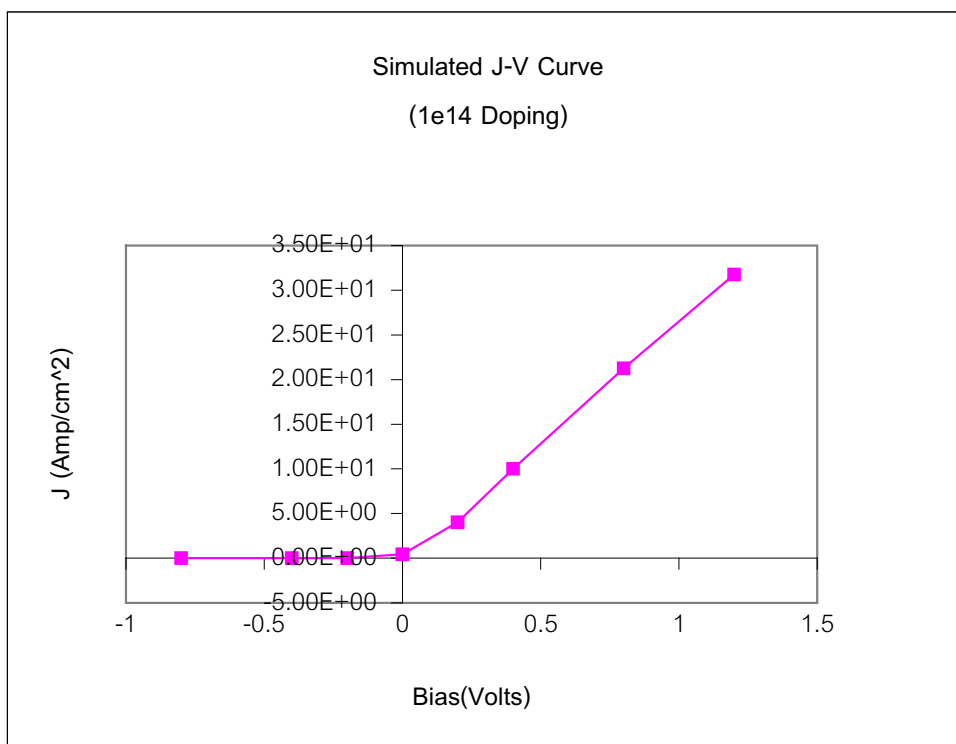
(ข) เซลล์ในรูปของ Modified Club Sandwich ลักษณะตามรูปที่ 12 สำหรับ doping 10^{13} , 10^{14} , และ 10^{17} cm^{-3} ซึ่งได้แสดงผลไว้ใน รูปที่ 13, 14, และ 15 ตามลำดับ



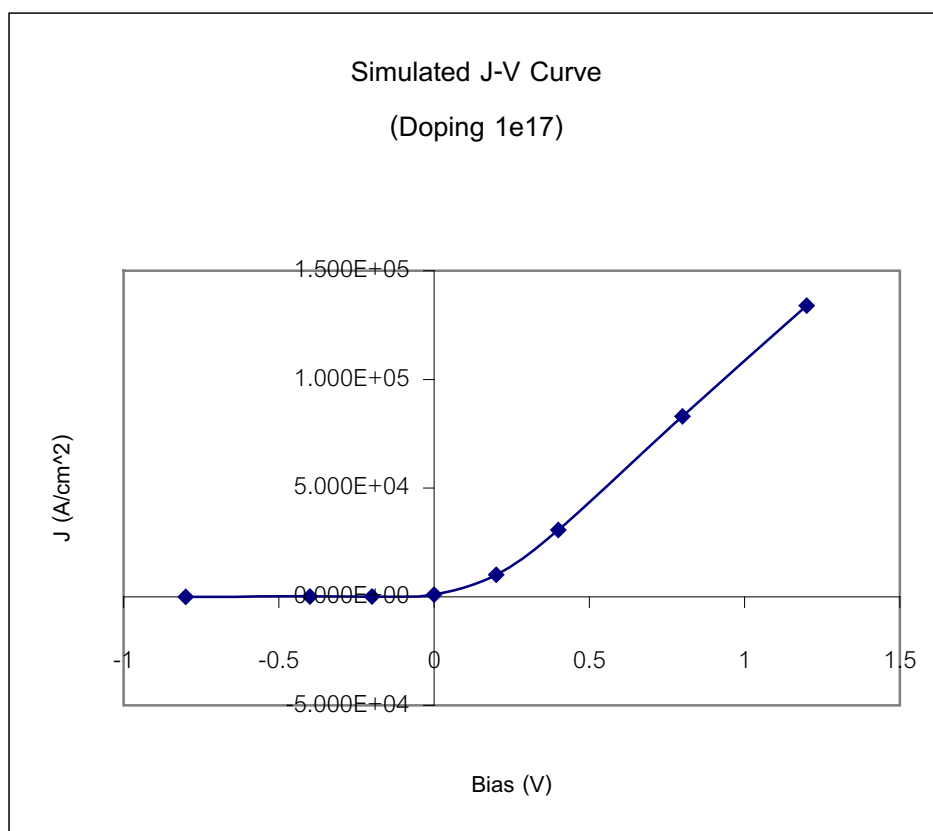
รูปที่ 12 Modified Club Sandwich Solar Cell



รูปที่ 13 J-V Curve ของเซลล์ในรูปที่ 12 โดยเงื่อนไข 10^{13} cm^{-3} doping



รูปที่ 14 J-V Curve ของเซลล์ในรูปที่ 12 โดยเจือปน 10^{14} cm^{-3} doping



รูปที่ 15 J-V Curve ของเซลล์ในรูปที่ 12 โดยเจือปน 10^{17} cm^{-3} doping

จากผลที่ได้แสดงไว้ข้างบนนี้ จะเห็นว่า ชุดโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ สามารถบริหาร ฟิสิกส์ที่อยู่ในระบบได้ถูกต้อง แต่ยังมีอุปสรรคที่สำคัญคือ ผลในเชิงปริมาณยังมีความผิดพลาดของระบบอยู่โดยจะเห็นว่า ค่ากระแสที่ได้ จะมีค่า (Order Of Magnitude) สูงเกินจริงไปด้วยขนาด 10^4 ในช่วง 6 เดือนสุดท้าย เราได้ใช้เวลาไปในการตรวจทานโปรแกรม แต่ยังไม่สามารถแก้ปัญหาได้ ขณะนี้เราได้มุ่งเป้าการแก้ไขไปที่ ข้อมูลที่ใช้ป้อนเข้าสู่โปรแกรม ซึ่งเรายังคงหวังว่าจะสามารถตรวจพบจุดผิด และแก้ไขได้ในไม่ช้า

6. สรุปและวิจารณ์

ผลการดำเนินงานของโครงการสามารถกล่าวได้ว่าประสบผลสำเร็จประมาณ 80% โดยที่โครงการสามารถพัฒนาชุดโปรแกรมการจำลองแบบการทำงานของเซลล์แสงแดดได้ จากจุดเริ่มต้นที่คณะผู้วิจัยไม่มีประสบการณ์ในด้าน Semiconductor Device Simulation มาก่อนเลย และเป็นที่น่าเสียดายว่า คณะผู้วิจัยยังไม่สามารถตรวจพบข้อผิดพลาดของชุดโปรแกรม ซึ่งทำให้เรายังไม่สามารถเข้าไปถึงการใช้ชุดโปรแกรมนี้ออกแบบเซลล์แสงแดดได้

ในแง่ของผลกระทบต่อหน่วยงาน โครงการนี้ประสบผลสำเร็จที่ได้ช่วยเปิดโอกาสให้ภาค วิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นได้มีโอกาสพัฒนา know-how เกี่ยวกับระบบระบบคอมพิวเตอร์ สมรรถนะสูง (PC Cluster) และ มีระบบคอมพิวเตอร์ดังกล่าว สำหรับการดำเนินงานด้าน High Performance Computing ต่อไปในอนาคต และโครงการนี้ยังมีส่วนช่วยกระตุ้นให้เกิดการเรียน การสอนทางด้าน Computational Physics อย่างเป็นทางการขึ้นอีกด้วย ซึ่งเราหวังว่าหน่วยงานนี้ จะเป็นกำลังสำคัญในการผลิตบุคลากรในด้านนี้ต่อไปในอนาคต

ในแง่ของการพัฒนาบุคลากร โครงการนี้ทำให้เกิดการผลิตมหาบัณฑิตโดยตรง 2 คน และ โดยอ้อม 1 คน (งานวิจัยเป็นเรื่องใกล้เคียงกับงานของโครงการ แต่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับโครงการ ฯ โดยตรง) มหาบัณฑิตทั้งหมดได้ทำงานให้กับหน่วยงานของรัฐอยู่ในขณะนี้

7. ภาคผนวก 1

ผลงานของนักศึกษา ป.โทผู้รับทุนผู้ช่วยวิจัย

*การใช้เทคนิคโปรแกรมแบบขนาน
เพื่อการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนด์วิชใน 2 มิติ*

โดย นายเชษฐา รัตนพันธ์

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2546,

ISBN 974-367-418-7

8. ภาคผนวก 2

ผลงานของนักศึกษา ป.โทผู้รับทุนผู้ช่วยวิจัย

การศึกษาและสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่า Generation Rate (G) และ Recombination Rate (R) สำหรับเซลล์สุริยะที่ทำจากซิลิกอน

โดย นายอนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2545

ISBN 974-668-760-3

* ขณะนี้เป็นอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มข. และได้เข้าร่วมเป็นผู้ร่วมวิจัยของโครงการ ฯ



การใช้เทคนิคโปรแกรมแบบขนานเพื่อจำลองแบบเซลล์สุริยะ
แบบคลับแซนด์วิชใน 2 มิติ

APPLICATION OF PARALLEL PROGRAMMING TECHNIQUE
IN 2-D CLUB SANDWICH SOLAR CELL SIMULATION

นายเชษฐา รัตนพันธ์

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ.2546

ISBN 974-367-418-7

**การใช้เทคนิคโปรแกรมแบบขนานเพื่อจำลองแบบเซลล์สุริยะ
แบบคลับแซนด์วิชใน 2 มิติ**

นายเชษฐา รัตนพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ.2546
ISBN 974-367-418-7

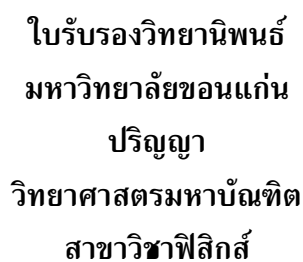
**APPLICATION OF PARALLEL PROGRAMMING TECHNIQUE
IN 2-D CLUB SANDWICH SOLAR CELL SIMULATION**

MR. CHESTA RUTTANAPUN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN PHYSICS
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY**

2003

ISBN 974-367-418-7



สำเร็จการศึกษาเมื่อวันที่.....

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

เชษฐา รัตนพันธ์. 2546. การใช้เทคนิคโปรแกรมแบบขนานเพื่อจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์
ใน 2 มิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยขอนแก่น. [ISBN 974-367-418-7]

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง,

ผศ. บำรุง สมสวัสดิ์,

ผศ. สยาม ชูถิ่น

บทคัดย่อ

ได้พัฒนาโปรแกรมแบบขนานสำหรับจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์ใน 2 มิติ คำนวณบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน (Network of Workstation) ที่ใช้ซอฟต์แวร์ประสานการทำงาน PVM (Parallel Virtual Machine) โดยพัฒนาอัลกอริธึมแบบขนาน 3 วิธี คือ 1) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวดิ่ง 2) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวนอน และ 3) การแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วนจากดัชนีเดียว เพื่อเปรียบเทียบหาอัลกอริธึมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ได้จำลองแบบเพื่อหาผลเฉลี่ยของชุดสมการสถานะ ซึ่งมี สมการปัวส์ซง สมการความหนาแน่นกระแส และ สมการความต่อเนื่อง โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลขของไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference) แบ่งกริดบนโดเมนแบบตารางสี่เหลี่ยมและแบบไฟไนต์บ็อก (Finite Box) โปรแกรมแบบขนานถูกพัฒนาโดยใช้เทคนิค Master-Slave model ที่แยกโปรแกรมเป็น 2 ส่วน คือโปรแกรมแม่ (Master Program) และโปรแกรมลูก (Worker Program) ที่มีลักษณะการทำงานแบบ Single Instruction Multiple Data (SIMD) และพัฒนาโปรแกรมแบบลำดับเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบบขนานด้วย

ได้ทดสอบความสามารถของอัลกอริธึมแบบขนาน บนแบบจำลองเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์ใน 2 มิติ ขนาด 40×100 ไมครอน มีรอยต่อ 2 จังก์ชัน มีกริดบนโดเมน 536600 จุดกริด วนทำซ้ำคำนวณบนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก 100 รอบ โดยใช้คอมพิวเตอร์เครื่องลูกจำนวน 2-16 เครื่อง ผลปรากฏว่าอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วนจากดัชนีเดียว มีสปีดอัป(speed-up) สูงสุด คือ 8.5 ส่วนอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวดิ่ง และอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวนอน มีสปีดอัปเป็น 5.5 และ 8.0 ตามลำดับ

ได้ทดสอบความถูกต้องโปรแกรมแบบขนาน โดยเปรียบเทียบผลการจำลองแบบโปรแกรมแบบขนานของอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วนจากดัชนีเดียว กับโปรแกรมแบบลำดับ บนแบบจำลองของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์ใน 2 มิติ ขนาด 2×10 ไมครอน มีรอยต่อ 2 จังก์ชัน ใช้ความหนาแน่นของโดเนอร์ $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ และ ความหนาแน่นของแอคเซปเตอร์ $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ กริดบนโดเมน 16027 จุดกริด ให้ศักย์ไฟฟ้าไบแอส -0.25, -0.125, 0.0, 0.125, 0.25 และ 0.5 V ตามลำดับ ผลปรากฏว่าทั้ง 2 โปรแกรมให้ ค่าศักย์ไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของพาหะ และค่าความหนาแน่นกระแส ใกล้เคียงกัน ทั้ง 2 โปรแกรมไม่สามารถทำงานจนถึงเงื่อนไขการลู่เข้า โปรแกรมแบบลำดับใช้เวลามากกว่า 10 วันสามารถลดค่ามากที่สุด dn/dt และ dp/dt จาก 10^{22} เหลือ $10^{18} \text{ (cm}^{-3}/\text{second)}$ แต่โปรแกรมแบบขนานใช้เวลาการจำลองแบบ 3 วัน สามารถลดค่า มากที่สุด dn/dt และ dp/dt จาก 10^{22} เหลือ $10^{16} \text{ (cm}^{-3}/\text{second)}$ และทั้ง 2 โปรแกรมสามารถแสดงลักษณะของ J-V curve ของเซลล์สุริยะในที่มืดได้ถูกต้อง และมีลักษณะของกราฟแบบเดียวกัน แสดงว่าโปรแกรมแบบขนานที่พัฒนาขึ้นสำหรับจำลองแบบเซลล์สุริยะคลับแซนดิวซ์ใน 2 มิติ มีความถูกต้อง และใช้เวลาในการจำลองแบบน้อยกว่าโปรแกรมแบบลำดับ

Chesta Ruttanapun. 2003. **Application of Parallel Programming Technique in 2-D Club Sandwich Solar Cell Simulation**. Master of Science Thesis in Physics, Graduate School, Khon Kaen University. [ISBN 974-367-418-7]

Thesis Advisory Committee : Asst.Prof.Dr. Vittaya Amornkitbamrung,
Asst.Prof. Bamrung Somsawaddi,
Asst.Prof. Siam Chootin

Abstract

Parallel programming scheme was developed for Club Sandwich solar cell simulation in 2-D. This involves paralleling of computers in a Network of Workstations. A Parallel Virtual Machine (PVM) was used for interfacing Network of Workstations to form a single virtual machine. A parallel algorithm was developed using 3 approaches which are 1) domain decomposition of area problem by column, 2) domain decomposition of area problem by row and 3) domain decomposition using single indexing. These approaches were tested and the performance of each would save for selecting the best algorithm. State equations which consist of Poisson's equation, current density equation and continuity equation were solved by numerical technique of the finite difference method. The processes involve discretization domain by rectangular grid and Finite Box grid. The parallel program was developed by Master-Slave model which used 2 separated parts, i.e. master program and worker program. The worker program was run using Single Instruction Multiple Data (SIMD) technique. A sequential program was developed to test the correctness of the parallel program.

The testing performance of parallel algorithms was carried out on a model of Club Sandwich solar cell in 2-D. The cell size is 40×100 microns and includes 2 junctions. The domain was discretized as 536600 grid points. The calculation was iterated 100 times on the worker nodes. The worker nodes used were of 2-16 nodes. The result shows that algorithm of the domain decomposition using single indexing yields the highest "speed-up", 8.5. But for algorithms of the domain decomposition

of area problem by column and algorithm of the domain decomposition of area problem by row the speed-up is only 5.5 and 8.0 respectively.

The testing of the correctness of the parallel program using the algorithm of the domain decomposition using single indexing to simulate the solar cell is then compared with the result of the sequential program. The model of the 2-D cell used includes 2 junctions. The cell size is 2×10 microns. Donor concentration of $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and acceptor concentration of $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ were used. The domain of cell contains 16027 grid points. Biased voltages for simulation were -0.25, -0.125, 0.0, 0.125, 0.25 and 0.5 V respectively. The result shows that both parallel program and sequential program produce the same resultant data on voltage, carrier concentration and current density. Both programs couldn't reach convergence condition, however. The sequential program used more than 10 days simulation time and it could reduce the maximum of dn/dt and dp/dt from 10^{22} to $10^{18} \text{ cm}^{-3}/\text{second}$. But the parallel program used only 3 days simulation time and it could decrease the maximum of dn/dt and dp/dt which from 10^{22} to $10^{16} \text{ cm}^{-3}/\text{second}$. These programs show the same correct of J-V curve for solar cell in the dark. The parallel program developed for simulation club sandwich solar cell is more accurate and use less simulation time than the sequential program.

งานวิทยานิพนธ์นี้มอบส่วนดีให้บุพการีและคณาจารย์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “แบบจำลองการทำงานเซลล์สุริยะแบบคลับแซนวิชใน 2 มิติ” ซึ่งได้รับความสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.)

ขอขอบคุณ ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ และ รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการพัฒนาโปรแกรมจำลองแบบ และพฤติกรรมของพาหะในเซลล์สุริยะ และคำปรึกษาเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องในโปรแกรมจำลองแบบ

ขอขอบคุณ ผศ. บำรุง สมสวัสดิ์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการพัฒนาอัลกอริธึมแบบขนาน และโปรแกรมแบบขนานสำหรับการเขียนโปรแกรมจำลองแบบ และให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้เครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบขนาน

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของพาหะในสารกึ่งตัวนำและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์, การค้นคว้าข้อมูล, คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ผศ. สยาม ชูถิ่น ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนงบประมาณเป็นกรณีพิเศษในการจัดหาคอมพิวเตอร์จำนวน 16 เครื่อง เพื่อจัดตั้งเป็นเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์

เชษฐา รัตนพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
คำอุทิศ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญภาพ	ณ
รายการสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 เซลล์สุริยะ	4
2.1 ฟิสิกส์ของเซลล์สุริยะ	4
2.2 เซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แซนดวิช	6
2.3 ชุดสมการสถานะ	7
2.3.1 สมการปัวซอง	7
2.3.2 สมการความหนาแน่นกระแส	8
2.3.3 สมการความต่อเนื่อง	9
2.4 Current-Voltage Characteristic ของเซลล์สุริยะ	11
บทที่ 3 วิธีการเชิงตัวเลข	14
3.1 Domain Discretization	15
3.1.1 กริดแบบตารางสี่เหลี่ยม	15
3.1.2 กริดแบบไฟไนต์บล็อก	17
3.2 การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์	18
3.2.1 การนอร์มไลซ์สมการสถานะ	19
3.2.2 การปรับสมการสถานะ	20
3.2.3 การดิสครีไทซ์สมการสถานะ	22
3.2.3.1 การดิสครีไทซ์สมการปัวซอง	22
3.2.3.2 การดิสครีไทซ์ตามวิธีของGummel	24
3.2.3.3 การดิสครีไทซ์สมการความหนาแน่นกระแส	26
3.2.3.4 การคำนวณค่าโมบิลิตีสำหรับซิลิคอน	28
3.2.3.5 การดิสครีไทซ์สมการความต่อเนื่อง	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3.6 ชั้นเวลา	31
3.2.3.7 อัตราการรวมตัว	31
3.3 การแก้ระบบสมการ	32
3.3.1 เงื่อนไขขอบเขต	32
3.3.2 การแก้ระบบสมการด้วยการวนทำซ้ำ	34
3.3.2.1 การวนทำซ้ำตามวิธีของ Jacobi	35
3.3.2.2 การวนทำซ้ำตามวิธีของ Gummel	35
3.3.2.3 การปรับเปลี่ยนวิธีของ Gummel	36
บทที่ 4 การคำนวณแบบขนาน	37
4.1 เครื่องข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน	38
4.2 Parallel Virtual Machine	39
4.3 การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์	40
4.4 การแบ่งข้อมูล	41
4.5 การติดต่อสื่อสาร	44
4.5.1 การส่งข้อมูลระหว่างเครื่อง	44
4.5.2 วิธีการส่งและรับข้อมูล	48
4.5.2.1 อัลกอริธึมการรับส่งข้อมูลโดยการเข้าจังหวะ	52
4.5.2.2 อัลกอริธึมการป้องกันการตายของข้อมูล	56
4.6 วิธีการวัดประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน	60
บทที่ 5 การพัฒนาอัลกอริธึมแบบขนานและโปรแกรมแบบขนาน	61
5.1 โมเดลของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์	61
5.2 การพัฒนาโปรแกรม	62
5.2.1 โปรแกรมสร้างกริด	62
5.2.2 โปรแกรมให้ค่าความหนาแน่นพาหะ	65
5.2.3 โปรแกรมจำลองแบบ	67
5.3 โปรแกรมแบบลำดับ	67
5.4 โปรแกรมแบบขนาน	69
5.4.1 การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้ง	69
5.4.2 การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอน	74
5.4.3 การแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนี	82
5.4.4 ส่วนการคำนวณ	87
บทที่ 6 ประสิทธิภาพของโปรแกรมแบบขนาน	91
6.1 การทดสอบอัลกอริธึมแบบขนาน	92
6.2 ผลการทดสอบอัลกอริธึมแบบขนาน	93
6.2.1 การทดสอบการแบ่งจำนวนกริดสำหรับแต่ละเครื่องลูก	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.2 การทดสอบเวลาของการจำลองแบบ	94
6.2.3 สปีดอัป	96
6.3 สรุปผลการทดสอบอัลกอริทึมแบบขนาน	96
6.4 การค้นหาพารามิเตอร์เบื้องต้นในการทดสอบโปรแกรมแบบขนาน	97
6.5 เงื่อนไขเริ่มต้น เงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขการลู่เข้า	98
6.5.1 ค่าเริ่มต้นของ doping profile	98
6.5.2 ค่าเริ่มต้นของศักย์ไฟฟ้า	98
6.5.3 ค่าเงื่อนไขตรวจสอบการลู่เข้า	99
6.6 ผลการทดสอบโปรแกรมแบบขนาน	102
6.6.1 ผลการจำลองแบบจากการ bias voltage 0.0 V	102
6.7 J-V Characteristic Curve	113
6.8 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองแบบกับโครงสร้างกริด	114
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ	117
เอกสารอ้างอิง	119
ภาคผนวก	122
ภาคผนวก ก. การตีสคริปต์โปรแกรมจำลองแบบตามเทคนิคของ Gummel	123
ภาคผนวก ข. การตีสคริปต์โปรแกรมความหนาแน่นกระแส	129
ภาคผนวก ค. การตีสคริปต์โปรแกรมความต่อเนื่อง	137
ภาคผนวก ง. ค่าของตัวแปรในการจำลองแบบสำหรับ Si	147
ภาคผนวก จ. ประเภทของกริด	149
ประวัติผู้เขียน	155

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	การทำงานของเซลล์สุริยะ เมื่อมีแสงตกกระทบบเซลล์ทำให้เกิด อิเลคตรอนและโฮลอิสระ และเมื่อเคลื่อนที่ครบวงจร โดยอิเลคตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบและโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น	4
รูปที่ 2.2	โครงสร้างแบบ Tandem cell [33] มี 3 รอยต่อ p-n ที่ทำจาก amorphous silicon alloy ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 12.8 % ภายใต้สภาวะแสงที่ปกติ โดยรอยต่อแรก ในชั้น i ใช้ a-Si alloy มีช่องว่างพลังงาน 1.8 eV เพื่อตอบสนองแสงสีน้ำเงิน รอยต่อที่สอง ในชั้น i ใช้ a-SiGe alloy (มี Ge 15 %) มีช่องว่างพลังงาน 1.6 eV เพื่อตอบสนองแสงสีเขียว และ รอยต่อที่สาม ในชั้น i ใช้ a-SiGe alloy (มี Ge 40-50 %) มีช่องว่างพลังงาน 1.4 eV เพื่อตอบสนองแสงสีแดง และ infrared	6
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ใน 3 มิติ	7
รูปที่ 2.4	การอนุรักษ์ของอนุภาคที่มีประจุในปริมาตร Adx	10
รูปที่ 2.5	J-V characteristics สำหรับเซลล์สุริยะ อยู่ในที่มีด และอยู่ในที่มีแสงตกกระทบบ	12
รูปที่ 3.1	(ก) โครงสร้างของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ใน 3 มิติ ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตาม แกน Z (ข) ภาคตัดขวางในแกน X และ Y ของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์สำหรับการจำลองแบบ	14
รูปที่ 3.2	กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมสำหรับการหาผลเฉลี่ยในวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ที่ต้องใช้ 4 จุดกริดรอบข้าง ($\Psi_{i-1,j}$ $\Psi_{i+1,j}$ $\Psi_{i,j-1}$ $\Psi_{i,j+1}$) ในการหาผลเฉลี่ย ณ จุดที่พิจารณา ($\Psi_{i,j}$)	16
รูปที่ 3.3	(ก) ลักษณะของไฟไนต์บ็อกซึ่งมีเส้นสิ้นสุดในบ็อกเพียงเส้นเดียวและใช้ 6 จุดกริดและ 5 เพื่อนบ้านในการหาผลเฉลี่ย (ข) เป็นลักษณะที่ผิดของไฟไนต์บ็อกตามเทคนิคของ Franz เพราะมีเส้นสิ้นสุด มากกว่า 1 เส้น ภายใน 1 ตารางสี่เหลี่ยม	17
รูปที่ 3.4	แสดงการใช้กริดแบบไฟไนต์บ็อก ร่วมกับกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมเพื่อปรับขนาดกริดใหญ่ลงเป็นกริดขนาดเล็ก (ที่บริเวณสี่เท่าคือ กริดแบบไฟไนต์บ็อก)	18
รูปที่ 3.5	กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมที่ไม่สมมาตร โดยที่จุด K เป็นจุดที่หาผลเฉลี่ยของความหนาแน่นกระแสซึ่งต้องอาศัย เพื่อนบ้าน N, E, S และ W ในการคำนวณ	26
รูปที่ 3.6	การไหลเข้าและออกจากจุดที่ต้องการหาผลเฉลี่ย (จุด K) ของสมการความต่อเนื่อง	30
รูปที่ 3.7	เงื่อนไขขอบเขตของอุปกรณ์ รอยต่อ p-n	33
รูปที่ 3.8	การแก้สมการระบบด้วยวิธีการวนซ้ำ	34
รูปที่ 4.1	เครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบขนานประเภทหลายโพรเซสเซอร์ใช้หน่วยความจำแยก	39
รูปที่ 4.2	การทำงานของสภาพแวดล้อมของPVM ที่ใช้ daemon ในการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องเพื่อสร้างสภาพแวดล้อมให้เป็นเสมือนเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์เครื่องเดียวและโปรแกรมประยุกต์จะ ทำงานบน daemon ซึ่งทำงานสนับสนุนอยู่ด้านหลัง	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 การแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนๆ แล้วกระจายไปให้หลายเครื่องคอมพิวเตอร์ทำการคำนวณ พร้อมกัน ในการหาผลเฉลี่ยของสมการปัวส์ซง	42
รูปที่ 4.4 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนๆตามพื้นที่แบบบล็อก (blocks) และแบบสตริบ (strips) และแบบสตริบ (strips)	43
รูปที่ 4.5 การเตรียมข้อมูลที่ขอบสำหรับแลกเปลี่ยนกันระหว่างเครื่อง โดยแบบบล็อกมีข้อมูลที่ต้อง ส่งกัน 4 ด้าน ส่วนแบบสตริบ มีข้อมูลที่ต้องส่ง 2 ด้าน	43
รูปที่ 4.6 กริดของโดเมนปัญหาแบบไฟไนต์เฟอเรนซ์ ที่ต้องใช้กริด 5 จุดกริด (เป็นเพื่อน บ้าน 4 จุด) ในการหาผลเฉลี่ย	45
รูปที่ 4.7 การส่งข้อมูลให้กันระหว่างเครื่อง เพื่อส่งข้อมูลไปให้เครื่องอื่นเนื่องจากข้อมูลบางส่วนมี ไม่ครบที่จะคำนวณได้	46
รูปที่ 4.8 การส่งข้อมูลที่ขอบของแต่ละเครื่อง โดยแต่ละเครื่องต้องเตรียมข้อมูลที่ขอบสำหรับเครื่อง อื่นก่อน แล้วจากนั้นก็ส่งข้อมูลไปให้เครื่องที่ต้องการข้อมูล โดยต้องเตรียมหน่วยความ จำสำหรับเก็บข้อมูลที่รับมาเรียกว่า จุดผี (ghost point)	47
รูปที่ 4.9 การส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง คอมพิวเตอร์เครื่อง A ทำการส่งข้อ มูล โดยใช้ คำสั่ง pvm_send() จากนั้นข้อมูลถูกห่อด้วยโปรโตคอล TCP/IP เพื่อส่งไป ยังคอมพิวเตอร์ปลายทาง เมื่อถึงปลายทาง คอมพิวเตอร์เครื่อง B ประมวลคำสั่ง pvm_recv() เพื่อรับข้อมูลจากบัฟเฟอร์ข้อมูลและแกะเอาข้อมูลออกมา	48
รูปที่ 4.10 คอมพิวเตอร์เครื่อง A ประมวลผลคำสั่ง pvm_send 2 ครั้ง เพื่อส่งข้อมูล data1 และ data2 ไปยังคอมพิวเตอร์เครื่อง B โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูลก่อน จากนั้น คอมพิวเตอร์เครื่อง B จะประมวลคำสั่ง pvm_recv ครั้งที่ 1 เพื่อรับข้อมูลจากบัฟเฟอร์ มาเก็บในตัวแปร data1 จากนั้นจึงประมวลผลคำสั่ง pvm_recv ครั้งที่ 2 เพื่อรับข้อมูล จากบัฟเฟอร์ มาเก็บในตัวแปร data2	49
รูปที่ 4.11 การทำงานของคอมพิวเตอร์เครื่อง B ที่ประมวลผลคำสั่ง pvm_recv() สลับการทำงาน ในรูปที่ 4.10 เพื่อรับข้อมูลมาจากบัฟเฟอร์ข้อมูล	50
รูปที่ 4.12 การทำงานของโปรแกรมระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องที่ส่งข้อมูลกับเครื่องที่รับข้อมูล	51
รูปที่ 4.13 แสดงการเข้าจังหวะส่งและรับสิ่งของทั้ง 5 คน ทุกคนทำการส่งสิ่งของและรับสิ่งของ โดยใช้การเข้าจังหวะดังนี้คือ จังหวะที่ 1 ทุกคนส่งสิ่งของที่อยู่ในมือไปให้คนที่อยู่ด้าน ซ้าย โดยเอาสิ่งของวางไว้ในกล่อง แล้วจากนั้นทำจังหวะที่ 2 ทุกคนเก็บสิ่งของจาก กล่องที่อยู่ด้านขวาตัวเอง ยกเว้นคนที่อยู่หัวกับท้ายแถวที่อาจจะมีการส่งและรับไม่ ครบทุกจังหวะ เช่นคน ที่ 1 จะไม่ต้องรับสิ่งของและคนที่ 5 ไม่ต้องส่งสิ่งของ	53
รูปที่ 4.14 วิธีการรับและส่งโดยการเข้าจังหวะ ของคอมพิวเตอร์ 4 เครื่อง ทุกเครื่องมี ขั้นตอนการ ทำงาน 4 จังหวะ ยกเว้นคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 1 ไม่ต้องทำจังหวะที่ 1 และ 4 และ คอมพิวเตอร์เครื่องที่ 4 ไม่ต้องทำจังหวะที่ 2 และ 3 โดยใช้ Send() เพื่อแทนคำสั่ง pvm_send() และใช้ Receive() เพื่อแทนคำสั่ง pvm_recv()	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 แสดงการเข้าจังหวะส่งและรับสิ่งของโดยมี 5 คนเรียงแถวหน้ากระดาน มี 3 คนใส่เสื้อสีดำ อีก 2 คนใส่เสื้อสีขาว มีจังหวะการทำงานคือ คนใส่เสื้อสีขาวจะส่งข้อมูล และคนใส่เสื้อสีดำรอรับข้อมูล	56
รูปที่ 4.16 แสดงการเข้าจังหวะส่งและรับสิ่งของโดยมี 5 คนเรียงแถวหน้ากระดาน มี 3 คนใส่เสื้อสีดำ อีก 2 คนใส่เสื้อสีขาว มีจังหวะการทำงานคือ คนใส่เสื้อสีดำจะส่งข้อมูล และคนใส่เสื้อสีขาวรอรับข้อมูล	57
รูปที่ 4.17 การเข้าจังหวะส่งและรับของคอมพิวเตอร์ในเครือข่าย โดยการใช้การสลับจังหวะส่งข้อมูล และรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์โหนดคู่และคอมพิวเตอร์โหนดคี่ มีจังหวะการทำงานทั้งหมด 8 จังหวะ	58
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของโมเดลเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิชสำหรับการจำลองแบบ	61
รูปที่ 5.2 พารามิเตอร์ในไฟล์ Device Specification File เพื่อใช้ในการสร้างกริดของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิช (ก)เป็นพารามิเตอร์ที่บอกขนาดของอุปกรณ์ (ข)เป็นพารามิเตอร์ที่บอกขนาดและตำแหน่งของกริด	64
รูปที่ 5.3 การใช้ดัชนีเดี่ยว (single indexing) ในการอ้างอิงจุดกริด ที่ใช้ตัวเลขกำกับจุดกริดเรียงลำดับกริดจากจุดแรกจนถึงจุดสุดท้ายตามแถวในแนวนอน	65
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในไฟล์ Doping Specification File กับโครงสร้างของเซลล์	66
รูปที่ 5.6 การทำงานของโปรแกรมจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิช	68
รูปที่ 5.7 โครงสร้างของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิช ซึ่งมีดัชนีกำกับกริดทุกจุด ได้จากโปรแกรมสร้างกริด	70
รูปที่ 5.8 การแบ่งโดเมนโดยใช้เส้นกริดหลักในแนวตั้งเพื่อแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนๆ (ในที่นี้สมมุติว่าคอมพิวเตอร์เครื่องลูกอยู่สี่เครื่อง)	70
รูปที่ 5.9 โดเมนถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ ตามพื้นที่	71
รูปที่ 5.10 ข้อมูลกริดที่ขอบของแต่ละพื้นที่ ถูกหาโดยการหาข้อมูลขอบด้านซ้ายและขอบด้านขวา โดยแสดงด้วยเส้นทึบสีดำ	71
รูปที่ 5.11 ดัชนีของแต่ละพื้นที่ถูกเรียงใหม่เพื่อใช้ในการอ้างอิงในการคำนวณด้วยวิธีวนซ้ำ	72
รูปที่ 5.12 วิธีการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ขอบ ใช้วิธีของวิธีป้องกันการตายของข้อมูล โดยการสลับจังหวะการส่งไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องด้านซ้ายและคอมพิวเตอร์เครื่องด้านขวา และรับข้อมูลจาก คอมพิวเตอร์เครื่องด้านซ้ายและคอมพิวเตอร์เครื่องด้านขวา ระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องคู่และ คอมพิวเตอร์เครื่องคี่ (ก)แสดงการทำงานของกริดรับส่งข้อมูลที่ขอบของวิธีป้องกันการตายของข้อมูล (ข) แสดงโค้ดของโปรแกรมการทำงาน สลับกันระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องคู่กับคอมพิวเตอร์เครื่องคี่	73
รูปที่ 5.13 โดเมนถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ โดยใช้เส้นกริดขนาดเล็กในแนวนอนเพื่อแบ่งพื้นที่ของโดเมน (ในที่นี้สมมุติว่าเครื่องลูกอยู่สี่เครื่อง)	74
รูปที่ 5.14 พื้นที่ของโดเมนถูกแยกออกเป็นส่วนๆ	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.15 ข้อมูลกริดที่ขอบของแต่ละพื้นที่ ถูกหาโดยการหาข้อมูลขอบด้านบนและขอบด้านซ้าย โดยแสดงด้วยเส้นทึบสีดำ	75
รูปที่ 5.16 วิธีการหากริดที่อยู่ขอบบนและกริดที่อยู่ขอบล่าง	76
รูปที่ 5.17 พื้นที่แต่ละส่วนยังใช้ดัชนีเดิม	76
รูปที่ 5.18 โครงสร้างของหน่วยความจำที่ออกแบบให้มีพื้นที่ 3 ส่วนสำหรับเครื่องลูก แต่ละเครื่องในการรับข้อมูลขอบจากด้านบนและจากขอบด้านล่างของเครื่องลูกที่อยู่ด้านล่างและด้านบน ตามลำดับ	77
รูปที่ 5.19 ชื่อกำกับของดัชนีที่เก็บในหน่วยความจำ	77
รูปที่ 5.20 วิธี safety deadlock ในการรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูก โดยที่จังหวะที่1 คือ คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่งข้อมูลขอบบนไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ที่อยู่ด้านบนทำการรับข้อมูล จังหวะที่2 คือ คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่งข้อมูลขอบล่างไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ที่อยู่ด้านล่างทำการรับข้อมูล จังหวะที่3 คือ คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่งข้อมูลขอบล่างไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ที่อยู่ด้านล่างทำการรับข้อมูล จังหวะที่4 คือ คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่งข้อมูลขอบบนไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ที่อยู่ด้านบนทำการรับข้อมูล	79
รูปที่ 5.21 การเข้าจังหวะของคอมพิวเตอร์เครื่องคู่ตามวิธีป้องกันการตายของข้อมูล	80
รูปที่ 5.22 การเข้าจังหวะของคอมพิวเตอร์เครื่องคู่ตามวิธีป้องกันการตายของข้อมูล	80
รูปที่ 5.23 ตัวอย่างการอ้างอิงดัชนีในการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ขอบด้วยวิธีป้องกันการตายของข้อมูล	81
รูปที่ 5.24 การแบ่งจำนวนกริดออกเป็นส่วน ๆ โดยการหารจำนวนกริดทั้งหมดด้วยจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก (ในที่นี้สมมุติว่าเครื่องลูกอยู่สี่เครื่อง) โดยแต่ละสี่คือข้อมูลแต่ละส่วนที่จะถูกแยกสำหรับแต่ละเครื่องลูก และดัชนีต้องยังคงเรียงกันเหมือนเดิม	82
รูปที่ 5.25 ข้อมูลถูกแยกออกเป็นส่วน ๆ	83
รูปที่ 5.26 หาข้อมูลกริดที่อยู่ขอบบน และขอบล่าง	83
รูปที่ 5.27 วิธีการหาข้อมูลกริดที่อยู่ขอบบนและขอบล่าง	84
รูปที่ 5.28 ดัชนีของกริดยังคงเรียงกันเหมือนเดิม	84
รูปที่ 5.29 ชื่อที่กำกับดัชนีในหน่วยความจำที่ออกแบบ	85
รูปที่ 5.30 การแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ขอบโดยใช้วิธีป้องกันการตายของข้อมูล โดยมีการสลับการรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์โหนดคู่และคอมพิวเตอร์โหนดคี่ ในลักษณะที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.4.2	86
รูปที่ 5.31 โค้ดเทียมแสดงการทำงานระหว่างโปรแกรมแม่กับโปรแกรมลูกโดยมีการส่งข้อมูลให้กันระหว่างเครื่องแม่กับเครื่องลูก และ เครื่องลูกกับเครื่องลูก	88
รูปที่ 5.32 การทำงานของโปรแกรมลูก โดยส่วนการสื่อสาร กับส่วนการคำนวณอยู่ในรูปการซ้ำ	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.33 การทำงานของส่วนการคำนวณในโปรแกรมลูก	90
รูปที่ 6.1 เครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานที่ได้จัดตั้งขึ้นที่ห้องปฏิบัติการ ในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (โดยคอมพิวเตอร์เครื่องลูกเป็นรูปจริงในห้องปฏิบัติการส่วนคอมพิวเตอร์เครื่องแม่เป็นรูปสมมติเพื่อให้เกิดความเข้าใจ)	91
รูปที่ 6.2 โดเมนสำหรับการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ใน 2 มิติซึ่งมีจุดกริดทั้งหมด 536,660 จุดกริด	92
รูปที่ 6.3 จำนวนกริดของคอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องได้รับ ของแต่ละอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูล สำหรับจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกจำนวน 16 เครื่อง	94
รูปที่ 6.4 เวลาการรันของโปรแกรมแบบขนานของแต่ละโปรแกรม โดยการรันบนคอมพิวเตอร์แบบขนานที่ใช้จำนวนเครื่องจาก 2 - 16 เครื่อง	95
รูปที่ 6.5 speed-up ของโปรแกรมแบบขนานทั้ง 3 อัลกอริธึม	96
รูปที่ 6.6 โมเดลที่ใช้ในการจำลองแบบของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์	97
รูปที่ 6.7 กริดแบบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์กับไฟไนต์บล็อกที่สร้างบนโดเมน ซึ่งมีจุดกริดทั้งหมด 16027 จุดกริด	98
รูปที่ 6.8 ค่าเริ่มต้นของ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n) และ ความหนาแน่นของโดเนอร์ (n_D) ใน หน่วย(atom/cm^3) (ก) Doping profile ของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสำหรับการจำลองแบบ (ข) ความหนาแน่นในแกน X (ค) ความหนาแน่นในแกน Y	100
รูปที่ 6.9 ค่าเริ่มต้นของ ความหนาแน่นของโฮล (p) และ ความหนาแน่นของแอคเซ็ปเตอร์ (p_D) ในหน่วย (atom/cm^3) (ก) Doping profile ของความหนาแน่นสำหรับการจำลองแบบ (ข) ความหนาแน่นในแกน X (ค) ความหนาแน่น ในแกน Y	101
รูปที่ 6.10 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบแอส 0.0 V (ก) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมแบบขนาน	103
รูปที่ 6.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าในรูปที่ 6.10 แกน X (ก) ค่าศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรมแบบขนาน	104
รูปที่ 6.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าในรูปที่ 6.10 แกน Y (ก) ค่าศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรมแบบขนาน	105
รูปที่ 6.13 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ไบแอส 0.0 V (ก) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ได้จากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ได้จากโปรแกรมแบบขนาน	106
รูปที่ 6.14 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในรูปที่ 6.13 แกน X (ก) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากโปรแกรมแบบขนาน	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.15 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในรูปที่ 6.13 แกน Y (ก) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากโปรแกรมแบบขนาน	108
รูปที่ 6.16 ค่าความหนาแน่นของโฮลที่ไบแอส 0.0 V (ก) ค่าความหนาแน่นของโฮลที่ได้จากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของโฮลที่ได้จากโปรแกรมแบบขนาน	109
รูปที่ 6.17 ค่าความหนาแน่นของโฮลในรูปที่ 6.16 แกน X (ก) ค่าความหนาแน่นของโฮลจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของโฮลจากโปรแกรมแบบขนาน	110
รูปที่ 6.18 ค่าความหนาแน่นของโฮลในรูปที่ 6.16 แกน Y (ก) ค่าความหนาแน่นของโฮลจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของโฮลจากโปรแกรมแบบขนาน	111
รูปที่ 6.19 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ไบแอส 0.0 V (ก) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก โปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมแบบขนาน	112
รูปที่ 6.20 J-V characteristic ของโปรแกรมแบบลำดับและโปรแกรมแบบขนาน	113
รูปที่ 6.21 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าศักย์ไฟฟ้า ที่ไบแอส 0.0 V กับโครงสร้างกริด	114
รูปที่ 6.22 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J/cm^2) ที่ไบแอส 0.0 V กับ โครงสร้างกริด	115
รูปที่ 6.23 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (cm^{-3}) ที่ไบแอส 0.125 V กับ โครงสร้างกริด	115
รูปที่ 6.24 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าความหนาแน่นของโฮล (cm^{-3}) ที่ไบแอส 0.125 V กับ โครงสร้างกริด	116

รายการสัญลักษณ์

ρ	คือ ความหนาแน่นของประจุสุทธิ (C/cm^{-3})
q	คือ ขนาดของประจุไฟฟ้ามูลฐาน (C)
N	คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (cm^{-3})
p	คือ ความหนาแน่นของโฮล (cm^{-3})
n_o	คือ ความหนาแน่นของโดเนอร์ (cm^{-3})
p_o	คือ ความหนาแน่นของแอกเซปเตอร์ (cm^{-3})
ψ	คือ ศักย์ไฟฟ้า (V)
$\mathcal{E}$	คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของวัสดุ (F/cm)
J_n, J_p	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเนื่องจาก อิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ (A/cm^2)
μ_n, μ_p	คือ ค่าโมบิลิตีของ อิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ ($cm^2/V s$)
D_n, D_p	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ อิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ (cm^2/s)
$J_{particle}$	คือ ความหนาแน่นกระแสของอนุภาค(จำนวนพาหะที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด)
G	คือ อัตราการเกิดของอนุภาคต่อปริมาตร ($cm^{-3}s^{-1}$)
R	คือ อัตราการการรวมตัวของอนุภาคต่อปริมาตร ($cm^{-3}s^{-1}$)
J	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์ (A/cm^2)
J_o	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิมิต์ในตัวที่มีมืด (A/cm^2)
J_L	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแสงตกกระทบ(A/cm^2)
N	คือ พารามิเตอร์สำหรับรูปร่างของ J-V Characteristic
n_p	คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะข้างน้อยเมื่ออยู่ด้าน p
p_n	คือ ความหนาแน่นของโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยเมื่ออยู่ด้าน n
L_n, L_p	คือ ระยะแพร่ซึมของ อิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ (cm)
η	คือ ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ (%)
P_{max}	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์สุริยะ
P_{in}	คือ กำลังของแสงที่ตกบนเซลล์
L_D	คือ ความยาวของเดอบาย (cm)
n_i	คือ ค่าความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})
kT/q	คือ ศักย์ของโบลต์ซมันน์ (V)
kT	คือ พลังงานความร้อน (eV)
k	คือ ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (J/K)
T	คือ อุณหภูมิ (K)
ψ_{exact}	คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง
δ	คือ ค่าความผิดพลาดจากการคำนวณ
$m+1$	คือ รอบการคำนวณในรอบปัจจุบัน

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

m	คือ รอบการคำนวณในรอบครั้งก่อน
ψ_K	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่หาผลเฉลย
$\psi_N, \psi_S, \psi_E, \psi_W$	คือ ศักย์ไฟฟ้าที่อยู่โดยรอบทั้ง 4 ทิศ (เหนือ ตะวันออก ตะวันตก และ ใต้)
h_N, h_S, h_E, h_W	คือ ระยะห่างจากเพื่อนบ้านที่อยู่โดยรอบทั้ง 4 ทิศ (เหนือ ตะวันออก ตะวันตก และ ใต้)
J_{ij}	คือ ค่าความหนาแน่นกระแส ที่ไหลจากจุด i ไป จุด j
J_{NK}	คือ ความหนาแน่นกระแสไหลจากทิศเหนือเข้ามาจุด K
J_{WK}	คือ ความหนาแน่นกระแสไหลจากทิศตะวันตกเข้ามาจุด K
J_{KE}	คือ ความหนาแน่นกระแสไหลจากจุด K ไปยังทิศตะวันออก
J_{KS}	คือ ความหนาแน่นกระแสไหลจากจุด K ไปยังทิศใต้
$B(x)$	คือ Bernoulli function
φ_p, φ_n	คือ ค่าศักย์ควอซีเฟอร์มีของโฮล และ อิเล็กตรอน ตามลำดับ V
ϕ_p, ϕ_n	คือ ค่าตัวแปรสล็อตของโฮล และ อิเล็กตรอน ตามลำดับ
μ_{ij}	คือ ค่า carrier mobilities ที่คิดที่จุดกึ่งกลางระหว่างจุด i และ j
h_i	คือ ระยะห่างระหว่างจุด k และ จุด i
τ	คือ carrier life time
$\vec{\eta}$	คือ unit vector ที่ตั้งฉากกับขอบขอบฉนวน
V_k^m	คือ ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้
ψ_K^m	คือ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้ในรอบก่อน
ψ_K^{m+1}	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้ในรอบปัจจุบัน
V_K^m	คือ ผลต่างของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน(โฮล)ที่คำนวณได้
n_K^m, p_K^m	คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮล ที่คำนวณได้ในรอบก่อน
n_K^{m+1}, p_K^{m+1}	คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮล ที่คำนวณได้ในรอบปัจจุบัน
δ_K^{m+1}	คือ ค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้
ω	คือ เฟดเตอร์ที่คูณเข้าไปในวิธี SOR
S_p	คือ speed-up ของคอมพิวเตอร์แบบขนานจำนวน p เครื่อง
T_p	คือ เวลาที่ได้จากการทำงานของโปรแกรมแบบขนานที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์แบบขนาน
T_s	คือ เวลาที่ได้จากการทำงานของโปรแกรมแบบลำดับที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

เซลล์สุริยะ (Solar cell) แบบหลายชั้นหลายจังก์ชัน (Multi-layer Multi-junction) เป็นการออกแบบที่พยายามเพิ่มประสิทธิภาพ การเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า มีลักษณะของโครงสร้างเซลล์ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด p และชนิด n สลับทับกันหลายชั้น การที่จะให้เซลล์สุริยะแบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงสุด ต้องออกแบบให้ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์ เช่น ขนาดของตัวเซลล์, จำนวนชั้น, ความหนาแต่ละชั้น, doping profile มีความเหมาะสม เพื่อประดิษฐ์เป็นตัวเซลล์ และการประดิษฐ์เซลล์ต้นแบบเพื่อค้นหาชุดพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันอย่างซับซ้อนนั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคในการค้นหาพารามิเตอร์โดยการจำลองแบบบนคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) การค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังกล่าวเป็นโครงการที่สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้ให้การสนับสนุนและให้ทุนวิจัยแก่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งมี ผศ.บำรุง สมสวัสดิ์ เป็นหัวหน้าโครงการ

จากประสบการณ์ที่ผ่านมา การจำลองแบบโดยใช้โปรแกรมที่เป็นการประมวลผลแบบลำดับขั้น (Sequential processing) บนคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว พบว่าใช้เวลานานมาก (มากกว่า 30 วัน) ในการประมวลผล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจำลองแบบให้ใช้เวลาน้อยลง จึงใช้วิธีการแบ่งงานออกเป็นส่วนๆ แล้วนำไปคำนวณบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน ซึ่งเป็นลักษณะการประมวลผลแบบขนาน (Parallel processing) การนำคอมพิวเตอร์เวิร์กสเตชันหลายเครื่องมาเชื่อมต่อกันด้วยเครือข่ายแล้วประสานการทำงานด้วยซอฟต์แวร์สนับสนุนสภาพแวดล้อมการทำงานแบบขนาน เป็นลักษณะเครือข่ายคอมพิวเตอร์ (Network of workstation) คำนวณแบบขนาน และได้พัฒนาโปรแกรมแบบขนาน (Parallel programming) สำหรับการจำลองแบบเซลล์สุริยะให้ทำงานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เซลล์สุริยะมีการพัฒนามาตั้งแต่ปลายปี 1930 [1] โดยทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (Photovoltaic conversion) โดยตรง ซึ่งเซลล์สุริยะเป็น p-n junction semiconductor diode ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำชนิด p และสารกึ่งตัวนำชนิด n มีลักษณะเป็นแบบจังก์ชันเดียว (Single junction) โครงสร้างเซลล์แบบดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าได้ไม่เกิน 14% [2] ในเซลล์สุริยะที่ทำจากซิลิคอน (Si)

เนื่องจากเซลล์สุริยะแบบ รอยต่อ p-n (p-n junction) ในลักษณะแบบจังก์ชันเดียวให้ประสิทธิภาพต่ำ จึงมีการพัฒนาเซลล์สุริยะแบบหลายชั้น (Multi-layer) ขึ้นในปี 1978 [20] โดยลักษณะเซลล์เป็น รอยต่อ p-n หลายชุดซ้อนกัน และมีขั้วไฟฟ้าด้านบนและด้านล่างของเซลล์ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลออกนอกเซลล์ผ่านจังก์ชันหลายชุดในลักษณะแบบอนุกรม ซึ่งเป็นเซลล์สุริยะแบบ Tandem ที่มีการได้สารบางชนิดเพื่อให้มีความไวต่อแสงได้หลายความยาวคลื่น ลักษณะโครงสร้างเซลล์ดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 15% [33] เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีแสงแดดปกติ (มีแสงครบทุกความยาวคลื่นตามที่เซลล์ต้องการ) แต่ถ้าเซลล์อยู่ภายใต้สภาวะที่แสงมีความยาวคลื่นไม่ครบตามที่เซลล์ต้องการจะทำให้เกิดความต้านทานภายในตัวเซลล์ขึ้น มีผลให้

ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำลงมาก และในการใช้งานจริงเซลล์มักจะอยู่ภายใต้แสงที่มีสภาวะไม่ปกติ จึงไม่เหมาะในการพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการออกแบบเซลล์ให้มีหลายชั้นหลายจังก์ชัน เสนอโดย Green และคณะ [3] ในปี 1993 ที่มีลักษณะโครงสร้างเซลล์ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด p และสารกึ่งตัวนำชนิด n สลับทับกันหลายชั้น และมีขั้วไฟฟ้าฝังอยู่ภายในตัวเซลล์ โดยใช้วิธี Laser grooving [4] เพื่อเจาะร่องสำหรับฝังขั้วไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจึงไหลออกนอกเซลล์ได้เร็วเพราะผ่านเพียงจังก์ชันเดียวและมีจังก์ชันให้เลือกผ่านหลายชุด ลักษณะเซลล์ดังกล่าวเหมือนกับแซนดวิชสลับกับแอสเม็ทเรียกว่าเซลล์สุริยะแบบคลัสแซนดวิชตามการเสนอของ Tantraporn [8] จากรายงานของ Green เซลล์สุริยะแบบดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 17.6 % จากการทำ device simulation [5][6] และวัดประสิทธิภาพจากการเตรียมเซลล์ 6 ชั้นแบบ n-p-n-p-n-p โดยใช้วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) บน heavily dope p-type single crystalline CZ Silicon substrates หนา 32 ไมครอน [7] (CZ คือ วิธีการเตรียม Silicon ingot ด้วยวิธี Czochralski)

เพื่อที่จะออกแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสแซนดวิชให้มีประสิทธิภาพสูง Tantraporn [8] เสนอให้ทำการจำลองแบบบนคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) ที่ใช้ฟิลิซส์พื้นฐานเป็นหลักในการศึกษา โดยใช้สมการพื้นฐานในการจำลองแบบการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ สมการพื้นฐานประกอบด้วย 3 สมการ คือ 1) สมการปัวส์ซง 2) สมการความหนาแน่นกระแส และ 3) สมการความต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear partial differential equation) ไม่สามารถหาผลเฉลยได้จากวิธีการวิเคราะห์ (Analytic method) จึงต้องหาผลเฉลยจากวิธีการเชิงตัวเลข ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีเชิงตัวเลขของวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference) และใช้การหาผลเฉลยโดยวิธีการวนซ้ำ (Iteration) ตามเทคนิค SOR (Successive Over-Relaxation Method) การคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าในสมการปัวส์ซง Gummel [9] เสนอวิธีหาผลเฉลยจากการหาค่าผิดพลาดของศักย์ไฟฟ้าในแต่ละรอบของการทำซ้ำมารวมกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้ในรอบก่อน ในการวิเคราะห์สมการความหนาแน่นกระแส Slotboom [10] และ Tantraporn [11] แนะนำวิธีการดิสครีไทซ์ (Discretize) โดยใช้การอินทิเกรตและการประมาณเชิงตัวเลขในการอินทิเกรตเพื่อวิเคราะห์สมการ ซึ่งจะได้อัตตาการเคลื่อนที่ของความหนาแน่นกระแสระหว่างจุด 2 จุด และสมการความต่อเนื่อง Slotboom [10] เสนอวิธีการดิสครีไทซ์โดยใช้วิธี Box-integration และหาผลเฉลยของสมการความต่อเนื่องที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent continuity equation) โดยใช้เทคนิค ของ Crank-Nicolson ที่อาศัยช่วงเวลา (time step) ในการคำนวณและหาผลเฉลยในแต่ละรอบจากการเฉลี่ยค่าที่คำนวณได้ในครั้งก่อนกับค่าที่คำนวณได้ในปัจจุบัน และ Sutherland [12] แนะนำให้ใช้การปรับปรุงวิธีของ Gummel โดยใช้ Relaxation factor (ω) เพื่อเร่งการลู่เข้า (converge) ให้รอบการวนซ้ำน้อยลง

ในการพัฒนาโปรแกรมแบบขนาน ที่ใช้คอมพิวเตอร์หลายเครื่องประมวลผลเพื่อลดเวลาการคำนวณลง มีโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม 2 แบบ คือ 1) แบบ MISD (Multiple Instruction Single Data) คือ ลักษณะการทำงานของโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องมีฟังก์ชันการทำงานที่ต่างกัน แต่ทำการคำนวณกับข้อมูลชุดเดียวกัน และ 2) แบบ SIMD (Single Instruction Multiple Data) คือลักษณะการทำงานของโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องมีฟังก์ชันการทำงานที่เหมือนกัน แต่ทำการคำนวณกับข้อมูลคนละส่วนกัน โดยลักษณะ SIMD ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ที่ต้องการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่ (Domain decomposition) เพื่อแจกจ่ายไปคำนวณบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน Wilkinson และ Allen [19] เสนออัลกอริทึม (Algorithm) การแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่ โดยการแบ่งพื้นที่ของปัญหาออกเป็นส่วนใหญ่ๆ สำหรับแจกจ่ายไปคำนวณบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.3.1 เพื่อพัฒนาชุดโปรแกรมแบบขนานสำหรับการจำลองแบบในเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ 2 มิติ
- 1.3.2 เพื่อหาประสิทธิภาพของเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานจากโปรแกรมแบบขนานที่พัฒนาขึ้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 เป็นการศึกษาและพัฒนาอัลกอริธึมแบบขนานที่เหมาะสมกับการคำนวณแบบขนานในการทำจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ 2 มิติ
- 1.4.2 พัฒนาโปรแกรมแบบขนานจากอัลกอริธึมแบบขนานที่พัฒนาขึ้น
- 1.4.3 ทดสอบประสิทธิภาพของเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานจากโปรแกรมแบบขนานที่พัฒนาขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 อัลกอริธึมแบบขนานและโปรแกรมแบบขนานในการทำจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์
- 1.5.2 ประสิทธิภาพของเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานจากการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

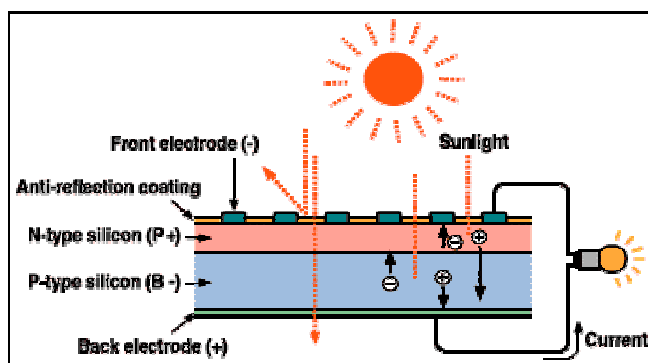
ในวิทยานิพนธ์มีเนื้อหาทั้งหมด 7 บท ในบทที่ 1 เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงหลักการและเหตุผล ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ และขอบเขตการวิจัยของวิทยานิพนธ์ ในบทที่ 2 กล่าวถึงพื้นฐานและการทำงานของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ และสมการพื้นฐานที่ใช้ในเซลล์สุริยะ ในบทที่ 3 เป็นเนื้อหาของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขในการจำลองแบบในเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ ในบทที่ 4 เนื้อหาเกี่ยวข้องกับการคำนวณแบบขนาน ซึ่งกล่าวถึงพื้นฐานของคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน และการประมวลผลแบบขนานในการคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ในบทที่ 5 เป็นการพัฒนาอัลกอริธึมแบบขนาน และพัฒนาโปรแกรมแบบขนาน สำหรับการจำลองแบบในเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ ในบทที่ 6 กล่าวถึงการทดสอบอัลกอริธึมแบบขนานและโปรแกรมแบบขนาน และผลการจำลองแบบ โดยเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมแบบลำดับกับโปรแกรมแบบขนาน ในบทที่ 7 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับการสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

เซลล์สุริยะ

2.1 ฟิสิกส์ของเซลล์สุริยะ

เซลล์สุริยะ [2,20,21] เป็นอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ตัวเซลล์ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิด p และ สารกึ่งตัวนำชนิด n ต่อกันเกิดเป็น p-n junction รอยต่อระหว่างด้าน n และด้าน p ทำหน้าที่กั้นให้ทั้ง 2 ด้านของเซลล์มีศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน พาหะอิสระข้างน้อยที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จะต้องข้ามรอยต่อเพื่อหนีการรวมตัวกับพาหะข้างมาก ต่างชนิดกันไปยังด้านที่มีพาหะชนิดเดียวกัน ดังนั้นอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะข้างน้อยเมื่อด้านอยู่ p จะต้องหนีการรวมตัวกับพาหะข้างมากโดยข้ามรอยต่อไปยังด้าน n ถ้าอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างรอยต่อที่เป็นเขตปลอดพาหะ (space charge region) ก็จะถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าปิดให้ข้ามรอยต่อไปยังด้าน n ที่มีพาหะชนิดเดียวกันคืออิเล็กตรอน และรอดตายจากการรวมตัวกับโฮล ในทำนองเดียวกัน โฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยเมื่ออยู่ด้าน n หนีตายจากการรวมตัวต้องเคลื่อนที่ไปถึงสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อเพื่อให้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าปิดให้ข้ามรอยต่อไปยังด้าน p ที่มีพาหะชนิดเดียวกันคือโฮล โดยการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระจะก่อประโยชน์ให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้ ในทันทีที่มีแสงตกกระทบเซลล์ โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น แล้วหลุดออกจากอะตอม สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระและทิ้งช่องว่าง เรียกว่า โฮล สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระเช่นกัน ในเซลล์สุริยะแบบจังก์ชันเดียวที่มีส่วนประกอบคือ ขั้วลบที่อยู่ด้านบนเซลล์ซึ่งเป็นด้านที่มีแสงตกกระทบ ถัดมาเป็นชั้น n และ ชั้น p ตามลำดับ และล่างสุดเป็นขั้วบวก พาหะสามารถเคลื่อนที่ออกนอกเซลล์ได้โดยอิเล็กตรอนเคลื่อนไปยังขั้วลบและโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ครบวงจรทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทำงานของเซลล์สุริยะ เมื่อมีแสงตกกระทบเซลล์ทำให้เกิด อิเล็กตรอนและโฮลอิสระ และเมื่อเคลื่อนที่ครบวงจร โดยอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบและโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

โครงสร้างของเซลล์สุริยะในรูปที่ 2.1 เป็นลักษณะเซลล์ที่พัฒนาในยุคแรกๆ ในปี 1930 มีลักษณะเป็นรอยต่อ p-n ที่มีเพียงจังก์ชันเดียว ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานค่าหนึ่ง ดังนั้นเซลล์จึงมีความสามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นที่สั้นกว่าคลื่นที่ค่าพลังงาน “ช่องว่าง” และการสร้างพาหะจึงเกิดจากการดูดกลืนความยาวคลื่นเพียงส่วนนี้ ทั้งที่แสงอาทิตย์มีความยาวคลื่นหลายค่า ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์จึงไม่สูงมาก ส่วนใหญ่จะได้ไม่เกิน 14% ในสารกึ่งตัวนำจาก Si และถ้าเป็น amorphous หรือ polycrystalline Si มักมีประสิทธิภาพต่ำกว่า 10 % เนื่องจากอัตราการสร้างพาหะขึ้นอยู่กับช่วงความยาวคลื่น ถ้าพัฒนาให้เซลล์สามารถตอบสนองกับความยาวคลื่นได้หลายค่า จะทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

จึงมีการออกแบบให้เซลล์มีโครงสร้างเป็นแบบหลายจังก์ชัน (Multi-layer) ที่มีรอยต่อ p-n จำนวนหลายชุดซ้อนทับกันแบบอนุกรมในแนวตั้งและวางชั้นไฟฟ้าด้านบนและล่างของเซลล์ ซึ่งเป็นลักษณะของ Tandem cell แต่ละชั้นของรอยต่อ p-n เลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานต่างกันเพื่อให้เซลล์มีช่องว่างพลังงานหลายค่า (Multi-bandgap) เพิ่มความสามารถของเซลล์ให้สามารถดูดกลืนคลื่นแสงที่รอดจากการดูดกลืนที่ชั้นบนได้ โดยมีโครงสร้างเซลล์แสดงในรูปที่ 2.2 เซลล์จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบรอยต่อเดียว เพราะการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลภายในเซลล์ สามารถเกิดได้จากความยาวคลื่นหลายค่าขึ้น

การเปลี่ยนพลังงานของเซลล์สามารถมีประสิทธิภาพสูงมากถึง 15 % [33] (ใน amorphous silicon alloy) หากอยู่ภายใต้สภาวะแสงปกติที่มีความยาวคลื่นครบตามที่เซลล์ต้องการ แต่ถ้าหากเซลล์อยู่ภายใต้สภาวะที่แสงไม่ปกติที่มีความยาวคลื่นช่วงที่เซลล์ต้องการน้อยไป เนื่องจากอัตราการเกิดพาหะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง และอัตราการเกิดพาหะด้วยแสงจะมีค่าสูงสุดที่ผิวด้านที่รับแสงและลดลงตามความลึก เมื่อเซลล์มีความหนาแน่นเพราะมีรอยต่อจำนวนมาก ทำให้อัตราการเกิดพาหะจากแสงลดลงตามระยะทางความลึกจากผิว แม้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงอาจเพิ่มขึ้นก็ตาม ทำให้เกิดความต้านทานภายในเซลล์ มีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง ดังนั้นเซลล์สุริยะแบบ Tandem cell จึงไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นและไม่เหมาะที่จะพัฒนาต่อไป

จากการออกแบบให้เซลล์มีความไวต่อแสงได้หลายช่วงความยาวคลื่น โดยมีรอยต่อ p-n หลายชั้น ตัวเซลล์จึงมีความหนาแน่น และมีผลกับระยะทางที่พาหะเคลื่อนที่ ซึ่งต้องเดินทางระยะไกลมากเพื่อให้ถึงขั้วไฟฟ้า เพราะต้องข้ามรอยต่อหลายชั้น พาหะอาจถูกรวมตัวก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า ทำให้เสียประจุที่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงต้องออกแบบเซลล์ให้มีหลายชั้นหลายจังก์ชัน โดยให้มีการสลับรอยต่อ p-n ทับกันหลายชั้น ให้แต่ละชั้นมีขนาดบางๆ และฝังขั้วไฟฟ้าไว้ด้านในเซลล์ เพื่อให้พาหะเดินทางข้ามรอยต่อด้วยระยะทางที่สั้นและออกภายนอกเซลล์ได้เร็ว และใช้รอยต่อ p-n หลายชุดขนานกันไปด้านข้างสลับกับขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะของเซลล์สุริยะแบบคลัมป์แชนแนล ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อ 2.2 ต่อไป

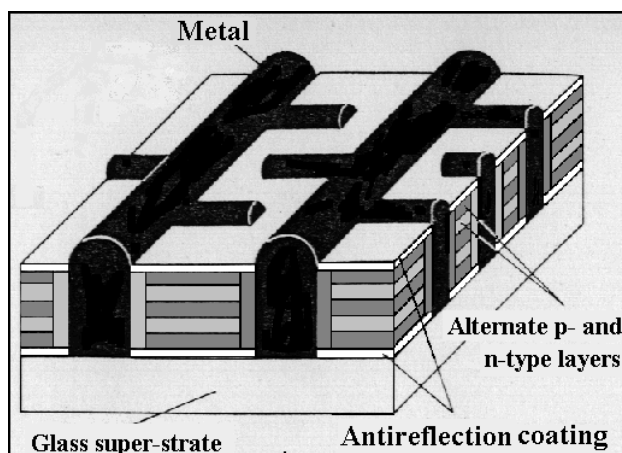
Ag	Ag
ITO	
p	
i a-Si alloy	
n	
p	
i a-SiGe alloy	
n	
p	
i a-SiGe alloy	
n	
Zinc Oxide	
Silver	
Stainless Steel	

รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบ Tandem cell [33] มี 3 รอยต่อ p-n ที่ทำจาก amorphous silicon alloy สามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 12.8 % ภายใต้สภาวะแสงที่ปกติ โดยรอยต่อแรก ในชั้น i ใช้ a-Si alloy มีช่องว่างพลังงาน 1.8 eV เพื่อตอบสนองต่อแสงสีน้ำเงิน รอยต่อที่สอง ในชั้น i ใช้ a-SiGe alloy (มี Ge 15 %) มีช่องว่างพลังงาน 1.6 eV เพื่อตอบสนองแสงสีเขียว และ รอยต่อที่สาม ในชั้น i ใช้ a-SiGe alloy (มี Ge 40-50 %) มีช่องว่างพลังงาน 1.4 eV เพื่อตอบสนองแสงสีแดง และ แสงinfrared

2.2 เซลล์สุริยะแบบคลัมแซนดิวซ์

Green [3,20] ได้เสนอแนวความคิดในการออกแบบเซลล์สุริยะแบบหลายชั้นหลายจังกัชน ที่มีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด n และสารกึ่งตัวนำชนิด p วางสลับทับกันหลายชั้น ซึ่งเป็นเซลล์สุริยะแบบคลัมแซนดิวซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และให้ความหนาของแต่ละชั้นไม่เกินระยะแพร่ซึมของพาหะข้างน้อย (minority carrier's diffusion length) เพื่อให้พาหะเดินทางถึงรอยต่อได้ก่อนที่จะถูกจับตาย และฝังข้อไฟฟ้าไว้ในเซลล์เพื่อให้พาหะเดินทางออกนอกเซลล์ได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 2.3 เป็นโครงสร้างเซลล์สุริยะแบบคลัมแซนดิวซ์ มีรอยต่อให้พาหะเลือกข้ามถึง 5 ด้าน คล้ายของบุหรี่ปลายเปิด และมีข้อไฟฟ้าฝังอยู่ในเซลล์อย่างใกล้ชิด ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนที่เป็นพาหะข้างน้อยที่เกิดในชั้น p สามารถเดินทางในระยะสั้นไปยังรอยต่อ เพื่อข้ามไปยังชั้น n และมีรอยต่อให้เลือกข้ามถึง 5 ด้าน จึงมีอัตราการรอดจากการถูกรวมตัวกับโฮลสูงมาก และสามารถเดินทางไปยังขั้วลบที่ฝังอยู่ภายในเซลล์เพื่อออกนอกเซลล์ได้อย่างรวดเร็ว และโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยในชั้น n จะเดินทางในระยะสั้นเพื่อไปข้ามรอยต่อ และมีรอยต่อให้เลือกข้าม ถึง 5 ด้าน และสามารถเดินทางออกนอกเซลล์ได้โดยขั้วบวกที่ฝังอยู่อีกชุดหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะเป็นหวี ฝังสลับกับข้อไฟฟ้าอีกชุดหนึ่งที่เป็นขั้วลบ โครงสร้างเซลล์ดังกล่าวทำให้พาหะมีโอกาสรอดจากการถูกรวมตัวกับพาหะชนิดตรงข้ามสูงมากขึ้น และสามารถเคลื่อนที่ออกนอกเซลล์ได้อย่างรวดเร็ว เพราะมีระยะเดินทางไปยังรอยต่อที่สั้นและมีรอยต่อให้เลือกข้ามถึง 5 ด้าน จึงมีประสิทธิภาพสูงมาก (มากกว่า 20 % [21]) และยังสามารถประดิษฐ์จากวัสดุที่มีคุณภาพต่ำที่มี life time ของพาหะสั้น ราคาของเซลล์จึงต่ำลงแต่ให้ประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลล์สุริยะแบบคลัมป์ในตัวใน 3 มิติ

2.3 ชุดสมการสถานะ (State Equations)

พฤติกรรมเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุไฟฟ้า (Charge carrier) ในเซลล์สุริยะสามารถกำหนดได้ด้วยชุดสมการสถานะ ที่ประกอบด้วย 3 สมการ คือ 1) สมการปัวส์ซง 2) สมการความหนาแน่นกระแส และ 3) สมการความต่อเนื่อง ที่มีอยู่ในตำราฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ เช่น [25] โดยในที่นี้จะขอสรุปมาไว้เพื่อความสมบูรณ์ทางเนื้อหา ดังนี้

2.3.1 สมการปัวส์ซง (Poisson Equation)

สมการปัวส์ซงแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นของประจุสุทธิ ซึ่งประจุในสารกึ่งตัวนำประกอบด้วย ประจุที่เคลื่อนที่ได้อิสระ และ ประจุที่อยู่กับที่ โดยประจุที่เคลื่อนที่ได้ประกอบด้วย อิเล็กตรอน และ โฮล ส่วนประจุที่อยู่กับที่ ประกอบด้วย แอคเซปเตอร์ (acceptor) และ โดเนอร์ (donor)

โดยความหนาแน่นของประจุสุทธิในสารกึ่งตัวนำ เป็นการรวมกันของ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุเป็นลบ, ความหนาแน่นของโฮล ซึ่งมีประจุเป็นบวก, ความหนาแน่นของโดเนอร์ ซึ่งมีประจุเป็นบวก และ ความหนาแน่นของแอคเซปเตอร์ ซึ่งมีประจุเป็นลบ เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\rho = q(-n + p + n_o - p_o) \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของประจุสุทธิ (C/cm^3)

q คือ ขนาดของประจุไฟฟ้ามูลฐาน (C)

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (cm^{-3})

p คือ ความหนาแน่นของโฮล (cm^{-3})

n_o คือ ความหนาแน่นของโดเนอร์ (cm^{-3})

p_o คือ ความหนาแน่นของแอคเซปเตอร์ (cm^{-3})

และสามารถเขียนสมการปัวซองได้ต่อไปนี้

$$\nabla^2 \psi = -\frac{q}{\epsilon}(-n + p + n_0 - p_0) \quad (2.2)$$

โดยที่ ψ คือ ศักย์ไฟฟ้า (V)

ϵ คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของวัสดุ (F/cm)

($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ (F/cm)

ϵ_r คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ หรือ คงตัวไดอิเล็กตริก)

2.3.2 สมการความหนาแน่นกระแส (Current Density Equation)

กระแสที่ไหลในสารกึ่งตัวนำมีกระแสด้วยกัน 2 ชนิด คือ กระแสเนื่องจากการไหลของอิเล็กตรอน และกระแสเนื่องจากการไหลของโฮล โดยพิจารณาเป็นกระแสต่อหน่วยพื้นที่ เรียกว่า ความหนาแน่นกระแส

ความหนาแน่นกระแสรวม เกิดจากการรวมกันของความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นกระแสของโฮล เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p \quad (2.3)$$

โดยที่ J_n, J_p คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของ อิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ (A/cm^2)

การเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ จะเป็นการเคลื่อนที่ 2 แบบ คือ กระแสเนื่องจากพาหะเคลื่อนที่แบบพัดพา (drift) และกระแสเนื่องจากพาหะเคลื่อนที่แบบแพร่ซึม (diffusion) โดยกระแสไฟฟ้าพัดพา (drift current) เกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าแบบแพร่ซึม (diffusion current) เกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะเนื่องจากเกรเดียนต์ของความหนาแน่นของพาหะ (concentration gradient)

ดังนั้นสมการความหนาแน่นกระแสจึงเขียนได้ดังนี้

สำหรับ อิเล็กตรอน

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \vec{\nabla}\Psi + qD_n \vec{\nabla}n \quad (2.5)$$

สำหรับ โฮล

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \vec{\nabla}\Psi - qD_p \vec{\nabla}p \quad (2.4)$$

โดยที่ μ_n, μ_p คือ ค่าโมบิลิตีของ อิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ (cm^2/Vs)

D_n, D_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของ อิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ (cm^2/s)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพาหะเคลื่อนที่หรือกระแสพาหะ กับกระแสไฟฟ้าเนื่องจากพาหะ โดยพิจารณาพาหะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดซึ่งคือฟลักซ์ของพาหะหรือความหนาแน่นกระแสของพาหะ กับกระแสไฟฟ้าเนื่องจากพาหะต่อพื้นที่หรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเนื่องจากพาหะ จะได้ความสัมพันธ์เป็นดังนี้

สำหรับอิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุเป็นลบ จะได้

$$\vec{J}_{particle, n} = -\frac{1}{q} \vec{J}_n \quad (2.6)$$

สำหรับโฮล ซึ่งมีประจุเป็นบวก จะได้

$$\vec{J}_{particle, p} = \frac{1}{q} \vec{J}_p \quad (2.7)$$

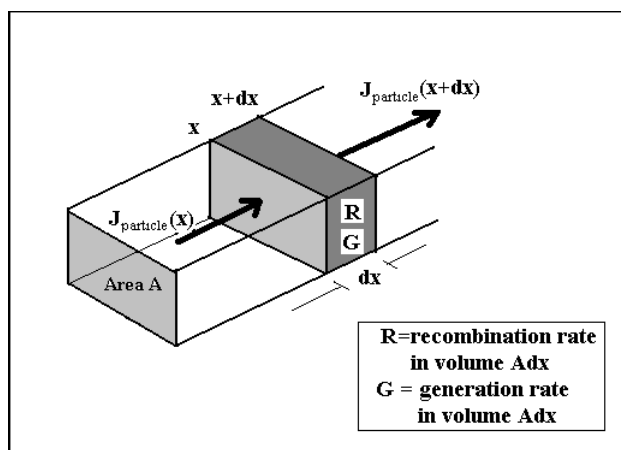
โดยที่ $J_{particle, n}$, $J_{particle, p}$ คือ ความหนาแน่นกระแสของอนุภาค (จำนวนพาหะที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

J_n, J_p คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเนื่องจาก อิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ

โดยเครื่องหมายลบในสมการ(2.6) บอกถึงทิศทางการไหลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอน มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่วนสมการ(2.7) มีเครื่องหมายเป็นบวกหมายถึงการไหลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเนื่องจากโฮลมีทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่โฮล

2.3.3 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

สมการความต่อเนื่องแสดงถึงความสัมพันธ์ของการอนุรักษ์อนุภาคที่มีประจุ ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงอนุภาคในปริมาตร ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคที่ไหลเข้าและออกอย่างต่อเนื่องในปริมาตร มีอัตราการสร้างอนุภาคและอัตราการรวมตัวของอนุภาคในปริมาตรด้วย พิจารณาจากรูปที่ 2.4 แสดงปริมาตรมีพื้นที่หน้าตัด A หนา dx ในปริมาตรจะมีอนุภาคไหลเข้าและไหลออก และภายในยังมีการสร้าง (generation) อนุภาคขึ้นและมีการรวมตัว (recombination) ของอนุภาคด้วย



รูปที่ 2.4 การอนุรักษ์ของอนุภาคที่มีประจุในปริมาตร Adx

เมื่อพิจารณาจากรูปจะถึงความสัมพันธ์ [23] คือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงอนุภาคในปริมาตร = อัตราการไหลของอนุภาคเข้าปริมาตร – อัตราการไหลของอนุภาคออกจากปริมาตร + อัตราการเกิดของอนุภาคต่อปริมาตร – อัตราการตายของอนุภาคต่อปริมาตร

ซึ่งเป็นสมการการอนุรักษ์อนุภาค

เมื่อพิจารณาผลต่างจำนวนของอนุภาค (อิเล็กตรอน) ที่ไหลผ่านปริมาตรมีพื้นที่หน้าตัด A หนา Δx เคลื่อนที่ในทิศทาง $+x$ มีสมการเป็นดังนี้

$$\left[-\frac{J_n(x)}{q} + \frac{J_n(x + \Delta x)}{q} \right] A = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} \Delta x A \quad (2.8)$$

เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดของอนุภาค (อิเล็กตรอน) ต่อปริมาตรมีพื้นที่หน้าตัด A หนา Δx คือ $\Delta x AG$ โดยที่ G คือ อัตราการเกิดของอนุภาคต่อปริมาตร ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$)

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาอัตราการตายของอนุภาค (อิเล็กตรอน) ต่อปริมาตรมีพื้นที่หน้าตัด A หนา Δx คือ $\Delta x AR$ โดยที่ R คือ อัตราการการรวมตัวของอนุภาคต่อปริมาตร ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$)

และอัตราการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค (อิเล็กตรอน) ในปริมาตร คือ $A \Delta x [dn/dt]$

ดังนั้นจึงได้สมการการอนุรักษ์สำหรับอิเล็กตรอนคือ

$$A \Delta x \left[\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} \right] = A \Delta x \left[\frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} + G - R \right] \quad (2.9)$$

เมื่อเขียนสมการ(2.9)ใหม่ โดยปรับให้อยู่รูปของไดเวอร์เจนต์ (Divergent) ได้สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอน [8,11] เป็น

$$\frac{\partial n}{\partial t} = +\frac{1}{q} \vec{\nabla} \bullet \vec{J}_n + G - R \quad (2.10)$$

ในทำนองเดียวกัน สามารถเขียนสมการความต่อเนื่องสำหรับโฮล ได้เป็น

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \vec{\nabla} \bullet \vec{J}_p + G - R \quad (2.11)$$

2.4 Current-Voltage Characteristic ของเซลล์สุริยะ

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ สามารถแสดงได้โดยใช้ J-V Curve ซึ่งหมายถึงกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า พิจารณาจากรูปที่ 2.5 สามารถหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์สุริยะเมื่อไม่มีการต่อโหลด ซึ่งไม่มีกระแสไหล ได้จาก V_{oc} (Open circuit voltage) สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากเซลล์สุริยะเมื่อมีการต่อโหลด แล้ววัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้เป็นศูนย์ ได้จาก J_{sc} (Short circuit current density) และสามารถหาค่ากำลังสูงสุดของเซลล์สุริยะ ได้จากพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด (J_{max}) ซึ่งเป็นพื้นที่มากที่สุดอยู่ภายใน J-V curve มีประโยชน์สำหรับตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์ที่ผ่านโหลด เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ

โดยที่ V_{oc} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิด
 J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเมื่อวงจรปิด

J-V Characteristic ของเซลล์แสงอาทิตย์ [34] สามารถแสดงได้จากสมการของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

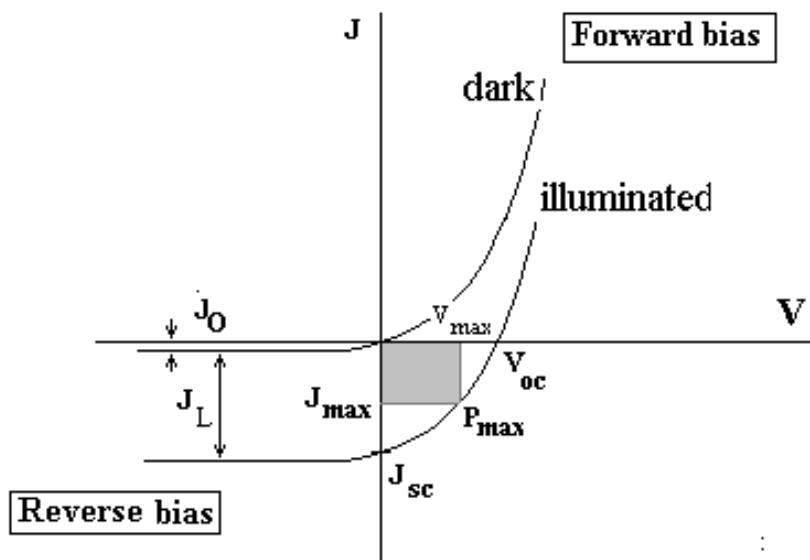
$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{NkT}\right) - 1 \right] - J_L \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$J_0 = \left(\frac{qD_n n_p}{L_n} + \frac{qD_p p_n}{L_p} \right) \quad (2.13)$$

- โดยที่ J คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์ (A/cm^2)
 J_o คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวในที่มืด (A/cm^2)
 J_L คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจากพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแสงตกกระทบบ (A/cm^2)
 N คือ พารามิเตอร์สำหรับรูปร่างของ J-V Characteristic
 n_p คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะข้างน้อยเมื่ออยู่ด้าน p
 p_n คือ ความหนาแน่นของโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยเมื่ออยู่ด้าน n
 L_n, L_p คือ ระยะแพร่ซึมของ อิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ (cm)

โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเนื่องจากมีแสงตกกระทบบมีค่าเป็นศูนย์ ($J_L=0$) เมื่อเซลล์อยู่ในที่มืด ซึ่งจะได้ J-V Characteristic ตามลักษณะของไดโอด และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ออกจากเซลล์เมื่อมีแสงตกกระทบบ เป็นผลต่างระหว่างความหนาแน่นกระแสเนื่องจากเซลล์อยู่ในที่มืดกับความหนาแน่นกระแสจากพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแสงตกกระทบบ เหมือนที่แสดงในสมการ(2.12) ดังนั้น J-V Characteristic ของเซลล์ที่มีแสงตกกระทบบจะเป็นการเลื่อนกราฟของ J-V Characteristic ของไดโอด เลื่อนลงไปด้วยค่าคงตัวของ J_L และที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นศูนย์ ($V=0$) จะมีค่าคงตัวของ J_L เท่ากับ J_{sc} ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 J-V characteristics สำหรับเซลล์สุริยะ อยู่ในที่มืด และอยู่ในที่มีแสงตกกระทบบ

การสร้างกราฟของ J-V curve ในการทดลองและในการทำจำลองแบบจะมีความแตกต่างกันดังนี้

การสร้างกราฟ J-V curve ในการทดลองจะเป็นการเอาโวลต์มาต่อกับเซลล์ แล้ววัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ออกมาจากเซลล์ แล้วเปลี่ยนตัวต้านทานหลายๆ ค่า เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าแรงเคลื่อนหลายๆค่า มาเขียนกราฟ J-V curve

ในการจำลองแบบบนคอมพิวเตอร์ กราฟ J-V curve ได้จากการ bias voltage ทั้งไปข้างหน้า(forward bias) และ ย้อนกลับ (reverse bias) โดยอินพุตค่า voltage แล้วจะได้ค่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็นเอาต์พุตออกมา และเปลี่ยนค่า voltage หลายๆค่า เพื่อให้ได้ค่า เอาต์พุตของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าหลายค่า เพื่อนำมาเขียนกราฟ J-V curve

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์สุริยะ คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด ต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.14)$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ (%)

$P_{\max}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์สุริยะ

P_{in} คือ กำลังของแสงที่ตกบนเซลล์

กำลังไฟฟ้าสูงสุด($P_{\max}$)หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ J-V curve ที่เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด ($V_{\max}$) กับ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด($J_{\max}$) ซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่มากที่สุดในกราฟ J-V curve ซึ่งเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$P_{\max} = V_{\max} \times J_{\max} \quad (2.15)$$

The curve factor (f) [34] คือ อัตราส่วนของพื้นที่ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด ($V_{\max} J_{\max}$) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิดกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเมื่อวงจรปิด ($V_{oc} J_{sc}$) เขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$f = \frac{V_{\max} J_{\max}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (2.16)$$

จาก curve factor สามารถหาค่า $P_{\max}$ จาก V_{op} และ J_{sc} ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_{\max} = f \times V_{op} \times J_{sc} \quad (2.17)$$

โดยค่า f ของเซลล์สุริยะโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างค่า 0.75 ถึง 0.8

จากรูปที่ 2.5 กราฟของ J-V curve สามารถนำไปหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะได้ เนื่องจากกราฟสามารถหาค่า $P_{\max}$ ได้ ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์จะมีค่ามากถ้าเซลล์มี $P_{\max}$ มาก ในการออกแบบเซลล์สุริยะจึงพยายามให้มี $P_{\max}$ มีค่ามากที่สุด

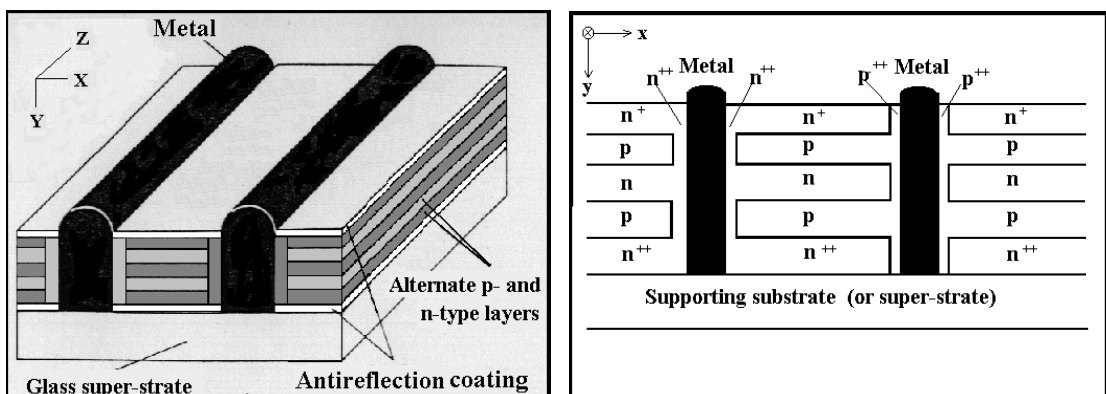
บทที่ 3

วิธีการเชิงตัวเลข

ในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ด้วยการหาผลเฉลยชุดสมการสถานะที่เป็นกฎเกณฑ์บังคับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุไฟฟ้าในเซลล์สุริยะ ชุดสมการสถานะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ที่มีความเกี่ยวข้องซึ่งกันและกัน และเป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ทำให้ระบบสมการมีความซับซ้อน จนไม่สามารถหาผลเฉลยได้จากวิธีการวิเคราะห์ (analytical method) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ดังนั้นจึงต้องใช้การหาผลเฉลยโดยวิธีคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งจะได้ผลลัพธ์โดยประมาณ

ในการจำลองแบบเซลล์สุริยะเพื่อแทนกลไกการทำงานภายในของเซลล์ให้ได้ตรงตามความเป็นจริง จำเป็นต้องมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้ 1) มีการกำหนดจุด หรือพื้นที่เล็กๆ เพื่อเป็นตัวแทนของบริเวณในเนื้อสารของเซลล์สุริยะ 2) แปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงผลต่าง และ 3) แก้ระบบสมการเพื่อหาผลเฉลย โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขของวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference) ซึ่งเป็นวิธีแก้ปัญหาสำหรับหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยโดยการแปลงสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงผลต่างจากการประมาณ และกำหนดตารางสี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่มีลักษณะเป็นตาข่ายบนโดเมนของปัญหา เพื่อเป็นตัวแทนในการหาผลเฉลย

แบบจำลองของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โมเดลใน 2 มิติ ในหน้าตัด X และ Y ของเซลล์สุริยะดังแสดงในรูปที่ 3.1 ให้ลักษณะของเซลล์สุริยะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแกน Z คือให้ข้อไฟฟ้ามีลักษณะยาวขนานกันไปตามแกน Z ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) ดังนั้นกระแสจึงสามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทางของแกน X และ Y เท่านั้น ลักษณะดังกล่าวจึงใช้โมเดลใน 2 มิติได้ โดยการจำลองแบบใช้ส่วนของเซลล์สุริยะที่อยู่ระหว่างข้อไฟฟ้าทั้ง 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข)



รูปที่ 3.1 (ก) โครงสร้างของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ใน 3 มิติ ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามแกน Z
(ข) ภาคตัดขวางในแกน X และ Y ของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ สำหรับการจำลองแบบ

ขั้นตอนในการคำนวณเชิงตัวเลขของวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สำหรับการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ 1) Domain Discretization เพื่อแบ่งพื้นที่บนโดเมนออกเป็นตาข่ายเล็กๆ 2) การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ ของสมการสถานะให้เป็นสมการเชิงผลต่างโดยวิธีการประมาณ และ 3) การแก้ระบบสมการ เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณตามจุดตัดต่างๆ ของตาข่ายที่อยู่ทั่วทั้งโดเมนของปัญหา โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 Domain Discretization

การแก้ปัญหาเชิงตัวเลขตามวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะต้องมีการสร้างตารางสี่เหลี่ยมหรือตาข่ายบนโดเมน เพื่อใช้เป็นตำแหน่งที่จะหาผลเฉลยและเป็นตัวแทนของผลเฉลยทั่วทั้งโดเมน ตารางสี่เหลี่ยมเกิดจากเส้นตัดกันระหว่างเส้นแนวนอนกับเส้นแนวตั้ง ที่จุดตัดกันของเส้น เรียกว่า จุดกริด ซึ่งเป็นจุดที่ได้ผลเฉลยของปัญหา และระยะห่างระหว่างกริด คือ ขนาดของกริด

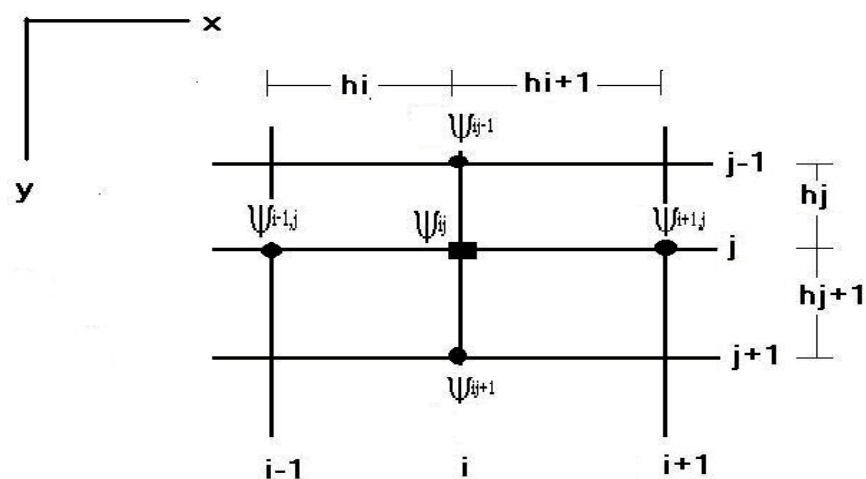
ปัญหาเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์ ในโดเมนจะมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อเทียบกับระยะทาง หรือ เกรเดียนต์ บางบริเวณอาจมีเกรเดียนต์รุนแรง แต่บางบริเวณเกรเดียนต์อาจไม่รุนแรง เกรเดียนต์ที่เกิดขึ้นบนโดเมนจะมีผลกับขนาดของกริดที่จะให้ความแม่นยำของผลเฉลย เนื่องจากเกรเดียนต์อาจไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งโดเมน ดังนั้นกริดบนโดเมนจึงต้องสร้างให้มีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความรุนแรงของเกรเดียนต์ ถ้าบริเวณที่มีเกรเดียนต์รุนแรงต้องใช้กริดที่มีลักษณะเป็นตาข่ายขนาดเล็ก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำ ถ้าบริเวณที่มีเกรเดียนต์ไม่รุนแรง ใช้กริดที่มีลักษณะเป็นตาข่ายขนาดใหญ่ ก็ให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำได้ ดังนั้นกริดบนโดเมนจึงมีด้วยกัน 3 ลักษณะ คือ 1) บริเวณที่กริดมีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นกริดสำหรับบริเวณที่มีเกรเดียนต์รุนแรง 2) บริเวณที่กริดมีขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นกริดสำหรับบริเวณที่มีเกรเดียนต์ไม่รุนแรง และ 3) บริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างบริเวณที่ 1 และ 2 เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของกริดจากขนาดใหญ่ให้ลดตัวลงเป็นกริดขนาดเล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมสำหรับบริเวณที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นกริดมีลักษณะเป็นตาข่ายขนาดเท่ากันตลอดทั้งบริเวณ แต่ในบริเวณที่ 3 ใช้กริดแบบไฟไนต์บ็อก (Finite Box) ซึ่งเป็นกริดที่สามารถปรับขนาดให้ลดลงได้

โดยรายละเอียดของกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมและกริดแบบไฟไนต์บ็อกมีดังต่อไปนี้

3.1.1 กริดแบบตารางสี่เหลี่ยม

กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2 ใช้สำหรับบริเวณที่ต้องการให้กริดมีความสม่ำเสมอขนาดเท่ากันตลอดทั้งโดเมน ซึ่งอาจเป็นบริเวณที่มีเกรเดียนต์รุนแรงหรือไม่รุนแรงก็ได้ โดยบริเวณที่มีเกรเดียนต์รุนแรงกริดจะมีลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่มีความแม่นยำ แต่บริเวณที่เกรเดียนต์ไม่รุนแรง กริดจะมีลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ ซึ่งเพียงพอกับความแม่นยำของการหาผลเฉลย ในการหาผลเฉลยของจุดกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมต้องใช้จุดกริดทั้งหมด 5 จุดกริด โดยเป็นจุดกริดของตำแหน่งที่ต้องการหาผลเฉลย 1 จุดกริดอยู่ตรงกลาง และจุดกริดเพื่อนบ้านที่อยู่รอบ 4 ทิศอีก 4 จุดกริด เพื่อความเข้าใจพิจารณาจากรูปที่ 3.2 ที่จุด $\Psi_{i,j}$ คือจุดที่ต้องการหาผลเฉลย ซึ่งต้องอาศัยจุดกริดเพื่อนบ้านในการคำนวณอีก 4 จุด คือ $\Psi_{i-1,j}$, $\Psi_{i+1,j}$, $\Psi_{i,j-1}$ และ $\Psi_{i,j+1}$

โดยที่ $\psi_{i,j-1}$ คือ จุดกริดที่อยู่ทิศเหนือของ $\psi_{i,j}$ ห่างออกไป h_j
 $\psi_{i+1,j}$ คือ จุดกริดที่อยู่ทิศตะวันออกของ $\psi_{i,j}$ ห่างออกไป h_{i+1}
 $\psi_{i,j+1}$ คือ จุดกริดที่อยู่ทิศใต้ของ $\psi_{i,j}$ ห่างออกไป h_{j+1}
 $\psi_{i-1,j}$ คือ จุดกริดที่อยู่ทิศตะวันตกของ $\psi_{i,j}$ ห่างออกไป h_i



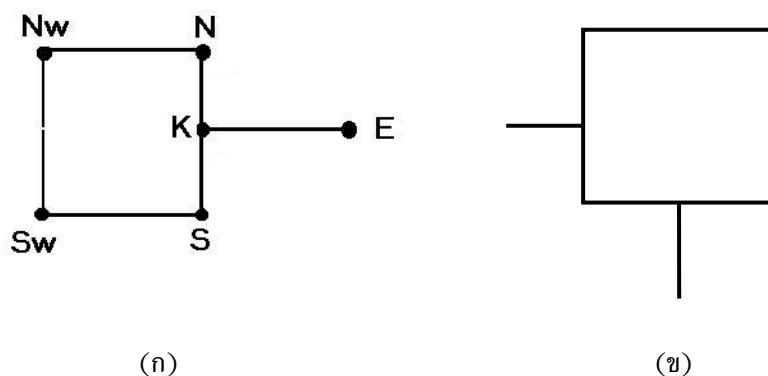
รูปที่ 3.2 กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมสำหรับการหาผลเฉลยโดยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ที่ต้องใช้ 4 จุดกริดรอบข้าง ($\psi_{i-1,j}$ $\psi_{i+1,j}$ $\psi_{i,j-1}$ $\psi_{i,j+1}$) ในการหาผลเฉลย ณ จุดที่พิจารณา ($\psi_{i,j}$)

ตำแหน่งจุดกริดในรูปที่ 3.2 เพื่อความง่ายใช้สัญลักษณ์ (i, j) แทนตำแหน่งจุดกริดที่ (x_i, y_j) และให้

- K แทน (i, j)
- N แทน $(i, j-1)$
- E แทน $(i+1, j)$
- S แทน $(i, j+1)$
- W แทน $(i-1, j)$

3.1.2 กริดแบบไฟไนต์บ็อก

กริดแบบไฟไนต์บ็อก[13,22] เป็นกริดที่มีลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยมหลายขนาด ซึ่งเกิดจากการปรับขนาดกริดจากตารางสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ให้ลดขนาดลงเป็นตารางสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก โดยมีการสิ้นสุดของเส้น (Termination line) บนด้านของตารางสี่เหลี่ยม จากลักษณะดังกล่าวจึงใช้กริดแบบไฟไนต์บ็อกสำหรับเป็นรอยต่อระหว่างบริเวณที่มีกริดขนาดใหญ่กับบริเวณที่มีกริดขนาดเล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้กริดแบบไฟไนต์บ็อกตามเทคนิคของ Franz [13] โดยกำหนดเงื่อนไขการมีเส้นสิ้นสุดบนด้านข้างของ 1 ตารางสี่เหลี่ยมได้เพียงเส้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) ถ้าบนด้านข้างของ 1 ตารางสี่เหลี่ยมมีเส้นสิ้นสุดมากกว่า 1 เส้น จะเป็นลักษณะของไฟไนต์บ็อกที่ไม่เป็นไปตามเทคนิคของ Franz ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข)

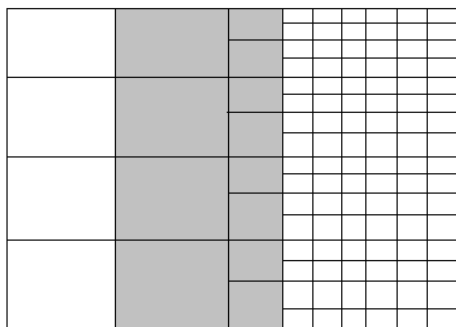


รูปที่ 3.3 (ก) ลักษณะของไฟไนต์บ็อกซึ่งมีเส้นสิ้นสุดในบ็อกเพียงเส้นเดียวและใช้ 6 จุดกริดและ 5 เพื่อนบ้านในการหาผลเฉลี่ย (ข) เป็นลักษณะที่ผิดของไฟไนต์บ็อกตามเทคนิคของ Franz เพราะมีเส้นสิ้นสุดมากกว่า 1 เส้นภายใน 1 ตารางสี่เหลี่ยม

การหาผลเฉลี่ยของกริดแบบไฟไนต์บ็อกต้องใช้จุดกริดทั้งหมด 6 จุด โดยเป็นจุดกริดของตำแหน่งที่ต้องการหาผลเฉลี่ย 1 จุดกริด และจุดกริดเพื่อนบ้านที่อยู่รอบข้างอีก 5 จุด เพื่อความเข้าใจพิจารณาจากรูป 3.3 (ก) ที่จุด K คือจุดที่หาผลเฉลี่ย ต้องใช้กริดเพื่อนบ้านที่อยู่รอบข้างอีก 5 จุด ซึ่งประกอบด้วย N, E, S, Nw, Sw

โดยที่ N คือ จุดกริดที่อยู่ด้านทิศเหนือของ K
 E คือ จุดกริดที่อยู่ด้านทิศตะวันออกของ K
 S คือ จุดกริดที่อยู่ด้านทิศใต้ของ K
 Nw คือ จุดกริดที่อยู่ด้านทิศตะวันตกของ N
 Sw คือ จุดกริดที่อยู่ด้านทิศตะวันตกของ S

ในงานวิจัยนี้ได้นำกริดแบบไฟไนต์บล็อกตามเทคนิคของ Franz ในการปรับขนาดกริด ทำให้กริดบนโดเมนมีหลายขนาดตามความรุนแรงของเกรเดียนต์บนโดเมน โดยกริดแบบไฟไนต์บล็อกทำหน้าที่เป็นรอยต่อระหว่างกริดขนาดใหญ่และกริดขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อปรับขนาดจากกริดขนาดใหญ่ให้ลดขนาดลงมาเท่ากับกริดขนาดเล็ก กริดบนโดเมนจึงมีหลายขนาดซึ่งเหมาะสมเพียงพอกับความแม่นยำของผลเฉลย และมีจำนวนกริดไม่มากเกินไปจนความจำเป็น ทำให้ไม่เสียเวลาในการคำนวณ



รูปที่ 3.4 แสดงการใช้กริดแบบไฟไนต์บล็อก ร่วมกับกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมเพื่อปรับขนาดกริดใหญ่ลงเป็นกริดขนาดเล็ก (ที่บริเวณสีเทา คือ กริดแบบไฟไนต์บล็อก)

จุดกริดที่อยู่บนโดเมนซึ่งมีจำนวนหลายจุดเพื่อใช้สำหรับหาผลเฉลยของปัญหา มีจุดกริดด้วยกัน 2 ประเภท คือ 1) กริดที่อยู่ภายในโดเมน ซึ่งเป็นจุดกริดที่ไม่รู้ค่า จะต้องคำนวณโดยการแก้ระบบสมการเพื่อหาผลเฉลย และ 2) จุดกริดที่อยู่ขอบของโดเมน เป็นจุดกริดที่ใช้สำหรับให้ค่าเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา จะได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.3 การแก้ระบบสมการต่อไป

3.2 การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์

ชุดสมการสถานะซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยใน 2 มิติ ประกอบด้วย 3 สมการ ได้แก่ 1) สมการปัวซอง 2) สมการความหนาแน่นกระแส และ 3) สมการความต่อเนื่อง ที่ต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปสมการเชิงผลต่าง และปรับเปลี่ยนชุดสมการสถานะให้เหมาะสมที่จะนำไปคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขบนคอมพิวเตอร์ มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้ 1) การนอร์มาไลซ์ (Normalization) สมการสถานะ เพื่อปรับขนาดค่าตัวเลขของตัวแปรต่างๆ ให้มีขนาดใกล้เคียงกัน 2) การปรับสมการสถานะโดยใช้ค่าของศักย์ควอซิเฟอร์มี (Quasi-Fermi potential) และใช้ตัวแปรสล็อตบูม (Slotboom's variables) เพื่อเปลี่ยนสมการสถานะให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมนำไปดีสคริไทซ์ 3) การดีสคริไทซ์สมการสถานะ สำหรับแปลงสมการสถานะให้อยู่ในรูปสมการเชิงผลต่างเพื่อนำไปคำนวณบนคอมพิวเตอร์ โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 การนอร์มาไลซ์สมการสถานะ

การแก้สมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้การคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขบนคอมพิวเตอร์ ตัวแปรต่าง ๆ อาจมีค่าของตัวเลขต่างกันหลายขนาดอเดอร์ (order of magnitude) ซึ่งจะเป็นปัญหาในการนำตัวแปรมาดำเนินการทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ ที่จะทำให้ค่าที่คำนวณได้มีความผิดพลาด เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงใช้วิธีการนอร์มาไลซ์สมการสถานะเพื่อให้ตัวแปรทุกตัวมีขนาดของตัวเลขใกล้เคียงกัน

สมการสถานะถูกนอร์มาไลซ์ตามระบบของ Otto [32] ซึ่งมีตัวนอร์มาไลซ์ดังนี้

x, y	นอร์มาไลซ์ด้วย	$L_D = (\mathcal{E}kT/q^2 n_i)^{1/2}$
n, p	นอร์มาไลซ์ด้วย	n_i
ψ	นอร์มาไลซ์ด้วย	kT/q
μ_p, μ_n	นอร์มาไลซ์ด้วย	qL_D^2/kT
J_p, J_n	นอร์มาไลซ์ด้วย	$qL_D n_i/t$
G, R	นอร์มาไลซ์ด้วย	n_i/t
t	นอร์มาไลซ์ด้วย	t

โดยที่

L_D	คือ	ความยาวของเดอบาย (cm)
n_i	คือ	ค่าความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})
kT/q	คือ	ศักย์ของโบลต์ซมันน์ (V)
kT	คือ	พลังงานความร้อน (eV)
k	คือ	ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (J/K)
T	คือ	อุณหภูมิ (K)
t	คือ	เวลา (second)

เมื่อชุดสมการสถานะที่ได้แสดงในบทที่ 2 ถูกลดทอนด้วยตัวนอร์มาไลซ์ และใช้ความสัมพันธ์ของไอน์สไตน์ (Einstein relation) คือ $D = \mu kT/q$ เพื่อเปลี่ยนรูปสมการความหนาแน่นกระแสที่มีเทอมของ D ให้อยู่ในเทอมของ μ

ได้ชุดสมการสถานะในบทที่ 2 ใหม่ดังต่อไปนี้

1) สมการปัวซอง

$$\nabla^2 \psi = n - p - n_0 + p_0 \quad (3.1)$$

- 2) สมการความหนาแน่นกระแส
สำหรับ โฮล

$$\vec{J}_p = -\mu_p p \vec{\nabla}\psi - \mu_p \vec{\nabla}p \quad (3.2)$$

สำหรับ อิเล็กตรอน

$$\vec{J}_n = -\mu_n n \vec{\nabla}\psi + \mu_n \vec{\nabla}n \quad (3.3)$$

- 3) สมการความต่อเนื่อง
สำหรับ โฮล

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\vec{\nabla} \bullet \vec{J}_p - R_p + G_p \quad (3.4)$$

สำหรับ อิเล็กตรอน

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \vec{\nabla} \bullet \vec{J}_n - R_n + G_n \quad (3.5)$$

3.2.2 การปรับสมการสถานะ

สมการที่ผ่านการนอร์มาไลซ์แล้วจะถูกปรับเปลี่ยนด้วยค่าของศักย์ควอซีเฟอร์มี และตัวแปรสเกลทามเพื่อแปลงสมการสถานะในสมการ (3.1) - (3.5) ให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมในการนำไปตีสคริปต์ต่อไป โดยมีรายละเอียดการปรับเปลี่ยนสมการดังต่อไปนี้

ศักย์ควอซีเฟอร์มี [9,10,11,22] เป็นระดับศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงของพาหะเมื่ออยู่ในสภาพไม่สมดุลเชิงความร้อน (non-thermal equilibrium) โดย φ_p และ φ_n เป็นศักย์ควอซีเฟอร์มีของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ และเมื่อพาหะกลับเข้าสู่สมดุลเชิงความร้อนแล้ว ค่า φ_p และ φ_n จะลดไปสู่ระดับค่าศักย์ไฟฟ้าของเฟอร์มี สามารถเขียนความหนาแน่นของพาหะของอิเล็กตรอนและโฮลในสภาพไม่สมดุลเชิงความร้อนโดยอาศัยศักย์ควอซีเฟอร์มีได้ดังต่อไปนี้

สมการการแจกแจงความหนาแน่นของโฮลเมื่อเทียบกับระดับศักย์ควอซีเฟอร์มีของโฮล คือ

$$p = n_i \exp(q(\varphi_p - \psi)/kT) \quad (3.6)$$

ในการทำงานเดียวกัน สมการการแจกแจงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับระดับศักย์ควอซีเฟอร์มีของอิเล็กตรอน คือ

$$n = n_i \exp(q(\psi - \phi_n)/kT) \quad (3.7)$$

ในสมการ (3.6) และ (3.7) เมื่อนอร์มาไลซ์ค่า ψ , ϕ_p และ ϕ_n ด้วย kT/q และนอร์มาไลซ์ค่า n และ p ด้วย n_i ตามลำดับ จะได้สมการใหม่ได้เป็นดังนี้

$$p = \exp(\phi_p - \psi) \quad (3.8)$$

$$\text{และ } n = \exp(\psi - \phi_n) \quad (3.9)$$

จากตัวแปรสล็อตทอม [12] ที่นิยาม ϕ_p และ ϕ_n ดังต่อไปนี้

$$\phi_p = \exp(\phi_p) \quad (3.10)$$

$$\text{และ } \phi_n = \exp(-\phi_n) \quad (3.11)$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการความหนาแน่นของโฮล และอิเล็กตรอน จากสมการ (3.8) และ (3.9) ใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$p = \phi_p \exp(-\psi) \quad (3.12)$$

$$\text{และ } n = \phi_n \exp(\psi) \quad (3.13)$$

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ของค่าศักย์ควอซีเฟอร์มี และตัวแปรสล็อตทอม สามารถเขียนชุดสมการสถานะในสมการ (3.1) – (3.5) ได้ใหม่ดังต่อไปนี้

1) สมการปัวซอง

$$\nabla^2 \psi = \phi_n e^\psi - \phi_p e^{-\psi} - n_0 + p_0 \quad (3.14)$$

- 2) สมการความหนาแน่นกระแส
สำหรับ โฮล

$$\vec{J}_p = -\mu_p \exp(-\psi) \vec{\nabla} \phi_p \quad (3.15)$$

สำหรับ อิเล็กตรอน

$$\vec{J}_n = \mu_n \exp(\psi) \vec{\nabla} \phi_n \quad (3.16)$$

- 3) สมการความต่อเนื่อง
สำหรับ โฮล

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\vec{\nabla} \bullet \vec{J}_p - R_p + G_p \quad (3.17)$$

สำหรับ อิเล็กตรอน

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \vec{\nabla} \bullet \vec{J}_n - R_n + G_n \quad (3.18)$$

สมการ (3.14) – (3.18) เป็นชุดสมการสถานะที่ผ่านการนอร์มาไลซ์และปรับเปลี่ยนสมการแล้ว ซึ่งจะถูกนำไปตีสคริปต์สำหรับคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขในการจำลองแบบในเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์บนคอมพิวเตอร์

3.2.3 การตีสคริปต์สมการสถานะ

ชุดสมการสถานะทั้ง 3 ชุด ในสมการ (3.14) – (3.18) ที่ผ่านการนอร์มาไลซ์ และปรับเปลี่ยนสมการจากการใช้ค่าศักย์ควอซิเฟอร์มี และตัวแปรสล็อตบูม เป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับการตีสคริปต์ เพื่อแปลงจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไปเป็นสมการเชิงผลต่างโดยวิธีการประมาณ สำหรับใช้ในการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข และหาผลเฉลยด้วยการคำนวณบนคอมพิวเตอร์

ในการตีสคริปต์แยกการพิจารณาออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ 1) ตีสคริปต์สมการปัวซอง 2) ตีสคริปต์ตามเทคนิคของGummel 3) ตีสคริปต์สมการความหนาแน่นกระแส และ 4) ตีสคริปต์สมการความต่อเนื่อง โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.2.3.1 การตีสคริปต์สมการปัวซอง

การตีสคริปต์ของสมการปัวซองตามวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เพื่อแปลงระบบสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการเชิงผลต่าง ซึ่งได้จากการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ แล้วตัดเทอมที่มีอันดับสูงตั้งแต่ 2 ทั้ง สมการจะถูกตีสคริปต์ใน 2 ลักษณะ คือ การตีสคริปต์สมการปัวซองสำหรับกริดแบบตารางสี่

เหลี่ยม และ การดิสคริไตซ์สมการปัวส์ซงสำหรับกริดแบบไฟไนต์บล็อก แล้วจัดสมการให้อยู่ในตัวแปร ณ จุดที่ต้องการหาผลเฉลย โดยมีขั้นตอนดังนี้

จากสมการปัวส์ซง

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 y} = \rho \quad (3.19)$$

สามารถดิสคริไตซ์ให้อยู่สมการเชิงผลต่างสำหรับกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \nabla^2 \psi = & 2 \frac{\psi_N}{h_N(h_N+h_S)} + 2 \frac{\psi_S}{h_S(h_N+h_S)} + 2 \frac{\psi_E}{h_E(h_E+h_W)} + 2 \frac{\psi_W}{h_W(h_E+h_W)} \\ & - 2 \frac{(h_W h_E + h_N h_S)}{h_W h_E h_N h_S} \psi_K = \rho \end{aligned} \quad (3.20)$$

และจัดสมการ (3.20) ให้อยู่รูปของตัวไม่รู้ค่าในจุดที่หาผลเฉลย ดังนี้

$$\begin{aligned} \psi_K = & \frac{h_W h_E h_N h_S}{2(h_W h_E + h_N h_S)} \left[\frac{2\psi_N}{h_N(h_N+h_S)} + \frac{2\psi_S}{h_S(h_N+h_S)} + \frac{2\psi_E}{h_E(h_E+h_W)} + \frac{2\psi_W}{h_W(h_E+h_W)} \right. \\ & \left. - (n - p - n_o + p_o) \right] \end{aligned} \quad (3.21)$$

จากสมการ(3.21) จะเห็นว่าเมื่อต้องการหาผลเฉลยของ ψ ที่จุด K จะต้องอาศัยค่าของจุดเพื่อนบ้านที่อยู่รอบ 4 ทิศอีก 4 จุด คือ ψ_N , ψ_S , ψ_E และ ψ_W จึงจะหาผลเฉลยได้

สำหรับกริดแบบไฟไนต์บล็อกที่มีเพื่อนบ้านหายไป 1 จุด สามารถหาค่าจุดดังกล่าวได้จากการประมาณแบบเชิงเส้น (linear interpolation) ค่าของแกนที่อยู่ขนานข้างของจุดที่หายไป แล้วแทนค่าลงสมการ(3.21) โดยพิจารณาตัวอย่างดังต่อไปนี้

พิจารณาจากสมการปัวส์ซงในสมการ(3.21) โดยใช้รูปที่ 3.4 (ก) เป็นตัวอย่างในการพิจารณา จากรูปจุด ψ_K มีเพื่อนบ้าน 3 จุด คือ ψ_N , ψ_S และ ψ_E แต่ ψ_W ไม่มี ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากการประมาณเชิงเส้นระหว่าง ψ_{Nw} และ ψ_{Sw} ได้ดังนี้

$$\psi_W = \frac{h_N \psi_{Sw} + h_S \psi_{Nw}}{h_N + h_S} \quad (3.22)$$

เมื่อแทนสมการ (3.22) ลงใน สมการ (3.21) จะได้สมการปัวส์ซงที่ถูกดิสคริไตซ์สำหรับกริดแบบไฟไนต์บล็อก โดยเขียนสมการให้ในรูปของตัวไม่รู้ค่าในตำแหน่งของกริดที่ต้องการหาผลเฉลย ได้ดังนี้

$$\psi_K = \frac{h_W h_E h_N h_S}{2(h_W h_E + h_N h_S)} \left[\frac{2\psi_N}{h_N (h_N + h_S)} + \frac{2\psi_S}{h_S (h_N + h_S)} + \frac{2\psi_E}{h_E (h_E + h_W)} + \frac{2 \left[\frac{h_N \psi_{Sw} + h_S \psi_{Nw}}{h_N h_S} \right]}{h_W (h_E + h_W)} \right] - (n - p - n_o + p_o) \quad (3.23)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับกริดแบบไฟไนต์บล็อกที่มีแกนของเพื่อนบ้านในทิศอื่นหายไป ก็ใช้วิธีการประมาณค่าได้จากการประมาณเชิงเส้นค่าของแกนที่อยู่ข้างของแกนเพื่อนบ้านที่หายไป แล้วก็แทนค่าลงในสมการ (3.21) โดยการแทนลงในค่าของเพื่อนที่หายไป ก็จะได้สมการสำหรับกริดแบบไฟไนต์บล็อก

3.2.3.2 การตีสคริปต์ตามวิธีของ Gummel

การวิเคราะห์ตามวิธีของ Gummel [9] ใช้หลักการหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) (ψ_{exact}) โดยการเอาผลต่าง ที่เกิดจากค่าความผิดพลาดจากการคำนวณ $\delta(x)$ มารวมชดเชยกับค่าที่คำนวณได้ (trial solution) (ψ) วิธีนี้ไม่ได้หาค่าผลเฉลยออกมาตรงๆ แต่จะเป็นการหาค่าความผิดพลาดของแต่ละจุดกริด เพื่อมารวมกับค่าผลเฉลยเดิมที่คำนวณแล้วทำให้ได้ผลเฉลยมีความถูกต้องแม่นยำ มีสมการดังนี้

$$\psi_{\text{exact}} = \psi + \delta \quad (3.24)$$

โดยที่ ψ_{exact} คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง
 ψ คือ ค่าผลเฉลยที่คำนวณได้
 δ คือ ค่าความผิดพลาดจากการคำนวณ

เมื่อแทนค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการ (3.24) ลงในสมการปัวส์ซง (3.12) ได้สมการเป็น

$$\nabla^2 (\psi + \delta) = [\exp(\psi - \varphi_n + \delta)] - [\exp(\varphi_p - \psi - \delta)] - n_o + p_o + O^2(s) \quad (3.25)$$

เมื่อตัดเทอม $O^2(s)$ ทิ้ง และใช้การประมาณเทอมเอกโปแนนเชียล [11] โดยกระจายแบบเชิงเส้น ได้ค่า $\exp(\pm\delta) \approx 1 \pm \delta$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (3.25) ได้สมการเป็น

$$\nabla^2 (\psi + \delta) = [e^{(\psi - \varphi_n)} + \delta e^{(\psi - \varphi_n)}] - [e^{(\varphi_p - \psi)} - \delta e^{(\varphi_p - \psi)}] - n_o + p_o \quad (3.26)$$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในสมการอย่างง่าย [10] เพื่อหาค่าความผิดพลาด ณ จุดกริดที่ต้องการหาผลเฉลย ได้สมการเป็น

$$\nabla^2 \delta - a^2 \delta = b \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } a^2 &= \phi_n \exp(\psi) + \phi_p \exp(-\psi) = n + p \\ b &= -\nabla^2 \psi + \phi_n \exp(\psi) - \phi_p \exp(-\psi) - n_o + p_o \\ &= -\nabla^2 \psi + n - p - n_o + p_o \end{aligned}$$

เมื่อใช้สมการ (3.27) โดยใช้ 5 จุดกริดที่มีเพื่อนบ้าน 4 จุดกริด ตามวิธีของไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์
พิจารณาเทอม $\nabla^2 \psi$ ในสมการ (3.27) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \nabla^2 \psi &= \frac{2\psi_N}{h_N(h_N+h_S)} - \left[\frac{2}{h_N(h_N+h_S)} + \frac{2}{h_S(h_N+h_S)} \right] \psi_K + \frac{2\psi_S}{h_S(h_N+h_S)} \\ &+ \frac{2\psi_E}{h_E(h_E+h_W)} - \left[\frac{2}{h_W(h_E+h_W)} + \frac{2}{h_E(h_E+h_W)} \right] \psi_K + \frac{2\psi_W}{h_W(h_E+h_W)} \end{aligned} \quad (3.28)$$

ในทำนองเดียวกันเทอม $\nabla^2 \delta$ ในสมการ (3.27) ได้สมการเป็น

$$\begin{aligned} \nabla^2 \delta &= \frac{2\delta_N}{h_N(h_N+h_S)} - \left[\frac{2}{h_N(h_N+h_S)} + \frac{2}{h_S(h_N+h_S)} \right] \delta_K + \frac{2\delta_S}{h_S(h_N+h_S)} \\ &+ \frac{2\delta_E}{h_E(h_E+h_W)} - \left[\frac{2}{h_W(h_E+h_W)} + \frac{2}{h_E(h_E+h_W)} \right] \delta_K + \frac{2\delta_W}{h_W(h_E+h_W)} \end{aligned} \quad (3.29)$$

เมื่อแทนสมการ (3.28) และ (3.29) ลงในสมการ (3.27) ได้สมการเป็น

$$\begin{aligned} &\left\{ 2 \frac{(h_W h_E + h_N h_S)}{h_W h_E h_N h_S} \right\} + (n_K + p_K) \} \delta_K^{(m+1)} \\ &= \frac{2}{h_N(h_N+h_S)} [\delta_N^m + \psi_N^m - \psi_K^m] + \frac{2}{h_S(h_N+h_S)} [\delta_S^m + \psi_S^m - \psi_K^m] \\ &+ \frac{2}{h_E(h_E+h_W)} [\delta_E^m + \psi_E^m - \psi_K^m] + \frac{2}{h_W(h_E+h_W)} [\delta_W^m + \psi_W^m - \psi_K^m] \\ &- [n_K - p_K - n_o + p_o]^m \end{aligned} \quad (3.30)$$

โดยที่ $m+1$ คือ รอบการคำนวณในรอบปัจจุบัน
 m คือ รอบการคำนวณในรอบครั้งก่อน

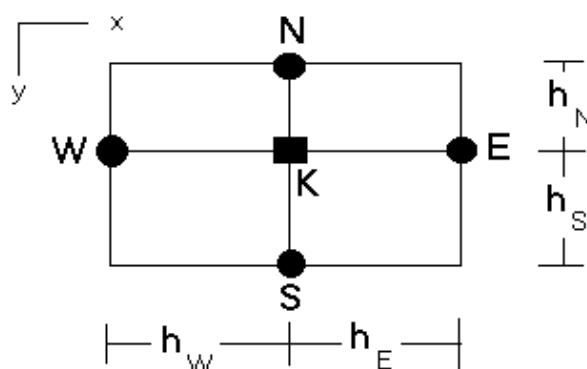
จากสมการ(3.30) จะเห็นว่าการแก้สมการจะเป็นการหาค่าความผิดพลาด ณ จุดที่ต้องการหาผลเฉลย แล้วนำไปแทนค่าในสมการ(3.24) ก็จะได้ผลเฉลย ณ จุดที่ต้องการ โดยค่าผิดพลาด ณ จุดที่ต้องการนั้นจะต้องใช้ค่าผิดพลาดของจุดกริดเพื่อนบ้านและค่าผลลัพธ์ของเพื่อนบ้านที่อยู่รอบ 4 ทิศด้วย และในการแก้สมการตามวิธี Gummel ต้องใช้วิธีการวนทำซ้ำของ Gummel ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.4.3 ต่อไป

เมื่อใช้วิธีของ Gummel ในกริดแบบไฟไนต์บล็อกที่มีเพื่อนบ้านหายไป 1 จุด สามารถหาค่าจุดดังกล่าวได้จากการประมาณแบบเชิงเส้นค่าของแกนที่อยู่ขนานข้างของจุดที่หายไป แล้วแทนค่าลงสมการ(3.30)

ค่า $\delta(x)$ ที่คำนวณได้จากสมการ (3.30) ถูกนำไปแทนค่าในสมการ (3.24) เพื่อรวมกับค่า ψ ที่คำนวณได้ในครั้งก่อนก็จะได้ผลเฉลยแม่นยำตรง (ψ_{exact}) โดยการคำนวณจะเป็นการวนทำซ้ำจนกว่าจะได้ ค่า $\delta \approx 0$ ซึ่งถือว่าสามารถคำนวณค่า ψ ไม่มีค่าผิดพลาดแล้ว และค่า δ จะต้องไม่เกิน 0.1

3.2.3.3 การดิสครีไทซ์สมการความหนาแน่นกระแส

การดิสครีไทซ์สมการความหนาแน่นกระแสตามเทคนิคของสล็อตบูม [10,11] ใช้การพิจารณาหาผลเฉลยของตัวไม่ทราบโดยอาศัยเพื่อนบ้าน 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ที่จุด K เป็นจุดที่ต้องการค่าผลเฉลยโดยคำนวณค่าจากเพื่อนบ้าน 4 จุด คือ N,E,S,W



รูปที่ 3.5 กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมที่ไม่สมมาตร โดยที่จุด K เป็นจุดที่หาผลเฉลยของความหนาแน่นกระแส ซึ่งต้องอาศัย เพื่อนบ้าน N, E, S และ W ในการคำนวณ

ในการคิดค่าความหนาแน่นกระแสตามวิธีสล็อตบูม เป็นการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสระหว่างจุดกริดที่หาผลเฉลยกับจุดกริดของเพื่อนบ้าน พิจารณาจากรูปที่ 3.5 ที่จุด K ค่าความหนาแน่นกระแสที่ไหลเข้าและออกทั้งหมดที่ถูกคำนวณ มี 4 องค์ประกอบ คือ J_{NK} , J_{KE} , J_{KS} , J_{WK}

โดยที่

J_{NK}, J_{WK} คือ ค่าหนาแน่นกระแสที่ไหลเข้าจุด K

J_{KE}, J_{KS} คือ ค่าหนาแน่นกระแสที่ไหลออกจากจุด K

เมื่อ J_{ij} คือ ค่าความหนาแน่นกระแส ที่ไหลจากจุด i ไป จุด j

การประมาณค่าความหนาแน่นกระแสวิธีนี้เป็นการศึกษาค่าระหว่าง 2 จุดที่กระแสไหล โดยถือว่าค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าคงที่ระหว่าง 2 จุดนั้น จากสมการ (3.15) ซึ่งเป็นสมการความหนาแน่นกระแสสำหรับโหนด มีสมการดังนี้

$$J^p_{ij} = -\mu_p \exp(-\psi) \frac{d\phi}{dx} \quad (3.31)$$

โดยที่ J_{ij} คือ ค่าความหนาแน่นกระแส ที่ไหลจากจุด i ไป จุด j และถือว่าค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าคงที่ระหว่าง จุด i และ จุด j

การดิสครีไทซ์สมการ (3.31) ใช้เทคนิคตามวิธีสล็อตทอม (ซึ่งมีรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข) โดยจะแก้สมการหาค่าความหนาแน่นกระแสจากการอินทิเกรตโดยให้ค่าสนามไฟฟ้าคงที่ระหว่าง 2 จุด i และ จุด j ได้ผลเฉลยดังต่อไปนี้

$$J^p_{ij} = \frac{-[\phi_{l+1} - \phi_l]}{\int_i^j (\gamma_p(s)) \exp(\psi(s)) ds} \quad (3.32)$$

ตามเทคนิคของสล็อตทอมใช้การประมาณในเทอมอินทิเกรตด้วยวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข และได้สมการความหนาแน่นกระแสสำหรับโหนดทั้ง 4 องค์ประกอบที่ไหลเข้าและออกจาก จุด K ดังต่อไปนี้

$$J^p_{KS} = -\frac{\mu_{KS}}{h_S} B(\psi_S - \psi_K) [p_S \exp(\psi_S - \psi_K) - p_K] \quad (3.33)$$

$$J^p_{NK} = \frac{\mu_{KN}}{h_N} B(\psi_N - \psi_K) [p_N \exp(\psi_N - \psi_K) - p_K] \quad (3.34)$$

$$J^p_{KE} = -\frac{\mu_{KE}}{h_E} B(\psi_E - \psi_K) [p_E \exp(\psi_E - \psi_K) - p_K] \quad (3.35)$$

$$J^p_{WK} = \frac{\mu_{KW}}{h_W} B(\psi_W - \psi_K) [p_W \exp(\psi_W - \psi_K) - p_K] \quad (3.36)$$

ในการทำงานเดียวกันค่าความหนาแน่นกระแสสำหรับอิเล็กตรอนในสมการ (3.14) สามารถตีสคริปต์ได้ดังนี้ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

$$J_{KS}^n = \frac{\mu_{KS}}{h_S} B(\psi_S - \psi_K) [n_S \exp(\psi_K - \psi_S) - n_K] \quad (3.37)$$

$$J_{NK}^n = -\frac{\mu_{KN}}{h_N} B(\psi_N - \psi_K) [n_N \exp(\psi_K - \psi_N) - n_K] \quad (3.38)$$

$$J_{KE}^n = \frac{\mu_{KE}}{h_E} B(\psi_E - \psi_K) [n_E \exp(\psi_K - \psi_E) - n_K] \quad (3.39)$$

$$J_{WK}^n = -\frac{\mu_{KW}}{h_W} B(\psi_W - \psi_K) [n_W \exp(\psi_K - \psi_W) - n_K] \quad (3.40)$$

โดยที่ $B(x)$ คือ Bernoulli function
มีค่าเป็น

$$B(x) = \frac{x}{\exp(x) - 1} \quad (3.41)$$

μ_{ij} คือ ค่าโมบิลิตีของพาหะ โดยพิจารณาที่จุดกึ่งกลางระหว่างจุด i และ j
 h_i คือ ระยะห่างระหว่างจุดที่พิจารณา (K) กับ จุด i

ความหนาแน่นกระแสที่คำนวณได้ จะถูกนำไปคำนวณในสมการความต่อเนื่อง สำหรับค่าโมบิลิตี (μ) ต้องคำนวณทุกครั้ง ก่อนที่จะคำนวณค่าความหนาแน่นกระแส ในงานวิจัยนี้ใช้ซิลิคอนเป็นวัสดุในการคำนวณเซลล์สุริยะ ซึ่งสามารถคำนวณค่า μ สำหรับซิลิคอนได้ดังนี้

3.2.3.4 การคำนวณค่าโมบิลิตีสำหรับซิลิคอน

ค่าโมบิลิตี (μ) เป็นอัตราส่วนของความเร็วดริฟท์ (drift velocity) กับสนามไฟฟ้า โดยค่าสนามไฟฟ้าคำนวณจากจุดกึ่งกลางระหว่างจุดที่พิจารณา(K) กับจุดเพื่อนบ้าน ตามทิศทางของฟลักซ์ไหล ค่าสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงทุก ๆ รอบของการคำนวณ ดังนั้นค่า μ จะต้องมีการคำนวณทุกรอบของการวนซ้ำ เพื่อนำไปคำนวณค่าความหนาแน่นกระแส ค่าโมบิลิตีสำหรับซิลิคอน ใช้ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณค่าตามวิธีของTatraporn [11] มีสมการดังนี้

$$\mu = \frac{v(E)}{\left| \frac{\partial \psi}{\partial X} \right|} \approx \frac{v(E)}{\left| \frac{\psi_K - \psi_i}{h_i} \right|} \quad (3.42)$$

โดยที่ $V(E)$ คือ ความเร็วทริฟซึ่งเป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้ามีค่า ดังนี้

$$v = \begin{cases} \mu_o E & , E^* \leq E_c \\ v_{\max} - \omega \exp[-(E^* - E_c)] & , E^* > E_c \end{cases} \quad (3.43)$$

โดยที่ $v_{\max} = 10^7$ cm/sec
 $\omega = 7 \times 10^6$ cm/sec
 $E_c = 2000$ V/cm
 $\mu_o = 1.5 \times 10^3$ cm²/V sec
 E^* คือ สนามไฟฟ้ายังผล (the effective field) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E^* = EE_1E_2 \quad (3.44)$$

โดยที่ E คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าของจุดที่พิจารณา(K) คำนวณจาก $\left| \frac{\psi_K - \psi_i}{h_i} \right|$

$$E_1 = \exp\{-[0.12763 \ln(p_o + n_o) - 5.40]^2\}.$$

E_2 มีค่าเป็น 1 สำหรับการหาค่า μ_n และ 0.32 สำหรับการหาค่า μ_p
 เมื่อ

ψ_i คือ สนามไฟฟ้าของเพื่อนบ้าน N, E, S, W

h_i คือ ระยะห่างจากจุดเพื่อนบ้าน N, E, S, W

3.2.3.5 การดีสคริไตซ์สมการความต่อเนื่อง

สมการความต่อเนื่องในสมการ (3.17) และ (3.18) ถูกดีสคริไตซ์ในรูป 5 จุดกริดที่มีเพื่อนบ้าน 4 จุดกริด ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ซึ่งมี 2 องค์ประกอบของความหนาแน่นกระแสไหลเข้าจุด K คือ J_{NK}, J_{WK} และมี 2 องค์ประกอบไหลออกจากจุด K คือ J_{KE}, J_{KS}

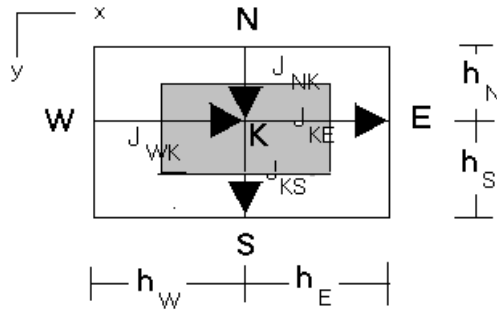
โดยที่

J_{NK} คือ ความหนาแน่นกระแสไหลจากทิศเหนือเข้ามาจุด K

J_{WK} คือ ความหนาแน่นกระแสไหลจากทิศตะวันตกเข้ามาจุด K

J_{KE} คือ ความหนาแน่นกระแสไหลจากจุด K ไปยังทิศตะวันออก

J_{KS} คือ ความหนาแน่นกระแสไหลจากจุด K ไปยังทิศใต้



รูปที่ 3.6 การไหลเข้าและออกจากจุดที่ต้องการหาผลเฉลี่ย (จุด K) ของสมการความต่อเนื่อง

พิจารณาเทอมไดเวอร์เจนซ์ (Divergent) ของสมการความต่อเนื่องใน 2 มิติ สำหรับโหนด ได้ถูกดิสครีไทซ์ตามเทคนิคของสล็อตทอม [10,11] ซึ่งได้ใช้วิธี Box Integration (มีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค) ได้สมการดังนี้

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p = \frac{(J_{KE} - J_{WK})}{\left(\frac{h_E + h_W}{2}\right)} + \frac{(J_{KS} - J_{NK})}{\left(\frac{h_N + h_S}{2}\right)} \quad (3.45)$$

สมการความต่อเนื่อง ที่ขึ้นกับเวลา การดิสครีไทซ์ใช้วิธีของ Crank-Nicolson [10] (รายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค)

ได้สมการความต่อเนื่องสำหรับโหนดดังนี้

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{(J_{KE}^p - J_{WK}^p)}{\left(\frac{h_E + h_W}{2}\right)} + \frac{(J_{KS}^p - J_{NK}^p)}{\left(\frac{h_N + h_S}{2}\right)} \right]^{(m+1)} + \left[\frac{(J_{KE}^p - J_{WK}^p)}{\left(\frac{h_E + h_W}{2}\right)} + \frac{(J_{KS}^p - J_{NK}^p)}{\left(\frac{h_N + h_S}{2}\right)} \right]^{(m)} \right\} \\ & + \frac{1}{\Delta t} [P^{(m+1)} - P^{(m)}] = -R + G \end{aligned} \quad (3.46)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนก็ได้

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{(J_{KE}^n - J_{WK}^n)}{\left(\frac{h_E + h_W}{2}\right)} + \frac{(J_{KS}^n - J_{NK}^n)}{\left(\frac{h_N + h_S}{2}\right)} \right]^{(m+1)} + \left[\frac{(J_{KE}^n - J_{WK}^n)}{\left(\frac{h_E + h_W}{2}\right)} + \frac{(J_{KS}^n - J_{NK}^n)}{\left(\frac{h_N + h_S}{2}\right)} \right]^{(m)} \right\} \\ & - \frac{1}{\Delta t} [n^{(m+1)} - n^{(m)}] = R - G \end{aligned} \quad (3.47)$$

โดยที่ $m+1$ คือ รอบการคำนวณในรอบปัจจุบัน
 m คือ รอบการคำนวณในรอบครั้งก่อน

เมื่อ $J_{NK}, J_{KE}, J_{KS}, J_{WK}$ ได้จากสมการความหนาแน่นกระแสในสมการ (3.33)–(3.36) สำหรับโฮล และ สมการ (3.37)–(3.40) สำหรับอิเล็กตรอน โดยใช้ μ_n และ μ_p ตามสมการ (3.43) และ (3.44)
 ในสมการความต่อเนื่องที่ขึ้นกับเวลามีค่าที่ต้องคำนวณด้วยคือ ขั้นเวลา(step time) และ ค่าอัตราการรวมตัว (recombination rate) และค่าอัตราการเกิด (generation rate) แต่ในงานวิจัยนี้ไม่นำค่าอัตราการเกิดมาคำนวณด้วย รายละเอียดของค่าขั้นเวลา และค่าอัตราการรวมตัวมีดังนี้

3.2.3.6 ขั้นเวลา (Time Step)

ขั้นเวลา (Δt) ในสมการความต่อเนื่อง เป็นเวลาที่ต้องคำนวณในรอบการทำซ้ำ โดย Δt ที่ใช้ต้องเหมาะสมไม่ทำให้พาหะเคลื่อนที่เลยพื้นที่ของจุดกริดของทุกจุด เพราะจะมีผลทำให้การคำนวณหาผลเฉลยลู่ออก (Diverge) ดังนั้นการพิจารณา Δt จะคิดจากเวลาที่น้อยที่สุดของการเคลื่อนที่ของพาหะและคิดจากพื้นที่ของกริดที่น้อยที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (D) จะใช้ค่าของอิเล็กตรอน เพราะอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เร็วกว่าโฮล ทำให้ Δt ที่คำนวณได้เหมาะสมทั้งอิเล็กตรอนและโฮล สมการในการคำนวณ Δt เป็นดังนี้

$$\Delta t_{\min} \leq (\text{พื้นที่ของกริดที่เล็กที่สุด} / \text{สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม})$$

$$\leq \frac{[(\Delta x)(\Delta y)]_{\min}}{D_n} \frac{cm^2}{(cm^2 / sec)} \quad (3.48)$$

โดยที่ D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของอิเล็กตรอนมีค่าดังนี้

$$D_n = \mu_n kT / q$$

และค่า μ_n คำนวณได้จากสมการ(3.42)

3.2.3.7 อัตราการรวมตัว (Recombination Rate)

การหาผลเฉลยสมการความต่อเนื่องต้องใช้ค่าอัตราการรวมตัว (R) ด้วยทุกครั้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R(x,y) = \frac{\Delta(pn)}{\tau(p+n)} \quad (3.49)$$

โดยที่

$\Delta(pn)$ คือ ค่าความต่างระหว่างผลคูณของ pn และ ค่า intrinsic value มีค่าเป็น $(pn - n_i^2)$

τ คือ carrier life time ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจากรายงานของ Tantraporn [28] มีค่าระหว่าง $10^{-12} - 10^{-3}$ วินาที

เมื่อ สมการ (3.47) ถูกนอร์มาไลซ์ด้วยค่า n_i^2 ได้สมการใหม่เป็น

$$R(x,y) = \frac{(pn - 1)}{\tau(p + n)n_i} \quad (3.50)$$

ค่า R จะต้องถูกคำนวณทุกจุดกริดที่ต้องการหาผลเฉลี่ยในสมการความต่อเนื่อง

3.3 การแก้ระบบสมการ

การตีสคริปต์สมการสถานะทำให้ได้สมการเชิงผลต่างสำหรับหาผลเฉลี่ยของ 1 จุดกริด ในโดเมนของปัญหามีการแบ่งพื้นที่ออกเป็นตาข่ายเล็กๆ ซึ่งมีหลายจุดกริด ดังนั้นการหาผลเฉลี่ยของจุดต่างๆ ทั้งหมดบนโดเมน ต้องนำทุกจุดกริดมาแก้สมการพร้อมกัน จึงเกิดเป็นระบบสมการที่จะต้องหาผลเฉลี่ยของทุกจุดกริดบนโดเมนของปัญหา

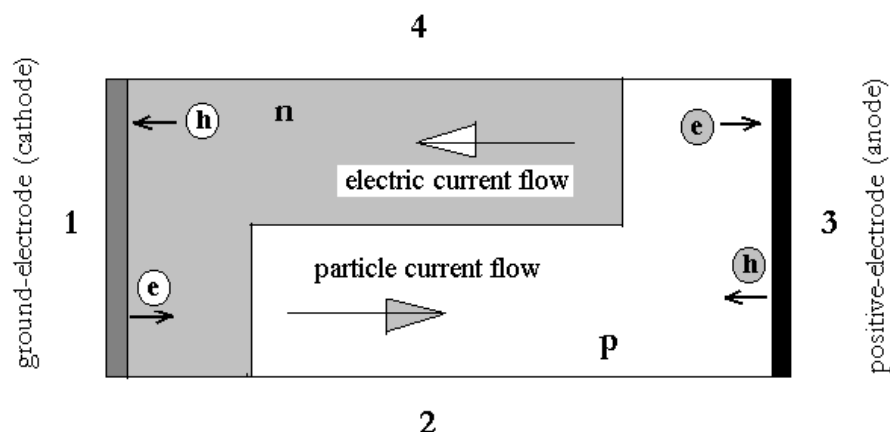
การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขจะต้องมีการให้ค่าเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหา โดยมีเงื่อนไขขอบเขต 2 ประเภทที่ต้องพิจารณาคือ เงื่อนไขขอบเขตของไดริชเลท (Dirichlet boundary condition) และเงื่อนไขขอบเขตของนอยแมนน์ (Neumann boundary condition) และเมื่อประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตให้กับปัญหาแล้วจึงสามารถที่จะหาผลเฉลี่ยบนโดเมนได้

การแก้ระบบสมการ เนื่องจากมีจุดกริดที่ต้องการหาผลเฉลี่ยมีหลายจุดด้วยกัน ต้องทำการแก้สมการพร้อมกันทุกจุดกริด จึงใช้วิธีการแก้ระบบสมการด้วยการวนทำซ้ำ ซึ่งเป็นการวนแก้สมการหลายครั้งจนได้ผลเฉลี่ยของทุกกริดบนโดเมนไม่มีการเปลี่ยนแปลงและถือว่าได้ผลเฉลี่ยที่ถูกต้องแล้ว

โดยรายละเอียดการใช้เงื่อนไขขอบเขตและวิธีแก้ระบบสมการด้วยการวนทำซ้ำ มีดังต่อไปนี้

3.3.1 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

ในการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ ต้องมีการให้ค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยจะพิจารณาจากขอบของเซลล์ที่เป็นรอยต่อ p-n ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ดังนี้



รูปที่ 3.7 เงื่อนไขขอบเขตของอุปกรณ์ รอยต่อ p-n

จากรูป 3.7 มีขั้วไฟฟ้าขนาบข้างของเซลล์ โดยขั้วแคโทด (Cathode) อยู่ด้านซ้าย และขั้วแอโนด (Anode) อยู่ด้านขวา เมื่อให้พาหะ (อิเล็กตรอน เป็นพาหะข้างมาก) เคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการจำลองแบบในอุปกรณ์วงจรรปิด ซึ่งจะจำลองแบบให้มีการไหลของกระแสตรงจากรายละเอียดดังกล่าวที่ขั้วไฟฟ้า [28] มีพฤติกรรมดังนี้

ขั้วแคโทด จะคอยจ่ายอิเล็กตรอนแก่เซลล์ตามที่เซลล์ต้องการ แต่จะทำหน้าที่ดูดโฮลออกจากเซลล์ด้วยอัตราที่ไม่จำกัดให้ออกอย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้าม ขั้วแอโนด ต้องจ่ายโฮลให้แก่เซลล์ตามจำนวนที่เซลล์ต้องการ แต่จะดูดอิเล็กตรอนด้วยอัตราที่ไม่จำกัดออกจากเซลล์ ในงานวิจัยนี้ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบ ohmic contact ซึ่งมีค่าแรงศักย์ต่ำ ทำให้อนุภาคไหลเข้าหรือออกจากเซลล์ได้สะดวกอย่างทันทีทันใด ตามความต้องการของเซลล์

เงื่อนไขขอบเขตของเซลล์มี 2 ประเภท [11,22,29] คือ เงื่อนไขขอบเขตของไดริชเลท (Dirichlet boundary condition) และเงื่อนไขขอบเขตของนอยแมนน์ (Neumann boundary condition) โดยเงื่อนไขขอบเขตแต่ละประเภทจะมีลักษณะดังนี้

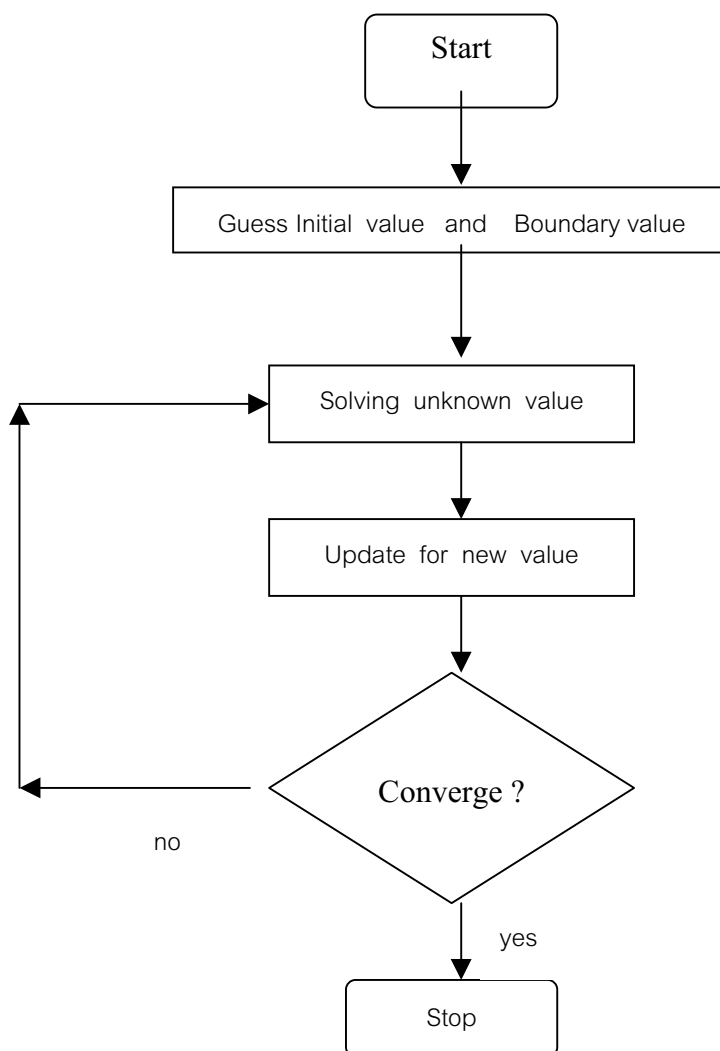
เงื่อนไขขอบเขตของไดริชเลท ใช้สำหรับจุดกริดที่วางตัวอยู่บนขอบของขั้วไฟฟ้า โดยจะเป็นการกำหนดค่าค่าคงที่ของศักย์ไฟฟ้าเท่านั้นให้กับขอบที่จุดกริดที่อยู่บนขอบของขั้วไฟฟ้า แต่ค่าสนามไฟฟ้าไม่สามารถกำหนดให้เป็นค่าคงที่ในจุดกริดที่อยู่บนขอบของขั้วไฟฟ้าได้ จากรูปที่ 3.7 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับหมายเลข 1 ที่เป็นขั้วแคโทดซึ่งเป็น ohmic contact กำหนดให้มีศักย์ไฟฟ้าคงที่เป็น 0.0 V ตลอดเวลา เพราะเป็นศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง ในหมายเลข 3 เป็นขั้วแอโนดและเป็น ohmic contact ให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับค่าที่ไบเอสตลอดเวลา

เงื่อนไขขอบเขตของนอยแมนน์ จะใช้สำหรับจุดกริดที่วางตัวอยู่ในขอบของฉนวน ซึ่งมีลักษณะดังนี้ คือ $\vec{\nabla}\psi \cdot \vec{\eta} = 0$, $\vec{J}_p \cdot \vec{\eta} = 0$, $\vec{J}_n \cdot \vec{\eta} = 0$ จึงเป็นเงื่อนไขสำหรับขอบหมายเลข 2 และ 4 ในรูปที่ 3.7 เมื่อ $\vec{\eta}$ คือ unit vector ที่ตั้งฉากกับขอบขอบฉนวน

3.3.2 การแก้ระบบสมการด้วยการวนทำซ้ำ

ชุดสมการสถานะที่ได้ผ่านการ discretize แล้ว ถูกนำมาหาผลเฉลยสำหรับการจำลองแบบในเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แซนดวิช โดยใช้วิธีการแก้ระบบสมการด้วยการวนทำซ้ำหาผลเฉลยของทุกจุดกริดบนโดเมนจนได้ผลเฉลยของทุกจุดกริดไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะพิจารณาวิธีการแก้ระบบสมการด้วยวิธีการทำซ้ำ 3 วิธีคือ 1) การทำซ้ำตามวิธีของ Jacobi 2) การทำซ้ำตามวิธีของ Gummel และ 3) การปรับเปลี่ยนวิธีของ Gummel

โดยขั้นตอนหลักๆ ในการแก้ระบบสมการด้วยการวนทำซ้ำคือในช่วงแรกของการแก้สมการจะต้องสุ่มค่าให้กับตัวไม่รู้ค่า (unknown) และให้ค่าเงื่อนไขขอบเขตของตัวแปรต่างๆ จากนั้นจะเข้าขั้นตอนการแก้ระบบสมการด้วยการวนทำซ้ำจนได้ค่าที่ลู่เข้าค่าที่ถูกต้อง ดังที่แสดงในรูปที่ 3.8 รายละเอียดวิธีแก้ระบบสมการของแต่ละวิธีมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 การแก้สมการระบบด้วยวิธีการวนทำซ้ำ

3.3.2.1 การวนซ้ำตามวิธีของ Jacobi

การวนซ้ำตามวิธีของ Jacobi มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ในสมการปัวส์ซง หาผลเฉลยได้โดยการหาค่าศักย์ไฟฟ้าใหม่ (ψ_K^{m+1}) จากค่าผลต่างของศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้ในรอบปัจจุบัน รวมกับค่าศักย์ไฟฟ้าในรอบก่อน โดยให้ (n_K) และ (p_K) เป็นค่าคงที่ [11] ดังสมการต่อไปนี้

$$\psi_K^{m+1} = \psi_K^m + V_K^m \quad (3.51)$$

โดยที่ V_K^m คือ ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้

ψ_K^m คือ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้ในรอบก่อน

ψ_K^{m+1} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้ในรอบปัจจุบัน

ในสมการความต่อเนื่อง ต้องคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_K) และค่าความหนาแน่นของโฮล (p_K) โดยให้ (ψ_K) เป็นค่าคงที่ โดยมีสมการสำหรับอิเล็กตรอนดังนี้

$$n_K^{m+1} = n_K^m + V_K^m \quad (3.52)$$

ในทำนองเดียวกันได้สมการสำหรับโฮลดังนี้

$$p_K^{m+1} = p_K^m + V_K^m \quad (3.53)$$

โดยที่ V_K^m คือ ผลต่างของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน(โฮล)ที่คำนวณได้

n_K^m และ p_K^m คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮล ที่คำนวณได้ในรอบก่อน

n_K^{m+1} และ p_K^{m+1} คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮล ที่คำนวณได้ในรอบปัจจุบัน

3.3.2.2 การวนซ้ำตามวิธีของ Gummel

การวนซ้ำตามวิธีของ Gummel [9] เป็นการแก้ระบบสมการที่เกิดจากการตีสคริปต์ของวิธี Gummel ในหัวข้อ 3.2.3.2 โดยวิธีแก้ระบบสมการด้วยการวนซ้ำของ Gummel ใช้การวนซ้ำหาค่าผิดพลาดจากการคำนวณในรอบปัจจุบันมารวมกับค่าที่คำนวณได้ในรอบก่อน เพื่อชดเชยให้ได้ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง ดังแสดงสมการต่อไปนี้

$$\psi_K^{m+1} = \psi_K^m + \delta_K^{m+1} \quad (3.54)$$

โดยที่ ψ_K^{m+1} คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำ
 ψ_K^m คือ ค่าที่คำนวณได้ในรอบก่อน
 δ_K^{m+1} คือ ค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้สมการ (3.30)

การวนซ้ำจะทำได้ค่า δ_K ทุกจุดกริดทั้งโดเมนมีค่าประมาณ 0.0 จึงหยุดการทำซ้ำ และการคำนวณในแต่ละรอบค่า δ_K จะต้องไม่เกิน 0.1

3.3.2.3 การปรับเปลี่ยนวิธีของ Gummel

วิธีนี้เป็นการดัดแปลงวิธีการของ Gummel เสนอโดย Sutherland [12] โดยใช้วิธีการของ SOR (Successive Over-Relaxation) เพื่อให้การลู่เข้าคำตอบเร็วขึ้น โดยใช้เฟคเตอร์ (ω) มาคูณ มีสมการดังต่อไปนี้

$$\psi_K^{m+1} = \psi_K^m + (\omega)\delta_K^{m+1} \quad (3.55)$$

โดยที่ δ_K^{m+1} คือ ค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้สมการ (3.30)

ψ_K^m คือ ค่าที่คำนวณได้ในรอบก่อน

ψ_K^{m+1} คือ ค่าที่คำนวณได้ในรอบปัจจุบัน

ω คือ เฟคเตอร์ที่คุณเข้าไป มีค่าระหว่าง 0 และ 2

ถ้า $\omega < 1$ คือ under-relaxation iteration

ถ้า $\omega = 1$ คือ การทำซ้ำตามวิธีของ Jacobi

ถ้า $\omega > 1$ คือ over-relaxation iteration

วิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับวิธีการทำซ้ำของ Jacobi ได้ โดยเอาค่า ω คูณกับค่าที่เป็นผลต่างของค่าที่คำนวณได้ในรอบปัจจุบัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\psi_K^{m+1} = \psi_K^m + (\omega)V_K^m \quad (3.56)$$

ชุดสมการสถานะที่ถูกดิสครีไทซ์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงผลต่างแล้วและวิธีการแก้ระบบสมการทั้ง 3 วิธี จะถูกนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมสำหรับการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนตวิช ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 5

บทที่ 4

การคำนวณแบบขนาน

การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขโดยการคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์ในปัญหาทั่วไปจะใช้วิธีการคำนวณด้วยโปรแกรมแบบลำดับ ซึ่งเป็นการคำนวณแบบลำดับชั้นบนคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว ถ้าระบบปัญหามีขนาดใหญ่ มีความซับซ้อน หรือมีตัวแปรไม่รู้ค่าที่ต้องแก้หาผลเฉลยหลายตัว จะต้องใช้เวลาในการคำนวณนานมาก ดังนั้นการคำนวณแบบขนานจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดเวลาในการคำนวณบนคอมพิวเตอร์ให้น้อยลง

การคำนวณแบบขนานคือการประมวลผลโดยการแบ่งปัญหาออกเป็นหลายส่วน แล้วกระจายปัญหาไปประมวลผลบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการประมวลผลจึงน้อยกว่าการคำนวณแบบลำดับชั้นบนคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว เพราะปัญหาถูกแบ่งออกเป็นหลายส่วนสำหรับคำนวณบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องก็จะได้ปัญหาเพียงส่วนเดียว เวลาในการประมวลผลจึงน้อยกว่าการคำนวณปัญหาทั้งโดเมนบนคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว

การคำนวณแบบขนานมีส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วนที่ต้องพิจารณา คือ 1) โครงสร้างของคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน มีหลายสถาปัตยกรรมด้วยกัน เช่น ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่มีโปรเซสเซอร์หลายตัวใช้หน่วยความจำรวม หรือ ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่มีโปรเซสเซอร์หลายตัวใช้หน่วยความจำแยก แต่ในงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างของคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานประเภทเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ที่เป็นการนำคอมพิวเตอร์เวิร์กสเตชันหลายตัวมาเชื่อมต่อกันด้วยเน็ตเวิร์กภายนอก 2) โปรแกรมแบบขนาน (Parallel program) เป็นโปรแกรมประยุกต์ที่ต้องพัฒนาขึ้นให้มีความสามารถทำงานแบบขนาน ในลักษณะที่สามารถแบ่งงานออกเป็นหลายๆ ส่วน เพื่อกระจายไปประมวลผลบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน

การนำคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหลายเครื่องมาเชื่อมต่อกันด้วยเน็ตเวิร์กภายนอก จะเป็นเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานได้ จะต้องใช้ซอฟต์แวร์ที่สร้างสภาพแวดล้อมให้สนับสนุนการทำงานแบบขนานเพื่อประสานให้คอมพิวเตอร์ทุกตัวในเครือข่ายทำงานร่วมกันอย่างแน่นแฟ้นเสมือนเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว มีซอฟต์แวร์ที่สร้างสภาพแวดล้อมหลายตัว เช่น Message Passing Interface (MPI) และ Parallel Virtual Machine (PVM) แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ PVM เป็นซอฟต์แวร์สร้างสภาพแวดล้อมการทำงานแบบขนานสำหรับประสานการทำงานของคอมพิวเตอร์ในเครือข่าย

โปรแกรมแบบขนาน เป็นโปรแกรมประยุกต์ที่ต้องพัฒนาขึ้นให้มีความสามารถประมวลผลแบบขนาน ให้ทำงานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานได้ โดยโปรแกรมจะต้องมีความสามารถแบ่งงานออกเป็นหลายๆส่วน เพื่อส่งไปประมวลผลบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน เมื่อมีการส่งข้อมูลระหว่างเครื่อง การสื่อสารภายในเครือข่ายจึงมีความสำคัญ ใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ด้วยกัน ในเครือข่ายมีคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง การรับส่งข้อมูลจะมีหลายครั้งและอาจเกิดการขัดจังหวะกันได้ ซึ่งทำให้ข้อมูลเสียหายได้ ดังนั้นโปรแกรมแบบขนานจึงต้องมีความสามารถในการเข้าจังหวะรับและส่งข้อมูลระหว่างเครื่อง และต้องไม่มีการขัดจังหวะในการส่งข้อมูลเพราะจะทำให้เกิดหน่วงเวลาในการคำนวณ

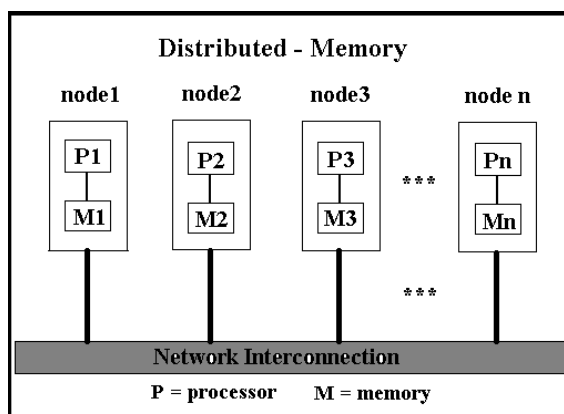
ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมแบบขนาน เพื่อจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์บนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานที่เชื่อมต่อกันด้วยเน็ตเวิร์กภายนอก การพัฒนาโปรแกรมจะต้องพิจารณาถึงวิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนๆ สำหรับนำไปคำนวณบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน และพิจารณาถึงวิธีการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ในเครือข่าย เพื่อให้สามารถเข้าจังหวะการรับและส่งข้อมูลไม่ให้เกิดการหน่วงกัน

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่ต้องพิจารณาเพื่อนำไปพัฒนาโปรแกรมแบบขนานสำหรับจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ โดยมียละเอียดที่ต้องพิจารณา 6 หัวข้อด้วยกันคือ 1) โครงสร้างของเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน เพื่อให้สามารถพัฒนาโปรแกรมให้ทำงานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานได้ 2) ซอฟต์แวร์ที่สนับสนุนสภาพแวดล้อมการทำงานแบบขนาน เพื่อให้เครือข่ายคอมพิวเตอร์สามารถทำงานแบบขนานได้ 3) การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ ให้สามารถทำงานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์ได้ 4) วิธีการแบ่งข้อมูลของปัญหาออกเป็นส่วนๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับโดเมนของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ 5) วิธีการสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง เพื่อให้เกิดจังหวะในการรับและส่งข้อมูล และ 6) วิธีการวัดประสิทธิภาพของเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานและโปรแกรมแบบขนานที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 เครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน

เครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน [41] ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่จัดตั้งขึ้นในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งเป็นการนำคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจำนวน 16 เครื่อง มาเชื่อมต่อกันผ่านเครือข่ายเน็ตเวิร์กภายนอก มีลักษณะเหมือนระบบแลน (LAN) ธรรมดา แต่เครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบขนานต่างจากแลนที่มีความสามารถประมวลผลแบบขนานได้ โดยการใช้อุปกรณ์ที่สนับสนุนสภาพแวดล้อมแบบขนาน เพื่อประสานการทำงานให้คอมพิวเตอร์ทุกตัวในเครือข่ายทำงานรวมกันเสมือนเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์เครื่องเดียว และใช้อุปกรณ์ PVM เป็นซอฟต์แวร์สร้างสภาพแวดล้อมแบบขนาน

เครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานในลักษณะดังกล่าว มีลักษณะเสมือนเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบขนานประเภทหลายโปรเซสเซอร์ใช้หน่วยความจำแยก (Distributed Memory Multi-processors) แต่ในซูเปอร์คอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน มีโปรเซสเซอร์หลายตัวอยู่ในคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว ในแต่ละโปรเซสเซอร์จะมีหน่วยความจำใช้เฉพาะของแต่ละโปรเซสเซอร์ และทุกโปรเซสเซอร์เชื่อมต่อกันด้วยเน็ตเวิร์กภายใน ส่วนในระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบขนานเป็นการนำคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจำนวนหลายเครื่องมาเชื่อมกันผ่านเน็ตเวิร์กภายนอก จึงมีลักษณะคล้ายกัน คือมีคอมพิวเตอร์หลายตัว แต่ละตัวจะมีโปรเซสเซอร์และหน่วยความจำของตัวเอง แต่เชื่อมต่อกันด้วยเน็ตเวิร์กภายนอกแทน โดยมีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานประเภทหลายโปรเซสเซอร์ใช้หน่วยความจำแยก



รูปที่ 4.1 เครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานประเภทหลายโปรเซสเซอร์ใช้หน่วยความจำแยก

การทำงานของเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานจะเป็นการกระจายงานขนาดใหญ่ไปคำนวณบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกันบนเครือข่าย โดยคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องจะทำการประมวลผลกับข้อมูลที่ได้รับเท่านั้น และทุกเครื่องก็ทำการคำนวณไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งเป็นลักษณะของการประมวลผลแบบขนาน และโปรแกรมประยุกต์ที่สามารถทำงานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบขนานได้จะต้องเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถประมวลผลแบบขนานได้เท่านั้น คือโปรแกรมต้องมีความสามารถแบ่งงานออกเป็นส่วน ๆ แล้วส่งไปคำนวณบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกันได้

การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลด้วยเน็ตเวิร์กภายนอกเพื่อเป็นเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานในลักษณะดังกล่าว จะมีราคาต่ำกว่าซูเปอร์คอมพิวเตอร์มาก แต่มีสมรรถนะเทียบเท่ากับซูเปอร์คอมพิวเตอร์ราคาแพง ๆ และยังสามารถเพิ่มจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์ในเครือข่ายได้อีกตามความต้องการ

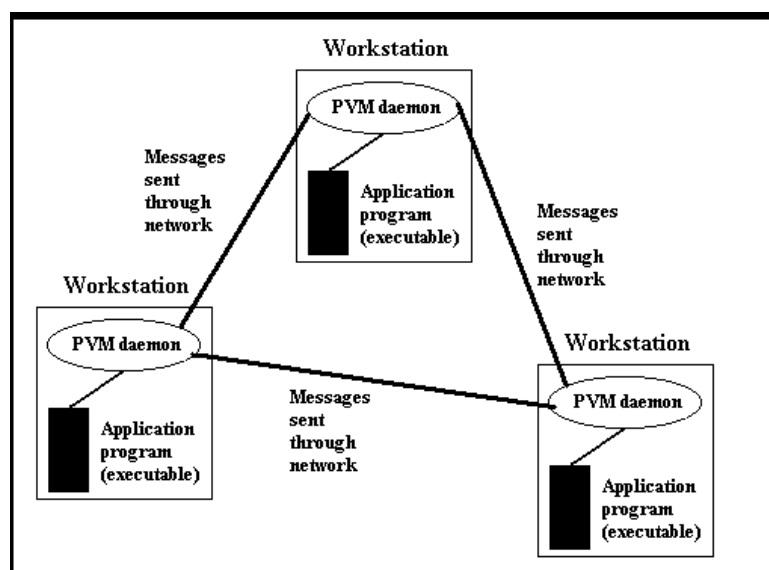
4.2 Parallel Virtual Machine (PVM)

PVM [15] เป็นซอฟต์แวร์ที่ประสานการทำงานให้คอมพิวเตอร์ทุกตัวในเครือข่ายทำงานร่วมกัน โดยทำหน้าที่สร้างสภาพแวดล้อมเพื่อสนับสนุนให้คอมพิวเตอร์ในเครือข่ายสามารถติดต่อและส่งข้อมูลถึงกันได้ การทำงานของ PVM เป็นการทำงานที่อยู่ด้านหลัง เรียกว่า Daemon ซึ่งทำหน้าที่สร้างสภาพแวดล้อมให้คอมพิวเตอร์ทุกตัวมองเห็นกันและสื่อสารกันภายในเครือข่าย โดยการติดต่อกันระหว่างคอมพิวเตอร์ในเครือข่ายจะเป็นการติดต่อระหว่าง Daemon กับ Daemon ของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง ดังนั้นคอมพิวเตอร์ทุกตัวจะต้องติดตั้งซอฟต์แวร์ PVM เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องสามารถประสานการทำงานได้ การติดต่อระหว่าง Daemon กับ Daemon ของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่ทำงานอยู่บน Daemon เป็นแบบส่งผ่านข้อความ (Message Passing)

โปรแกรมประยุกต์ที่สามารถประมวลผลแบบขนานได้ จะทำงานอยู่บน Daemon โดยการพัฒนาโปรแกรมจะต้องเรียกใช้ Library ของ PVM เพื่อให้สามารถทำงานบนสภาพแวดล้อมของ PVM ได้ เพราะการรับและส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำอยู่บน Daemon และ Library ของ PVM สำหรับพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ให้ทำงานแบบขนานจะมีสำหรับภาษา C และ ภาษา Fortran เท่านั้น

การทำงานแบบขนานของโปรแกรมประยุกต์จะเป็นการกระจายงานขนาดใหญ่เพื่อส่งไปคำนวณพร้อมๆ กันบนคอมพิวเตอร์ในเครือข่าย ที่มีการติดต่อสื่อสารเพื่อส่งข้อมูลแลกเปลี่ยนกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมประยุกต์ต้องใช้ Library ของ PVM สำหรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่อง ที่เป็นแบบส่งผ่านข้อความ ผ่านบนสภาพแวดล้อมของ PVM ที่ได้เตรียมไว้บนคอมพิวเตอร์ทุกเครื่อง

การทำงานในลักษณะดังกล่าว ทำให้คอมพิวเตอร์ในเครือข่ายสามารถติดต่อถึงกัน สามารถส่งข้อมูลของ ปัญหาไปคำนวณในคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน มีลักษณะการทำงานเสมือนเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์ เครื่องเดียว



รูปที่ 4.2 การทำงานของสภาพแวดล้อมของPVM ที่ใช้ daemon ในการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ทุกเครื่องเพื่อ สร้างสภาพแวดล้อมให้เป็นเสมือนเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์เครื่องเดียว และโปรแกรมประยุกต์จะ ทำงานบน daemon ซึ่งทำงานสนับสนุนอยู่ด้านหลัง

4.3 การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์

การพัฒนาโปรแกรมแบบขนานเพื่อให้ทำงานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานที่ใช้สภาพแวดล้อมของ PVM ต้องเป็นการเขียนโปรแกรมแบบส่งผ่านข้อความ (Message Passing) และโปรแกรมต้องมีความสามารถกระจายงานขนาดใหญ่ไปคำนวณบนคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง ดังนั้นต้องมีการออกแบบอัลกอริทึมแบบขนานเพื่อการกระจายงานไปคำนวณพร้อมกันบนโปรเซสเซอร์หลายตัว โดยการแบ่งงานจะเป็นการแบ่งปัญหาออกเป็นส่วนๆ ไปประมวลผลบนคอมพิวเตอร์มีฟังก์ชันการคำนวณที่เหมือนกันทุกเครื่อง แต่คำนวณกับข้อมูลที่ต่างกันเรียกว่า Single Instruction Multiple Data (SIMD)

ในงานวิจัยนี้ใช้โมเดลของ Master-Slave Model [19] สำหรับพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ ที่ต้องแบ่งคอมพิวเตอร์ในเครือข่ายเป็น 2 ส่วน คือ 1) คอมพิวเตอร์เครื่องแม่ 2) คอมพิวเตอร์เครื่องลูก โดยคอมพิวเตอร์เครื่องแม่ (Master) จะมีจำนวน 1 เครื่อง และคอมพิวเตอร์เครื่องลูก (Worker) มีจำนวนตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไป การเขียนโปรแกรมได้แยกการพัฒนาออกเป็น 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมแม่สำหรับทำงานบน

คอมพิวเตอร์เครื่องแม่ และโปรแกรมลูกสำหรับทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ซึ่งทั้ง 2 โปรแกรมต้องมีความสัมพันธ์ในการทำงาน โดยโปรแกรมแม่จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด ตั้งแต่สั่งให้ระบบเริ่มทำงาน ติดต่อกับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกให้เริ่มทำงาน เตรียมข้อมูลสำหรับจ่ายงานไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่อง รอรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์เครื่องลูกมาเก็บรวบรวมเข้าไฟล์ และสั่งหยุดการทำงานของระบบ ส่วนโปรแกรมลูกทำหน้าที่หลักในการคำนวณข้อมูลที่รับมาจากเครื่องแม่ ในการแบ่งงานจะมีข้อมูลบางส่วนที่ต้องใช้ร่วมกันในระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการติดต่อสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลกัน โดยโปรแกรมลูกจะมีฟังก์ชันการทำงานที่เหมือนกัน ซึ่งจะทำงานพร้อมกันและขนานกันไป แต่จะทำงานกับข้อมูลที่ต่างกัน โดยเป็นข้อมูลที่ได้รับเท่านั้น ตามเทคนิคของ SIMD โดยการทำงานของเครือข่ายคอมพิวเตอร์จะต้องนำโปรแกรมแม่ไปเก็บในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์เครื่องแม่ และโปรแกรมลูกไปเก็บในหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่อง โดยการสั่งให้ระบบทำงานเป็นหน้าที่ของโปรแกรมแม่ที่อยู่บนคอมพิวเตอร์เครื่องแม่

เนื่องจากโปรแกรมแบบขนานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เป็นการส่งข้อความผ่านระบบเน็ตเวิร์ก ซึ่งจะมีการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วน ๆ เพื่อส่งข้อมูลระหว่างกันของคอมพิวเตอร์ในเครือข่าย ดังนั้นสิ่งที่จะต้องพิจารณาเพื่อให้เกิดความเร็วสูงสุดในการทำงานของเครือข่ายคือ

- 1) ลดการสื่อสารในเครือข่ายให้น้อยที่สุด เพราะในเครือข่ายคอมพิวเตอร์เป็นการเชื่อมต่อด้วยเน็ตเวิร์กภายนอกดังนั้นการติดต่อสื่อสารจะช้ากว่าระบบเน็ตเวิร์กภายใน จึงต้องมีการออกแบบให้โปรแกรมมีการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ให้น้อยที่สุด และส่งข้อมูลที่จำเป็นเท่านั้น ถ้าโปรแกรมมีการติดต่อส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์มากก็จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายลดลง

- 2) แบ่งข้อมูลให้มีขนาดเท่า ๆ กัน สำหรับจ่ายให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูก เพราะการได้รับข้อมูลที่เท่าๆกัน เกิด Load Balancing ทำให้เครื่องลูกทุกเครื่องใช้เวลาเวลาการทำงานเท่ากัน จึงไม่เกิดการหน่วงกันเนื่องจากการรอข้อมูล

- 3) การสื่อสารในเครือข่ายต้อง synchronize กัน เพื่อให้การรับและส่งข้อมูลไม่มีการขัดจังหวะกันหรือเกิดการหน่วงกัน

จากลักษณะทั้ง 3 ข้อ จะต้องพิจารณาในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ สำหรับทำงานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน แล้วทำให้เวลาการคำนวณน้อยที่สุด ถ้าการพัฒนาของทั้ง 3 ข้อทำได้ไม่ดี จะทำให้การคำนวณใช้เวลามากขึ้น ซึ่งอาจมากกว่าเวลาที่ใช้คำนวณบนคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียวของโปรแกรมแบบลำดับ

4.4 การแบ่งข้อมูล (Domain Decomposition)

การแบ่งข้อมูล [19] คือ การแบ่งปัญหาบนโดเมนออกเป็นส่วนๆ เพื่อแจกจ่ายไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์บนเครือข่ายพร้อมกัน การที่จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนๆ จะต้องมีการออกแบบวิธีการแบ่งโดเมน เพื่อให้ได้โปรแกรมแบบขนานมีประสิทธิภาพสูงในการแก้ปัญหา โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยด้วยวิธีการเชิงตัวเลข ดังนั้นสิ่งที่ต้องเผชิญในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์บนคอมพิวเตอร์แบบขนาน คือ 1) load balancing 2) การแบ่งโดเมนที่มีความซับซ้อน 3) การส่งข้อมูลระหว่างเครื่อง ถ้าสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ จะทำให้การคำนวณแบบขนานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยพิจารณาต่อไปนี้

Load Balancing [19] มีความสำคัญในการคำนวณแบบขนานมาก เพราะถ้าคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องได้รับข้อมูลขนาดเท่าๆกัน ก็สามารถที่จะประมวลผลเสร็จได้พร้อมๆกัน สามารถเข้าจังหวะในการส่งและรับข้อมูล ทำให้มีประสิทธิภาพในการคำนวณ ถ้าคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องได้ข้อมูลไม่เท่ากันการประมวลผลจะเสร็จไม่พร้อมกัน ต้องมีการรอในการรับส่งข้อมูล ทำให้เกิดการขัดจังหวะการสื่อสาร มีผลทำให้ประสิทธิภาพการคำนวณลดลง

สิ่งที่ต้องพิจารณาเพื่อทำให้เกิด Load Balancing คือ

1. การแบ่งข้อมูลให้ได้ขนาดข้อมูลเท่ากัน
2. วิธีการติดต่อรับและส่งข้อมูลให้ได้จังหวะ

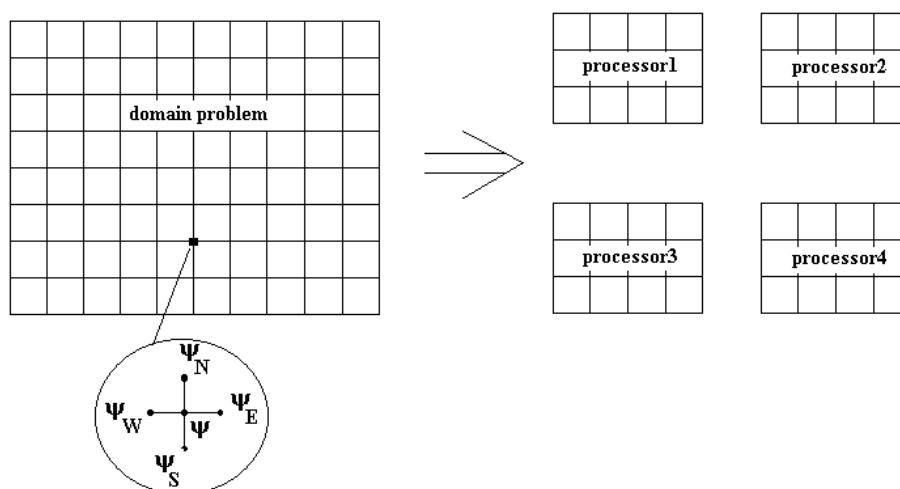
ในการแบ่งข้อมูลเพื่อให้ได้จำนวนข้อมูลเท่ากันสำหรับคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องนั้น จะต้องออกแบบวิธีการแบ่งข้อมูลให้เหมาะสมกับปัญหา ถ้าในปัญหามีโดเมนที่ถูกสร้างกริดด้วยตารางสี่เหลี่ยมสม่ำเสมอทั้งโดเมน วิธีการแบ่งโดเมนสามารถแบ่งได้จากพื้นที่ แต่ถ้าโดเมนกำหนดกริดให้เป็นแบบไฟไนต์บล็อก หรือ ไฟไนต์เอลิเมนต์ การแบ่งโดเมนให้ได้จำนวนข้อมูลเท่ากันจะยากมาก

ถ้าแบ่งโดเมนแล้วคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องได้รับข้อมูลไม่เท่ากัน จะทำให้การติดต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์มากขึ้นเพราะต้องแชร์ข้อมูลกัน และจะทำให้การรับส่งข้อมูลไม่ synchronize นำมาซึ่งปัญหาของ Load Balancing เพื่อความเข้าใจในการแบ่งโดเมนของปัญหาที่สร้างกริดสำหรับวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ จะอธิบายวิธีการแบ่งโดเมนของสมการปัวส์ซองบนโดเมนที่ติกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมสม่ำเสมอ ดังต่อไปนี้

พิจารณาสมการปัวส์ซอง

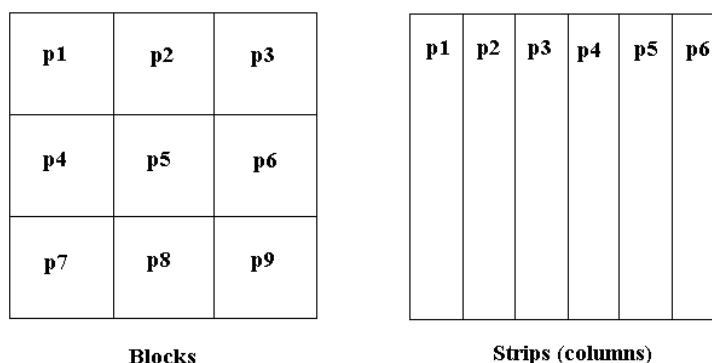
$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial^2 y} = \rho(x, y) \quad (4.1)$$

จากสมการ (4.1) การแก้สมการด้วยวิธีการเชิงตัวเลขบนคอมพิวเตอร์ต้องกำหนดกริดบนโดเมนดังแสดงในรูป 4.3 และการแก้สมการหาผลเฉลยบนคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน โดเมนต้องถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ เพื่อนำไปคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน



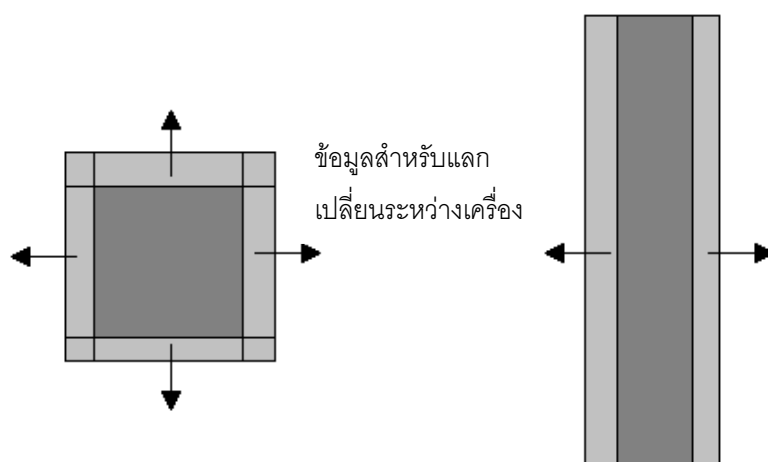
รูปที่ 4.3 การแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนๆ แล้วกระจายไปให้คอมพิวเตอร์หลายเครื่องทำการคำนวณพร้อมกัน ในการหาผลเฉลยของสมการ ปัวส์ซอง

จากรูปที่ 4.3 โดเมนของปัญหาไม่มีความซับซ้อน และกริดที่ใช้เป็นแบบตารางสี่เหลี่ยม การแบ่งโดเมนเพื่อให้ได้จำนวนข้อมูลเท่ากันจึงไม่มีความยุ่งยากและวิธีการแบ่งโดเมนสามารถแบ่งได้จากพื้นที่ของโดเมน [19] โดยใช้พื้นที่แบบบล็อก (Blocks) หรือแบบสตริบ (Strips) ในแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้ ได้แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วน ๆ ตามพื้นที่แบบบล็อก (blocks) และแบบสตริบ (strips)

เมื่อข้อมูลถูกแบ่งและถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ข้อมูลแต่ละส่วนจะถูกคำนวณบนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่อง โดยข้อมูลแต่ละส่วนจะถูกเก็บในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง ในช่วงการคำนวณสมการปัวซองจะต้องใช้จุดกริดเพื่อนบ้าน 4 จุดกริดที่อยู่โดยรอบทั้ง 4 ทิศ ซึ่งบางจุดอาจอยู่ในหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์เครื่องอื่น ดังนั้นจึงต้องมีการติดต่อสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ค่าที่ใช้คำนวณครบ 4 จุดกริด ส่วนมากข้อมูลที่จะต้องแลกเปลี่ยนจะเป็นข้อมูลที่ขอบของแต่เครื่อง ถ้าแบ่งข้อมูลแบบ block จะมีข้อมูลที่ต้องแลกเปลี่ยนอยู่ที่ขอบ 4 ด้าน แต่ถ้าแบบ strip จะมีข้อมูลที่ต้องแลกเปลี่ยนอยู่ที่ขอบ 2 ด้าน ดังแสดงในรูป 4.5 ดังนั้นคอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องจะต้องเตรียมข้อมูลสำหรับแลกเปลี่ยนกับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นและต้องเตรียมพื้นที่หน่วยความจำสำหรับรับข้อมูลที่คอมพิวเตอร์เครื่องอื่นส่งมาให้ เพื่อให้ได้ข้อมูลในการคำนวณจุดกริดมีครบทั้ง 4 จุด จึงทำให้สามารถคำนวณสมการปัวซองได้



รูปที่ 4.5 การเตรียมข้อมูลที่ขอบสำหรับแลกเปลี่ยนกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยแบบบล็อก มีข้อมูลที่ต้องแลกเปลี่ยนกัน 4 ด้าน ส่วนแบบสตริบ มีข้อมูลที่ต้องแลกเปลี่ยนกัน 2 ด้าน

4.5 การติดต่อสื่อสาร

การคำนวณแบบขนานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน ต้องมีการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ และในเครือข่ายที่ใช้ซอฟต์แวร์สภาวะแวดล้อมของ PVM จะเป็นการส่งข้อมูลแบบส่งผ่านข้อความ โปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาด้วย Master-Slave Model จะมีการส่งข้อมูลอยู่ 2 ช่วง คือช่วงแรกเป็นการส่งข้อมูลของคอมพิวเตอร์เครื่องแม่เพื่อแจกจ่ายข้อมูลไปยังเครื่องลูกทุกเครื่อง ก่อนที่จะมีการคำนวณ และช่วงที่ 2 เป็นการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกด้วยกัน ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนข้อมูลขณะที่มีการคำนวณข้อมูล เนื่องจากมีข้อมูลบางส่วนที่ overlapped กัน อาจจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันหลายครั้ง และคอมพิวเตอร์หลายเครื่องพร้อมกัน

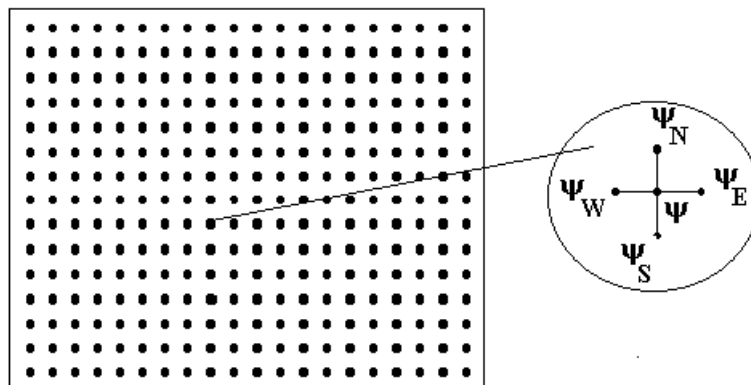
การสื่อสารเป็นตัวจำกัดประสิทธิภาพในการคำนวณบนระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน เพราะถ้ามีการส่งข้อมูลกันหลายครั้งมากจะทำให้ประสิทธิภาพการคำนวณลดลง หรืออาจจะใช้เวลาการส่งข้อมูลมากกว่าเวลาการคำนวณก็ได้ จะทำให้เวลาการทำงานอาจจะมากกว่าการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว และในเครือข่ายมีคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง จึงมีความจำเป็นที่จะมีการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง อาจจะทำให้เกิดความขัดแย้งในการส่งข้อมูลได้ เพื่อให้การส่งข้อมูลมีจำนวนน้อยครั้งที่สุด ใช้เวลาในการส่งข้อมูลด้วย และต้องไม่เกิดการขัดจังหวะในการส่งข้อมูลกันในคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง โดยมีสิ่งที่จะต้องพิจารณาในการสื่อสารอยู่ 2 ส่วน คือ 1) การส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อพิจารณาถึงเหตุผลที่จะต้องส่งข้อมูล ข้อมูลส่วนที่จะต้องส่งแลกเปลี่ยนกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ และการเตรียมข้อมูลสำหรับแลกเปลี่ยนระหว่างคอมพิวเตอร์ 2) วิธีการส่งและรับข้อมูล เพื่อไม่ให้เกิดความขัดแย้งในระหว่างการส่งข้อมูลในคอมพิวเตอร์หลายเครื่องบนเครือข่าย และสามารถที่จะเข้าจังหวะในการส่งและรับข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์โดยไม่ให้ขัดจังหวะกัน พิจารณารายละเอียดของแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

4.5.1 การส่งข้อมูลระหว่างเครื่อง

ในหัวข้อนี้จะเป็นพิจารณาถึงเหตุผลที่จะต้องมีการส่งข้อมูลแลกเปลี่ยนกันระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกด้วยกัน และพิจารณาข้อมูลส่วนที่จะต้องถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องอื่น เพื่อความเข้าใจ พิจารณาสมการปัวซองเป็นตัวอย่าง เมื่อสมการปัวซองถูกดิสครีไทซ์ตามวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงผลต่าง สำหรับกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมที่สมมาตรมีขนาดกริดเท่ากันตลอดทั้งโดเมน เมื่อดิสครีไทซ์แล้วจัดให้อยู่ในรูปสมการในจุดกริดที่ต้องการหาผลเฉลย ได้สมการดังนี้

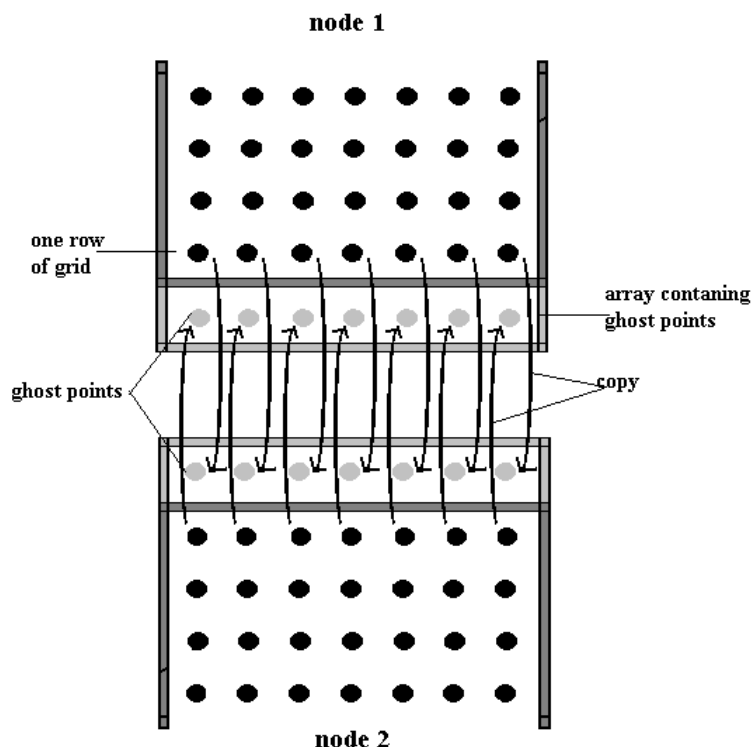
$$\psi_K = \frac{\psi_N + \psi_E + \psi_W + \psi_S}{4} \quad (4.2)$$

จากสมการ(4.2) จะเห็นว่าเมื่อต้องการหาค่าผลเฉลยในจุดที่ต้องการคำตอบ จะต้องอาศัยจุดกริดเพื่อนบ้านที่อยู่รอบข้าง 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กริดของโดเมนปัญหาแบบไฟไนต์เฟอเรนซ์ ที่ต้องใช้กริด 5 จุด (เป็นเพื่อนบ้าน 4 จุด) ในการหาผลเฉลย

พิจารณาจากสมการ (4.2) และรูปที่ 4.6 เมื่อโดเมนของปัญหา [19] ถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ (Domain decomposition) เพื่อแจกจ่ายไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องลูกหลายเครื่อง คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องก็จะทำการคำนวณเฉพาะข้อมูลที่ได้รับเท่านั้น แต่ทำการคำนวณพร้อมกัน ที่ขอบของแต่ละโดเมนย่อยในแต่ละคอมพิวเตอร์เครื่องลูกจะมีบางส่วนของจุดที่ใช้ในการคำนวณขาดหายไป ซึ่งต้องให้คอมพิวเตอร์ที่มีข้อมูลจุดนั้นส่งมาให้ และคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องก็จะมีส่วนของกริดขาดหายไป จึงต้องมีการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ และต้องมีการเข้าจังหวะในการแลกเปลี่ยนข้อมูลในคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง เพื่อที่จะไม่ให้เกิดการล้มเหลวของการสื่อสาร หรือเกิดการหน่วงกันของการส่งข้อมูล การส่งและรับข้อมูลที่ไม่ได้จังหวะกันทำให้เวลาการทำงานของโปรแกรมมากขึ้น มีผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานลดลง



รูปที่ 4.8 การส่งข้อมูลที่ขอบของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง โดยคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องต้องเตรียมข้อมูลที่ขอบสำหรับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นก่อน แล้วจากนั้นก็ส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์ที่ต้องการข้อมูล โดยต้องเตรียมหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลที่รับมา เรียกข้อมูลที่รับมาจากเครื่องอื่นว่า จุดผี (ghost point)

ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ขอบระหว่างคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง ข้อมูลที่รับมาจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำที่เป็น จุดผี ดังแสดงในรูปที่ 4.8

โดยมีจังหวะการส่งและรับข้อมูลดังนี้

คอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องจะต้องเตรียมข้อมูลที่ขอบสำหรับส่งไปคอมพิวเตอร์ที่อยู่รอบข้าง และเตรียมหน่วยความจำสำหรับรับข้อมูลจากจุดผีมาเก็บไว้ในเครื่องตัวเอง มีจังหวะการรับข้อมูลดังนี้

จังหวะที่ 1) คอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่องต้องส่งข้อมูลที่ขอบไปให้คอมพิวเตอร์รอบข้างที่ต้องการข้อมูล

จังหวะที่ 2) คอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องรับข้อมูลที่คอมพิวเตอร์เครื่องอื่นส่งมาให้ เป็นจุดผีมาเก็บไว้ในหน่วยความจำตัวเอง

ตัวอย่างซอสโค้ดเทียม (Pseudo code) ในการส่งและรับข้อมูลมีดังต่อไปนี้

Send(datas, number of data, to adjacent node)

! * sending datas to adjacent node * !

Receive(datas, number of data, from adjacent node)

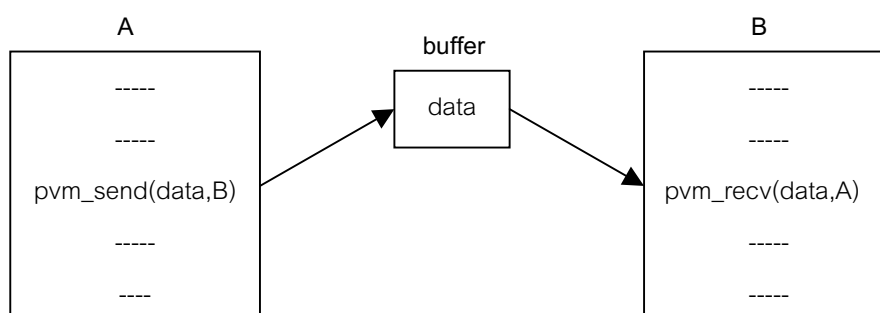
! * receiving datas to adjacent node * !

4.5.2 วิธีการส่งและรับข้อมูล

การส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ในเครือข่ายคำนวณแบบขนานเป็นแบบส่งผ่านข้อความ จะมี การส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องแม่กับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกหรือระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกกับ เครื่องลูกด้วยกัน ในระหว่างการส่งข้อมูล จะมี PVM demon สนับสนุนอยู่ด้านหลังเพื่อเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ ในเครือข่ายให้สามารถติดต่อถึงกันได้ และเตรียมสภาพแวดล้อมในการทำงานแบบขนาน

การทำงานแบบขนานของสภาพแวดล้อม PVM มีคำสั่งสำหรับการส่งข้อมูลคือ `pvm_send()` และคำสั่ง สำหรับการรับข้อมูลคือ `pvm_recv()` ในขั้นตอนการส่งข้อมูลจะมีเครื่องคอมพิวเตอร์ต้นทางส่งข้อมูลไปให้ เครื่องคอมพิวเตอร์ปลายทาง และ PVM demon จะเตรียมบัฟเฟอร์ข้อมูล (Message Buffer) สำหรับเก็บข้อมูลจากคอมพิวเตอร์เครื่องต้นทางเพื่อนำข้อมูลส่งไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องปลายทาง ระหว่างที่ข้อมูลอยู่ในบัฟเฟอร์จะถูกห่อด้วยโปรโตคอล TCP/IP เพื่อส่งข้อมูลไปตามเน็ตเวิร์ก เมื่อไปถึงคอมพิวเตอร์ปลายทางจะถูก แกะออกมาเป็นข้อมูลเหมือนเดิม

พิจารณาการส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง โดยให้ A เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ต้นทางทำ การส่งข้อมูล และให้ B เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ปลายทางที่รับข้อมูล มีขั้นตอนการทำงานดังนี้



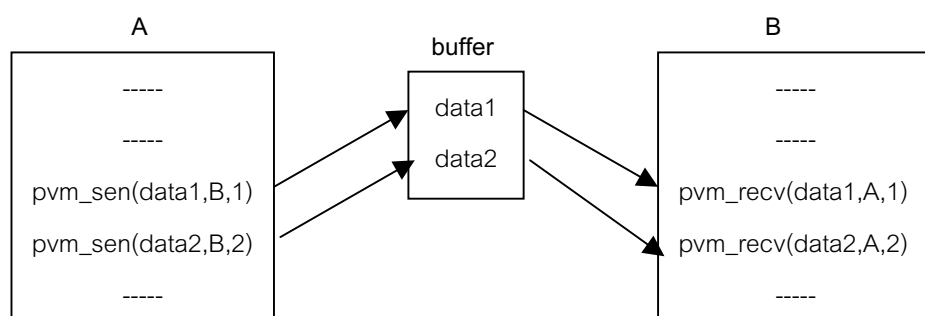
รูปที่ 4.9 การส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง คอมพิวเตอร์เครื่อง A ทำการส่งข้อมูล โดยใช้ คำสั่ง `pvm_send()` จากนั้นข้อมูลถูกห่อด้วยโปรโตคอล TCP/IP เพื่อส่งไปยังคอมพิวเตอร์ปลายทาง เมื่อถึงปลายทาง คอมพิวเตอร์เครื่อง B ประมวลผลคำสั่ง `pvm_recv` เพื่อรับข้อมูลจากบัฟเฟอร์ข้อมูลและแกะเอาข้อมูลออกมา

จากรูปที่ 4.9 เมื่อคอมพิวเตอร์เครื่อง A ส่งข้อมูลโดยใช้คำสั่ง `pvm_send()` จะมีการบรรจุข้อมูลที่ต้องการจะ ส่งไว้ในคำสั่งและระบุค่า ID ซึ่งเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ปลายทางที่ต้องการส่งข้อมูลไป จากรูปข้อมูลที่ต้องการส่งคือ data และเครื่องคอมพิวเตอร์ปลายทางคือ B เมื่อคำสั่ง `pvm_send()` ถูกประมวลผล ข้อมูลจะถูกห่อด้วยโปรโตคอล TCP/IP ไปเก็บไว้ในบัฟเฟอร์ข้อมูล ของ PVM demon เพื่อส่งไปยังปลายทาง ส่วน คอมพิวเตอร์ปลายทางคือเครื่อง B จะใช้คำสั่ง `pvm_recv()` รับข้อมูล ภายในคำสั่งจะต้องเอาตัวแปรมารับข้อมูลและต้องระบุ ID เครื่องคอมพิวเตอร์ต้นทางที่ต้องการรับข้อมูล จากรูปตัวแปรรับข้อมูลคือ data และ เครื่องคอมพิวเตอร์ต้นทางที่ต้องการรับข้อมูลคือ A เมื่อคำสั่ง `pvm_recv()` ถูกประมวลผลจะมีการตรวจสอบว่าข้อมูลที่ต้องการรับมาถึงหรือยัง โดยการตรวจสอบค่า ID ถ้ามาถึงแล้วก็รับข้อมูลจากบัฟเฟอร์ของ PVM demon โดยแกะข้อมูลออกมาเก็บในตัวแปร data จึงเสร็จขั้นตอนการส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง

คำสั่ง `pvm_send()` จะเป็นการทำงานแบบ non-blocking คือเมื่อมีการประมวลคำสั่งนี้เสร็จจะไม่มีการรอตรวจสอบว่าข้อมูลไปถึงปลายทางหรือยัง แต่จะประมวลคำสั่งอื่นต่อไปทันที แต่คำสั่ง `pvm_recv()` จะเป็นการทำงานแบบ blocking คือเมื่อมีการประมวลคำสั่งนี้แล้วถ้าข้อมูลที่ต้องการรับยังมาไม่ถึงโปรแกรมจะค้างคำสั่งนี้จนกว่าจะมีการรับข้อมูลได้สำเร็จ

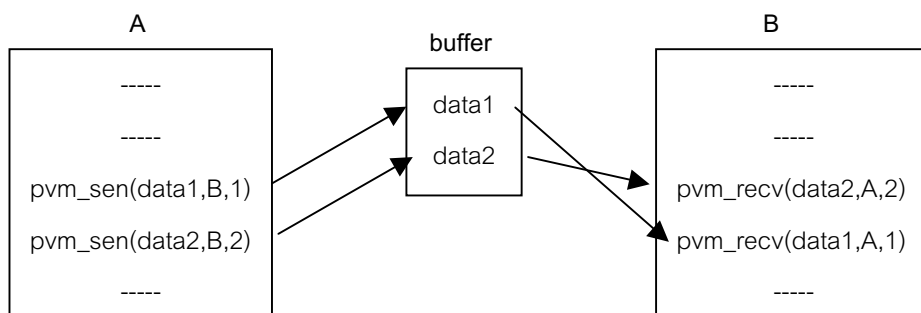
เนื่องจากคำสั่ง `pvm_send()` จะเป็นการทำงานแบบ non-blocking และคำสั่ง `pvm_recv()` จะเป็นการทำงานแบบ blocking จึงสามารถเกิดเหตุการณ์ใน 2 ลักษณะดังนี้ คือ เหตุการณ์ที่ 1 คือคอมพิวเตอร์เครื่อง A ประมวลคำสั่ง `pvm_send()` เสร็จก่อนหรือพร้อมกันกับคอมพิวเตอร์เครื่อง B ประมวลผลคำสั่ง `pvm_recv()` ดังนั้นคอมพิวเตอร์เครื่อง B ก็จะสามารถรับข้อมูลได้โดยไม่มีการรอ แต่ในเหตุการณ์ที่ 2 คือ คอมพิวเตอร์เครื่อง B ประมวลผลคำสั่ง `pvm_recv()` ก่อนที่คอมพิวเตอร์เครื่อง A จะประมวลคำสั่ง `pvm_send()` ลักษณะดังกล่าวจะทำให้คอมพิวเตอร์เครื่อง B ต้องรอข้อมูลจนกว่าจะมีข้อมูลมาถึง หรือถ้าข้อมูลไม่มาจะทำให้โปรแกรมที่เครื่อง B หยุดทำงานได้ ดังนั้นการทำงานระหว่างการรับและส่งของคอมพิวเตอร์ 2 เครื่องจึงไม่จำเป็นที่จะทำงานพร้อมกัน ก็สามารถส่งและรับข้อมูลได้สำเร็จ แต่การทำงานที่ไม่พร้อมกันดังกล่าวจะเกิดปัญหาค้างขึ้น ถ้าในเครือข่ายมีคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง ถ้าแต่ละเครื่องประมวลผลคำสั่งได้ไม่พร้อมกันก็ไม่เกิด load balancing นำซึ่งปัญหาการหน่วงการทำงาน ให้การทำงานบนเครือข่ายช้าลง ซึ่งอาจจะนานกว่าการทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องเดียว และปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ได้โดยการแบ่งข้อมูลสำหรับคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องให้ได้ข้อมูลเท่าๆ กัน ทำให้การประมวลผลเสร็จในเวลาพร้อมกัน และคอมพิวเตอร์ในเครือข่ายควรใช้ความสามารถของ CPU ที่มีความเร็วเท่ากัน เพื่อให้การประมวลผลคำสั่งของคอมพิวเตอร์ในเครือข่ายมีความเร็วเท่าๆ กัน

ในการทำงานจริงคอมพิวเตอร์เครื่อง A จะมีการส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์เครื่อง B หลายครั้ง เพื่อไม่ให้คอมพิวเตอร์เครื่อง B รับข้อมูลผิด ในคำสั่ง `pvm_send()` และ `pvm_recv()` จึงมีการกำกับหมายเลขข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์เครื่องปลายทางจะรับข้อมูลที่หมายเลขข้อมูลตรงกับหมายเลขต้นทางเท่านั้น



รูปที่ 4.10 คอมพิวเตอร์เครื่อง A ประมวลผลคำสั่ง `pvm_send` 2 ครั้ง เพื่อส่งข้อมูล `data1` และ `data2` ไปยังคอมพิวเตอร์เครื่อง B โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูลก่อน จากนั้น คอมพิวเตอร์เครื่อง B จะประมวลคำสั่ง `pvm_recv` ครั้งที่ 1 เพื่อรับข้อมูลจากบัฟเฟอร์ มาเก็บในตัวแปร `data1` จากนั้นจึงประมวลผลคำสั่ง `pvm_recv` ครั้งที่ 2 เพื่อรับข้อมูลจากบัฟเฟอร์ มาเก็บในตัวแปร `data2`

จากรูปที่ 4.10 คอมพิวเตอร์เครื่อง A จะส่งข้อมูล 2 ข้อมูล คือ data1 และ data2 ไปให้คอมพิวเตอร์เครื่อง B มีขั้นตอนการทำงานดังนี้ คอมพิวเตอร์เครื่อง A จะประมวลคำสั่ง `pvm_send()` 2 ครั้ง เพื่อส่งข้อมูล data1 และ data2 แล้วจากนั้น data1 และ data2 จะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูล เพื่อส่งไปให้คอมพิวเตอร์เครื่อง B โดยคอมพิวเตอร์เครื่อง B จะประมวลผลคำสั่งแรกก่อนเพื่อรับ data1 ซึ่งจะมีการตรวจสอบก่อนว่าเป็นข้อมูลที่มาจากคอมพิวเตอร์เครื่อง A และมีหมายเลขกำกับข้อมูลเป็น 1 จึงทำการรับข้อมูลจากบัฟเฟอร์มาเก็บในตัวแปร data1 จากนั้นจึงประมวลผลคำสั่งที่สองโดยการตรวจต้นทางที่ส่งข้อมูลมาเป็น A และมีหมายเลขกำกับข้อมูลเป็น 2 จึงทำการรับข้อมูลได้ จากลักษณะดังกล่าว การรับข้อมูลจะทำการตรวจสอบ 2 อย่างคือ ตรวจสอบต้นทางที่ส่งข้อมูลมากับหมายเลขที่กำกับข้อมูลถ้าตรงกันหมดจึงทำการรับข้อมูลได้ เนื่องจากการรับข้อมูลจากเครื่องปลายทางจะรับข้อมูลมาจากบัฟเฟอร์ข้อมูลของ PVM daemon และไม่สนใจว่าลำดับการส่งข้อมูลเป็นอย่างไรจึงทำให้สามารถเกิดเหตุการณ์ดังต่อไปนี้ได้



รูปที่ 4.11 การทำงานของคอมพิวเตอร์เครื่อง B ที่ประมวลผลคำสั่ง `pvm_rcv()` สลับการทำงานในรูปที่ 4.10 เพื่อรับข้อมูลมาจากบัฟเฟอร์ข้อมูล

จากรูปที่ 4.11 คอมพิวเตอร์เครื่อง A มีลำดับการประมวลผลคือ ส่งข้อมูล data1 แล้วจึงส่ง data2 จากนั้น data1 และ data2 จะถูกเก็บไว้ในบัฟเฟอร์ข้อมูล คอมพิวเตอร์เครื่อง B จะประมวลผลคำสั่ง เพื่อรับ data2 ก่อน โดยตรวจสอบว่าข้อมูลส่งมาจากคอมพิวเตอร์เครื่อง A และมีหมายเลขข้อมูลเป็น 2 จึงรับข้อมูลมาเก็บในตัวแปร data2 จากนั้นจึงประมวลผลคำสั่งเพื่อรับ data1 โดยตรวจสอบว่าเมื่อข้อมูลส่งมาจากคอมพิวเตอร์เครื่อง A และมีหมายเลขข้อมูลเป็น 1 จึงรับข้อมูลมาเก็บในตัวแปร data1 จากเหตุการณ์ดังกล่าวแสดงว่าคอมพิวเตอร์ที่รอรับข้อมูลไม่สนใจว่าคอมพิวเตอร์ที่ส่งข้อมูลมีลำดับการส่งอย่างไร แต่จะรอรับข้อมูลที่มาจากบัฟเฟอร์เท่านั้น โดยการตรวจสอบต้นทางของข้อมูลให้ตรงกับหมายเลขกำกับข้อมูลตรงกับที่ต้องการรับเท่านั้น

ในการทำงานจริงของโปรแกรมแบบขนาน ขั้นตอนในการส่งข้อมูลมี 3 คำสั่งคือ `pvm_initsend()` `pvm_pack()` และ `pvm_send()` ขั้นตอนการทำงานมีดังนี้

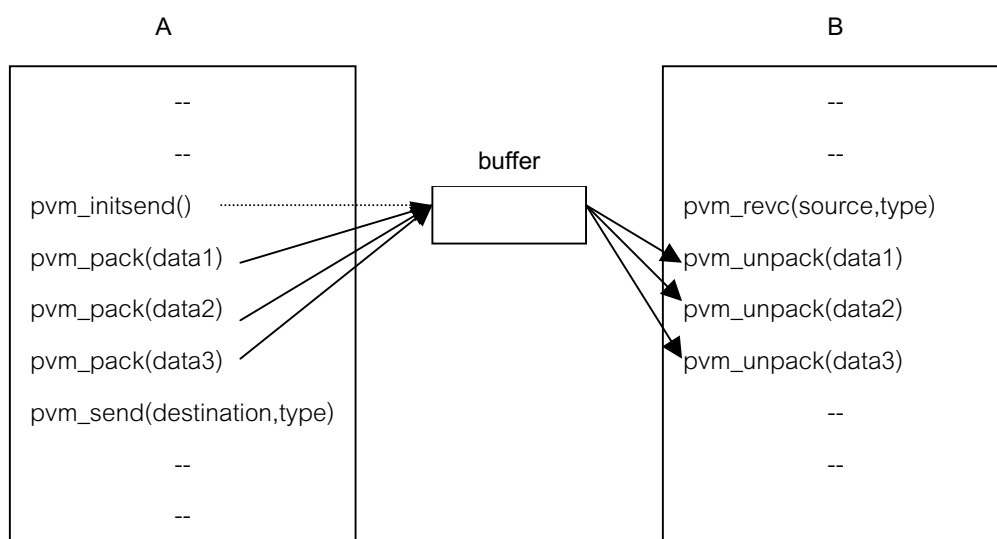
- 1) โปรแกรมประมวลผลคำสั่ง `pvm_initsend()` เพื่อบอก PVM daemon จะมีการส่งข้อมูลและให้เตรียมบัฟเฟอร์ข้อมูลสำหรับเก็บข้อมูลที่จะส่ง

- 2) โปรแกรมประมวลผลคำสั่ง `pvm_pack(data)` เพื่อเอาข้อมูลที่จะส่งมาเก็บเข้าบัฟเฟอร์ข้อมูล
- 3) โปรแกรมประมวลผลคำสั่ง `pvm_send(destination, massgetype)` เพื่อบอกจุดหมายปลายทางที่จะส่งข้อมูลและระบุหมายเลขกำกับข้อมูลที่ส่ง

ขั้นตอนในการรับข้อมูลมี 2 คำสั่งคือ `pvm_recv()` และ `pvm_unpack()` ขั้นตอนการทำงานมีดังนี้

- 1) โปรแกรมประมวลผลคำสั่ง `pvm_recv(source, massgetype)` เพื่อบอกต้นทางที่ต้องการรับข้อมูลและหมายเลขกำกับข้อมูลที่จะรับ
- 2) โปรแกรมประมวลผลคำสั่ง `pvm_unpack(data)` เพื่อแกะข้อมูลจากบัฟเฟอร์ข้อมูลมาเก็บในตัวแปร `data`

ความสัมพันธ์ในการประมวลผลคำสั่งระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องที่ส่งข้อมูลและคอมพิวเตอร์เครื่องที่รับข้อมูลแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การทำงานของโปรแกรมระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องที่ส่งข้อมูลกับเครื่องที่รับข้อมูล

การทำงานของโปรแกรมระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องส่งข้อมูลกับคอมพิวเตอร์เครื่องรับข้อมูลจะต้องมีคำสั่งในการส่งข้อมูลคือ `pvm_send` และ `pvm_recv` ที่สัมพันธ์กัน ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมจะต้องรู้ว่าต้องส่งข้อมูลอะไรไปคอมพิวเตอร์ปลายทางที่ไหน และมีการกำกับหมายเลขข้อมูลระหว่างการส่งและการรับให้ตรงกัน และใช้ตัวแปรมารับข้อมูลจากบัฟเฟอร์ให้ถูกต้อง ซึ่งเป็นหน้าที่ของผู้ทำการพัฒนาโปรแกรมจะต้องรู้ เพราะจะไม่มีการทำงานให้อย่างอัตโนมัติ

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง ซึ่งไม่มีความซับซ้อนมาก แต่ถ้าเป็นการส่งและรับข้อมูลที่มีจำนวนคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง จะต้องเขียนโปรแกรมให้มีความสัมพันธ์และสามารถเข้าจังหวะส่งและรับข้อมูลเพื่อไม่ให้เกิดการรอรับข้อมูล จนทำให้เกิดการหน่วงกันในการทำงานซึ่งบางครั้งอาจจะนานมากกว่าการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว เมื่อการทำงานในเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานมีจำนวนหลายเครื่องสามารถทำงานได้เร็วจึงต้องใช้จังหวะการส่งและรับข้อมูล โดยพิจารณาจาก อัลกอริทึม 2 วิธีคือ[19] คือ 1) อัลกอริทึมการรับและส่งข้อมูลโดยการเข้าจังหวะ (Synchronization Algorithm) และ 2) อัลกอริทึมการป้องกันการตายของข้อมูล (Safety Deadlock Algorithm) ในวิธีที่ 1 จะนำเสนอเพื่อให้เกิดภาพการทำงานแบบขนาน ที่มีคอมพิวเตอร์หลายเครื่องทำการเข้าจังหวะเพื่อไม่ให้เกิดการขัดจังหวะการรับและส่งข้อมูล แต่วิธีนี้จะมีปัญหาในการนำไปใช้งานจริงเพราะมีการตายของข้อมูลเนื่องจากการใช้บัฟเฟอร์ข้อมูลในการส่งและรับข้อมูลหมด ในวิธีที่ 2 เป็นวิธีที่สามารถป้องกันการตายของข้อมูลได้ เป็นวิธีที่จะนำไปใช้งานจริงในโปรแกรมจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิช เพราะวิธีนี้สามารถส่งข้อมูลที่มีขนาดใหญ่และมีการวนส่งรับและข้อมูลได้หลายครั้ง รายละเอียดแต่ละวิธีมีดังต่อไปนี้

4.5.2.1 อัลกอริทึมการส่งและรับข้อมูลโดยการเข้าจังหวะ (Synchronization

Algorithm)

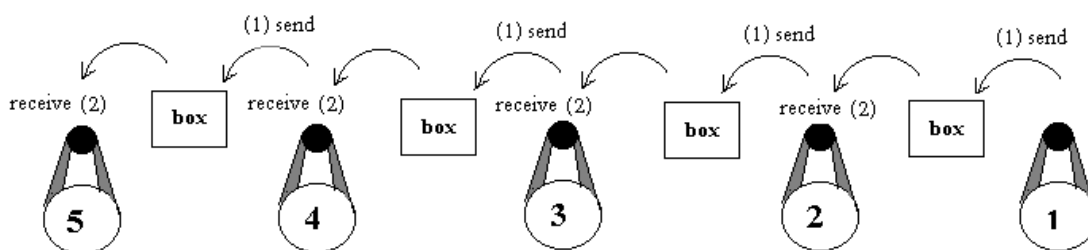
การรับส่งข้อมูลโดยการเข้าจังหวะ[19] เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับส่งและรับข้อมูลในเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานที่ให้คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องเข้าจังหวะการทำงาน ไม่ให้เกิดการขัดจังหวะในการส่งและรับส่งข้อมูล ทำให้มีความเร็วในการประสานการทำงาน เพื่อความเข้าใจการทำงานของอัลกอริทึมดังกล่าว พิจารณาอุปมาอุปไมยในตัวอย่างต่อไปนี้

ให้คน 5 คนยืนเรียงแถวหน้ากระดานเพื่อเข้าจังหวะในการส่งและรับข้อมูล และเอากล่องวางชิ้นแต่ละคนไว้สำหรับใส่สิ่งของ ให้ทุกคนมีสิ่งของอยู่ในมือ แล้วทำการส่งสิ่งของไปให้คนที่ด้านซ้าย โดยให้ทุกคนเข้าจังหวะทำงานดังนี้

จังหวะที่ 1 ทุกคนส่งสิ่งของที่อยู่ในมือไปให้คนที่อยู่ด้านซ้ายของตัวเอง โดยวางของลงในกล่องที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง

จังหวะที่ 2 ทุกคนเก็บของที่อยู่ในกล่องจากด้านขวาตัวเอง

การทำงานของคนที่ 5 คนจะทำพร้อมกันหรือไม่พร้อมกันในแต่ละจังหวะการทำงานนั้นไม่สำคัญ ขอให้แต่เพียงทุกคนทำงานครบทั้ง 2 จังหวะ แต่ถ้ามีการส่งสิ่งของหลายครั้ง ถ้าการส่งและรับไม่พร้อมกันอาจจะทำให้สิ่งของล้นกล่องก็ได้ ทำให้มีสิ่งของเสียหายได้ หรือเสียเวลาในการทำงาน ดังนั้นเพื่อให้การทำงานมีความรวดเร็ว และป้องกันการเสียหายของสิ่งจึงคนให้ทุกคนทำในแต่ละจังหวะให้ได้ในเวลาใกล้เคียงกัน การเข้าจังหวะสำหรับส่งและรับสิ่งของทั้ง 5 คน แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ต่อไปนี้



รูปที่ 4.13 แสดงการเข้าจังหวะส่งและรับสิ่งของทั้ง 5 คน ทุกคนทำการส่งสิ่งของและรับสิ่งของ โดยใช้การเข้าจังหวะดังนี้คือ จังหวะที่ 1 ทุกคนส่งสิ่งของที่อยู่ในมือไปให้คนที่อยู่ด้านซ้าย โดยเอาสิ่งของวางไว้ในกล่อง แล้วจากนั้นทำจังหวะที่ 2 ทุกคนเก็บสิ่งของจากกล่องที่อยู่ด้านขวาตัวเอง ยกเว้นคนที่อยู่หัวกับท้ายแถวที่อาจจะมีการส่งและรับไม่ครบทุกจังหวะ เช่นคนที่ 1 จะไม่ต้องรับสิ่งของและคนที่ 5 ไม่ต้องส่งสิ่งของ

ในทำนองเดียวกันถ้าต้องการส่งสิ่งของไปให้คนที่อยู่ด้านขวาก็สามารถทำได้ โดยการให้ทุกคนเอาสิ่งของมาถือไว้ในมือ แล้วเข้าจังหวะการทำงานดังนี้คือ

จังหวะที่ 1 ทุกคนส่งสิ่งของที่อยู่ในมือไปให้คนที่อยู่ด้านขวาของตัวเอง โดยวางของลงในกล่องที่อยู่ด้านขวาตัวเอง

จังหวะที่ 2 ทุกคนเก็บของที่อยู่ในกล่องจากด้านซ้ายตัวเอง

การเข้าจังหวะส่งและรับสิ่งของจากตัวอย่างดังกล่าว เป็นลักษณะของการทำงานแบบขนานที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการส่งและรับข้อมูลในเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานที่มีเครื่องคอมพิวเตอร์จำนวนหลายเครื่อง โดยกล่องที่ใส่สิ่งของเปรียบเหมือนบัฟเฟอร์ข้อมูล จากตัวอย่างสามารถประยุกต์ได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาจากรูปที่ 4.14 ซึ่งมีคอมพิวเตอร์ 4 เครื่องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นในเครือข่าย โดยใช้วิธีการเข้าจังหวะ 4 จังหวะดังนี้

จังหวะที่ 1 คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องส่งข้อมูลไปให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านบนตัว โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูล

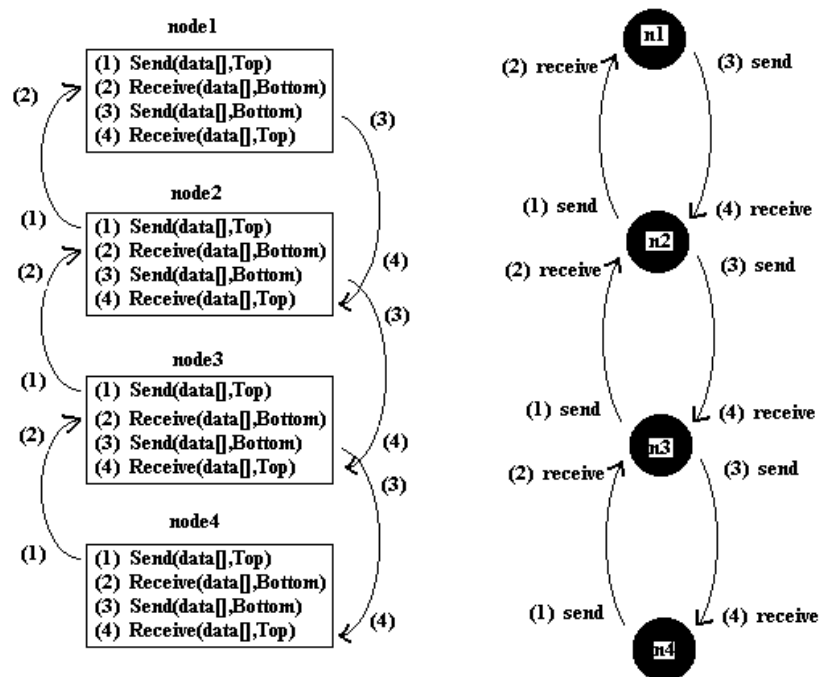
จังหวะที่ 2 คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องรับข้อมูลจาก เครื่องที่อยู่ด้านล่างตัวเอง โดยเอาข้อมูลมาจากบัฟเฟอร์

จังหวะที่ 3 คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องส่งข้อมูลไปให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านล่างตัว โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูล

จังหวะที่ 4 คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องรับข้อมูลจาก เครื่องที่อยู่ด้านบนตัวเอง โดยเอาข้อมูลมาจากบัฟเฟอร์

เมื่อครบ 4 จังหวะแล้วก็เสร็จขั้นตอนการทำงานใน 1 รอบ การทำงานในแต่ละรอบคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องอาจจะทำงานไม่พร้อมกันก็ได้ การส่งและรับข้อมูลก็ยังสามารถทำได้สำเร็จ แต่ถ้ามีการส่งข้อมูลกันหลายรอบแล้ว ถ้าการทำงานที่ต่างเครื่องต่างทำจังหวะตัวเอง ไม่มีการเข้าจังหวะให้ได้เวลาพร้อมกันอาจจะนำมาซึ่งปัญหาข้อมูลล้นบัฟเฟอร์เนื่องจากการรับข้อมูลไม่ทัน ทำให้โปรแกรมที่ค้างการรับข้อมูลหยุดทำงาน ส่งผลให้

โปรแกรมทั้งระบบหยุดทำงาน ทำให้เกิดการเสียของข้อมูลได้ ดังนั้นควรแบ่งให้คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องได้จำนวนข้อมูลเท่าๆกัน เพื่อให้การประมวลผลเสร็จได้ในเวลาพร้อมกัน และคอมพิวเตอร์ในเครือข่ายควรใช้ CPU ที่มีความเร็วในการประมวลผลเท่าๆ กัน เพื่อเวลาในการประมวลผลใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.14 วิธีการรับและส่งโดยการเข้าจังหวะ ของคอมพิวเตอร์ 4 เครื่อง ทุกเครื่องมี ขั้นตอนการทำงาน 4 จังหวะ ยกเว้นคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 1 ไม่ต้องทำจังหวะที่ 1 และ 4 และคอมพิวเตอร์เครื่องที่ 4 ไม่ต้องทำจังหวะที่ 2 และ 3 โดยใช้ Send() เพื่อแทนคำสั่ง pvm_send() และใช้ Receive() เพื่อแทนคำสั่ง pvm_recv()

ในการเขียนโค้ดของโปรแกรมแบบขนานของวิธีการส่งและรับข้อมูลโดยวิธีการเข้าจังหวะ จะเขียนโค้ดเพียงโปรแกรมเดียวเมื่อคอมไพล์เสร็จแล้วสามารถทำงานได้บนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่องตามเทคนิคของ SIMD และสามารถประมวลได้บนคอมพิวเตอร์อย่างไม่จำกัดจำนวนคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.14 ที่ใช้โค้ดเทียมดังต่อไปนี้ (ใช้ Send() เพื่อแทนคำสั่ง pvm_send() และใช้ Receive() เพื่อแทนคำสั่ง pvm_recv() และ ระบุหมายเลขของข้อมูล คือ 1 และ 2 เพื่อให้การรับข้อมูลได้ถูกต้องเพราะมีข้อมูลต้องส่ง คือ 2 ชุด และ รับ 2 ชุด)

- (1) Send(data[],Top,1)
- (2) Receive(data[],Bottom,1)
- (3) Send(data[],Bottom,2)
- (4) Receive(data[],Top,2)

เมื่อนำโปรแกรมจากการคอมไพล์โค้ดดังกล่าวไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องในเครือข่ายเพื่อให้สามารถประสานการทำงานในการส่งและรับข้อมูล โดยคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องมีขั้นตอนการประมวลผลคำสั่งเรียงลำดับตามขั้นตอนดังนี้

- (1) คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (1) คือ `Send(data[],Top)` เพื่อส่งข้อมูลไปให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านบนตัวเอง โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูล
- (2) คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (2) คือ `Receive(data[],Bottom)` เพื่อรับข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านล่างตัวเอง โดยเอาข้อมูลมาจากในบัฟเฟอร์ข้อมูล
- (3) คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (3) คือ `Send(data[],Bottom)` เพื่อส่งข้อมูลไปให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านล่างตัวเอง โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูล
- (4) คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (4) คือ `Receive(data[],Top)` เพื่อรับข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านบนตัวเอง โดยเอาข้อมูลมาจากในบัฟเฟอร์ข้อมูล

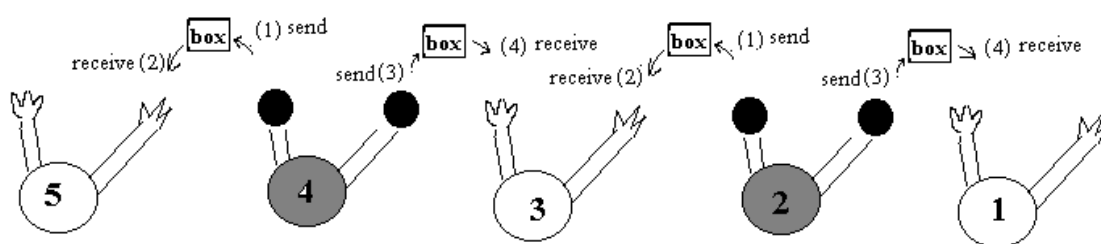
ในขั้นตอนการส่ง ข้อมูลจะถูกเก็บเข้าบัฟเฟอร์ข้อมูล และในขั้นตอนการรับ ข้อมูลจะรับมาจากบัฟเฟอร์ข้อมูล โดยมีขั้นตอนการประมวลผลคำสั่งที่สอดคล้องกับการทำงานทั้ง 4 จังหวะแสดงในรูปที่ 4.14

พิจารณาจากรูปที่ 4.14 ในจังหวะการส่งและรับข้อมูลจะมีเวลาการทำงานที่ติดกันเพียงชนิดเดียว จังหวะการส่งข้อมูลจะใช้บัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูล และจังหวะที่รับข้อมูลก็ต้องรับมาจากบัฟเฟอร์ข้อมูลด้วย ดังนั้นคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง ในบัฟเฟอร์จะมีทั้งข้อมูลสำหรับส่งข้อมูลและข้อมูลที่ตัวเองจะต้องรับ หากบัฟเฟอร์ดังกล่าวมีหน่วยความจำไม่พอ อาจทำให้การทำงานของโปรแกรมหยุดทำงานลง และในจังหวะที่จะต้องประมวลผลคำสั่งในการรับข้อมูลไม่สามารถทำได้ เกิดการค้างของโปรแกรม นำมาซึ่งการหยุดทำงานของโปรแกรม มีข้อมูลตายได้ ดังนั้นวิธีการส่งและรับข้อมูลโดยการเข้าจังหวะ จึงเหมาะสมกับการประมวลผลกับข้อมูลที่มีขนาดเล็ก และมีการวนเข้าจังหวะส่งและรับข้อมูลในจำนวนรอบที่ไม่กี่ครั้ง แต่ถ้าจะต้องคำนวณกับข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ และมีการวนคำนวณหลายรอบ จะต้องใช้อัลกอริทึมป้องกันการตายของข้อมูล เพื่อป้องกันการหยุดทำงานของโปรแกรมในระหว่างการส่งและรับข้อมูลเนื่องจากบัฟเฟอร์ข้อมูลจำกัด ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.5.2.2

4.5.2.2 อัลกอริธึมป้องกันการตายของข้อมูล (Safety Deadlock Algorithm)

วิธีป้องกันการตายของข้อมูลเป็นวิธีที่ใช้ในการส่งและรับข้อมูลในเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานที่มีคอมพิวเตอร์จำนวนหลายเครื่อง เพื่อป้องกันการใช้น้หน่วยความจำของบัฟเฟอร์ข้อมูลหมด แล้วทำให้โปรแกรมหยุดการทำงาน โดยการสลับกันทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ในการส่งและรับข้อมูล คือแบ่งคอมพิวเตอร์เป็น 2 ชุด ให้ชุดแรกทำการส่งข้อมูล ชุดที่สองจะต้องรอรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ชุดแรก เพื่อความเข้าใจพิจารณาตัวอย่างต่อไปนี้

ให้คน 5 คนเรียงแถวหน้ากระดาน 3 คนใส่เสื้อสีดำ อีก 2 คนใส่เสื้อสีขาว ในการยื่นให้สลับตำแหน่งระหว่างคนใส่เสื้อสีดำและใส่เสื้อสีขาว เพื่อทำการส่งสิ่งของให้กันและกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15

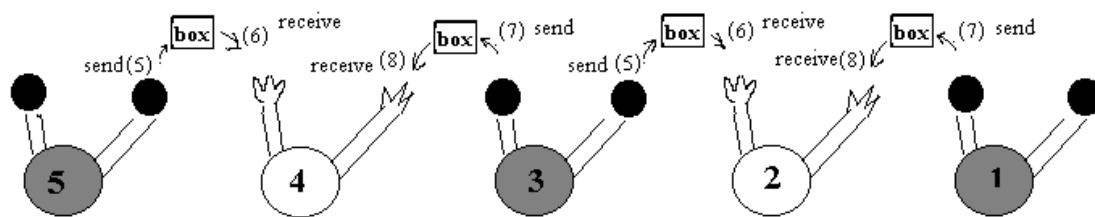


รูปที่ 4.15 แสดงการเข้าจังหวะส่งและรับสิ่งของโดยมี 5 คนเรียงแถวหน้ากระดาน มี 3 คนใส่เสื้อสีดำ อีก 2 คนใส่เสื้อสีขาว มีจังหวะการทำงานคือ คนใส่เสื้อสีขาวจะส่งข้อมูล และคนใส่เสื้อสีดำรอรับข้อมูล

ให้คนใส่เสื้อสีขาวถือสิ่งของทั้งมือซ้ายและมือขวา และคนใส่เสื้อสีดำไม่ต้องถืออะไรทั้งมือซ้ายและขวา แล้วให้คนใส่เสื้อสีขาวส่งสิ่งของไปให้คนใส่เสื้อสีดำที่อยู่ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาตัวเอง จากนั้นคนใส่เสื้อสีดำรับสิ่งของจากคนใส่เสื้อสีขาวที่อยู่ทั้งด้านขวาและด้านซ้ายตัวเอง โดยมีจังหวะรับส่งสิ่งของดังต่อไปนี้

- จังหวะที่ (1) คนใส่เสื้อสีขาวทุกคนส่งสิ่งของที่อยู่ในมือซ้ายไปให้คนที่ใส่เสื้อสีดำที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง (วางสิ่งของไว้ในกล่องก่อน)
- จังหวะที่ (2) คนใส่เสื้อสีดำทุกคนเอามือขวาไปรับสิ่งของจากคนที่ใส่เสื้อสีขาวที่อยู่ด้านขวาตัวเอง (เอาสิ่งของมาจากกล่อง)
- จังหวะที่ (3) คนใส่เสื้อสีขาวทุกคนส่งสิ่งของที่อยู่ในมือขวาไปให้คนที่ใส่เสื้อสีดำที่อยู่ด้านขวาตัวเอง (วางสิ่งของไว้ในกล่องก่อน)
- จังหวะที่ (4) คนใส่เสื้อสีดำทุกคนเอามือซ้ายไปรับสิ่งของจากคนที่ใส่เสื้อสีขาวที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง (เอาสิ่งของมาจากกล่อง)

ในทำนองเดียวกันถ้าคนใส่เสื้อสีดำต้องการส่งสิ่งของไปให้คนใส่เสื้อสีขาว ใช้การเข้าจังหวะในการส่งและรับสิ่งของดังต่อไปนี้ พิจารณาจากรูปที่ 4.16



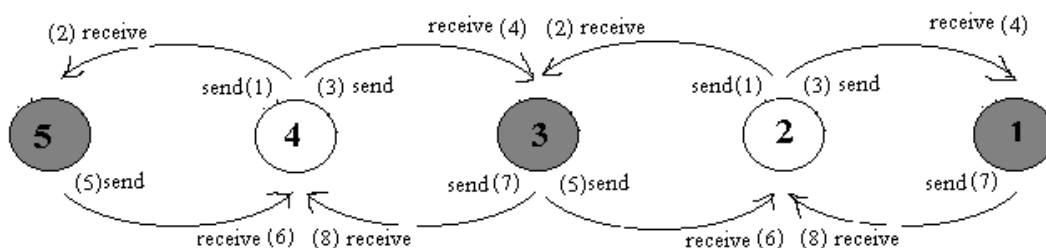
รูปที่ 4.16 แสดงการเข้าจังหวะส่งและรับสิ่งของโดยมี 5 คนเรียงแถวหน้ากระดาน มี 3 คนใส่เสื้อสีดำ อีก 2 คนใส่เสื้อสีขาว มีจังหวะการทำงานคือ คนใส่เสื้อสีดำจะส่งข้อมูล และคนใส่เสื้อสีขาวรับข้อมูล

- จังหวะที่ (5) คนใส่เสื้อสีดำทุกคนส่งสิ่งของที่อยู่ในมือขวาไปให้คนที่ใส่เสื้อสีขาวที่อยู่ด้านขวาตัวเอง (ว่างสิ่งของไว้ในกล่องก่อน)
- จังหวะที่ (6) คนใส่เสื้อสีขาวทุกคนเอามือซ้ายไปรับสิ่งของจากคนที่ใส่เสื้อสีดำที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง (เอาสิ่งของมาจากกล่อง)
- จังหวะที่ (7) คนใส่เสื้อสีดำทุกคนส่งสิ่งของที่อยู่ในมือซ้ายไปให้คนที่ใส่เสื้อสีขาวที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง (ว่างสิ่งของไว้ในกล่องก่อน)
- จังหวะที่ (8) คนใส่เสื้อสีขาวทุกคนเอามือขวาไปรับสิ่งของจากคนที่ใส่เสื้อสีดำที่อยู่ด้านขวาตัวเอง (เอาสิ่งของมาจากกล่อง)

การทำงานในการส่งและรับสิ่งของในวิธีนี้จะมีด้วยกันทั้งหมด 8 จังหวะ ยกเว้นคนที่อยู่หัวแถวและท้ายแถวจะทำการส่งและรับข้อมูลไม่ครบทั้ง 8 จังหวะ

จากตัวอย่างข้างต้นเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการส่งและรับข้อมูลในเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานที่มีคอมพิวเตอร์จำนวนหลายเครื่องได้ดังนี้คือ จะมีการสลับการส่งและรับข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์โหนดคู่และโหนดคี่ เช่นถ้าคอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องทำการส่งข้อมูล แล้วคอมพิวเตอร์โหนดคี่ทุกเครื่องจะต้องรอรับข้อมูล จากนั้นจึงสลับการทำงานโดยให้คอมพิวเตอร์โหนดคี่ทุกเครื่องทำการส่งข้อมูล แล้วคอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องทำการรับข้อมูล ในขั้นตอนระหว่างการส่งข้อมูลจะมี บัฟเฟอร์สำหรับข้อมูล และการรับข้อมูลจะรับมาจากบัฟเฟอร์ จังหวะการทำงานในการสลับการส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์โหนดคู่และคอมพิวเตอร์โหนดคี่มีดังต่อไปนี้ พิจารณาจากรูปที่ 4.17 ประกอบ

- จังหวะที่ (1) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์โหนดคี่ที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง
- จังหวะที่ (2) คอมพิวเตอร์โหนดคี่ทุกเครื่องรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านขวาตัวเอง
- จังหวะที่ (3) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์โหนดคี่ที่อยู่ด้านขวาตัวเอง
- จังหวะที่ (4) คอมพิวเตอร์โหนดคี่ทุกเครื่องรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง
- จังหวะที่ (5) คอมพิวเตอร์โหนดคี่ทุกเครื่องส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านขวาตัวเอง
- จังหวะที่ (6) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์โหนดคี่ที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง
- จังหวะที่ (7) คอมพิวเตอร์โหนดคี่ทุกเครื่องส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง
- จังหวะที่ (8) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์โหนดคี่ที่อยู่ด้านขวาตัวเอง



รูปที่ 4.17 การเข้าจังหวะส่งและรับของคอมพิวเตอร์ในเครือข่าย โดยใช้การสลับจังหวะส่งข้อมูลและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์โหนดและคอมพิวเตอร์โหนดคู่ มีจังหวะการทำงานทั้งหมด 8 จังหวะ

ในการเขียนโค้ดของโปรแกรมแบบขนาน จะเขียนโค้ดเพียงโปรแกรมเดียวเมื่อคอมไพล์เสร็จแล้วสามารถทำงานได้บนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่อง และสามารถประมวลได้บนคอมพิวเตอร์อย่างไม่ต้องจำกัดจำนวน โดยโค้ดเทียบการทำงานของวิธีสับการทำงานระหว่างคอมพิวเตอร์โหนดคู่และคอมพิวเตอร์โหนดคี่ มีดังต่อไปนี้

```

if(node = even) then
    (1) Send(data[],left,1)
    (3) Send(data[],right,2)
    (6) Receive(data[],left,3)
    (8) Receive(data[],right,4)
if(node = odd) then
    (2) Receive(data[],right,1)
    (4) Receive(data[],left,2)
    (5) Send(data[],right,3)
    (7) Send(data[],left,4)
end

```

หมายเลข 1 2 3 และ 4 คือการระบุหมายเลขของข้อมูลเพื่อให้การรับข้อมูลมีความถูกต้อง

เมื่อนำโปรแกรมจากการคอมไพล์โค้ดดังกล่าวไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องในเครือข่ายให้
ประสานการทำงานในการส่งและรับข้อมูล โดยคอมพิวเตอร์เครือข่ายมีขั้นตอนการประมวลผลคำสั่งดังนี้

ก่อนที่จะมีการประมวลผลคำสั่งคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องต้องตรวจสอบก่อนว่าตัวเองเป็นคอมพิวเตอร์ไหนต
คู่หรือไหนตคี่ ถ้าเป็นคอมพิวเตอร์ไหนตคี่ก็จะทำงานในเงื่อนไขของไหนตคี่ หรือถ้าเป็นคอมพิวเตอร์ไหนตคี่ก็
จะทำงานในเงื่อนไขของไหนตคี่ จากนั้นจึงประมวลผลคำสั่งผลตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (1) คือ Send(data[],left) เพื่อส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูลก่อน
- (2) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (2) คือ Receive(data[],right) เพื่อรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านขวาตัวเอง โดยเอาข้อมูลมาจากบัฟเฟอร์ข้อมูล
- (3) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (3) คือ Send(data[],right) เพื่อส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านขวาตัวเอง โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูลก่อน
- (4) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (4) คือ Receive(data[],left) เพื่อรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง โดยเอาข้อมูลมาจากบัฟเฟอร์ข้อมูล
- (5) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (5) คือ Send(data[],right) เพื่อส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านขวาตัวเอง โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูลก่อน
- (6) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (6) คือ Receive(data[],left) เพื่อรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง โดยเอาข้อมูลมาจากบัฟเฟอร์ข้อมูล
- (7) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (7) คือ Send(data[],left) เพื่อส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านซ้ายตัวเอง โดยข้อมูลจะถูกเก็บในบัฟเฟอร์ข้อมูลก่อน
- (8) คอมพิวเตอร์โหนดคู่ทุกเครื่องประมวลผลคำสั่งที่ (8) คือ Receive(data[],right) เพื่อรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์โหนดคู่ที่อยู่ด้านขวาตัวเอง โดยเอาข้อมูลมาจากบัฟเฟอร์ข้อมูล

ขั้นตอนในการประมวลผลคำสั่งทั้ง 8 จึงหะจะสอดคล้องกับการทำงานในรูปที่ 4.17

การเข้าจังหวะส่งและรับข้อมูลของวิธีป้องกันการตายของข้อมูล สามารถแก้ปัญหาการหมดของบัฟเฟอร์เนื่องจากการส่งและรับข้อมูล เพราะใช้วิธีการสลับการส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์โหนดคู่และคอมพิวเตอร์โหนดคี่ ถ้าคอมพิวเตอร์โหนดคู่ส่งข้อมูล คอมพิวเตอร์โหนดคี่จะรับข้อมูล หรือคอมพิวเตอร์โหนดคี่ส่งข้อมูล คอมพิวเตอร์โหนดคู่จะรับข้อมูล จากการสลับจังหวะการทำงานดังกล่าว ในจังหวะการส่ง ข้อมูลถูกเก็บเข้าบัฟเฟอร์ แล้วจากนั้นข้อมูลในบัฟเฟอร์จะถูกรับจากเครื่องที่รอรับข้อมูล ทำให้ในบัฟเฟอร์ไม่มีข้อมูลค้าง และพร้อมที่จะทำจะจังหวะถัดไปทันที และการทำงานลักษณะดังกล่าวข้อมูลในบัฟเฟอร์จะถูกเคลียร์ทุกจังหวะการทำงาน จึงไม่มีโอกาสที่ข้อมูลจะล้นบัฟเฟอร์ วิธีนี้จึงป้องกันการหยุดทำงานของโปรแกรมเนื่องการใช้บัฟเฟอร์หมดแล้วทำให้จังหวะการรับข้อมูลไม่สำเร็จ จึงไม่มีการตายของข้อมูล ดังนั้นวิธีนี้จึงเหมาะสมสำหรับประมวลผลกับข้อมูลขนาดใหญ่และมีการวนส่งและรับข้อมูลกันหลายรอบ และได้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมแบบขนานในงานวิจัยนี้

4.6 วิธีการวัดประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์แบบขนาน

ประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานเป็นการวัดความสามารถการได้เปรียบระหว่างโปรแกรมแบบขนานที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานกับโปรแกรมแบบลำดับที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์เพียง 1 เครื่อง โดยมีวิธีการวัด คือ Speed-up [19,32] ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาที่ได้จากการทำงานของโปรแกรมแบบขนานที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานกับเวลาที่ได้จากการทำงานของโปรแกรมแบบลำดับที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์เพียง 1 เครื่อง โดยมีสมการดังนี้

$$S_p = \frac{T_s}{T_p} \quad (4.3)$$

โดยที่

S_p คือ speed-up ของคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานจำนวน p เครื่อง

T_p คือ เวลาที่ได้จากการทำงานของโปรแกรมแบบขนานที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานจำนวน p เครื่อง

T_s คือ เวลาที่ได้จากการทำงานของโปรแกรมแบบลำดับที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์เพียง 1 เครื่อง

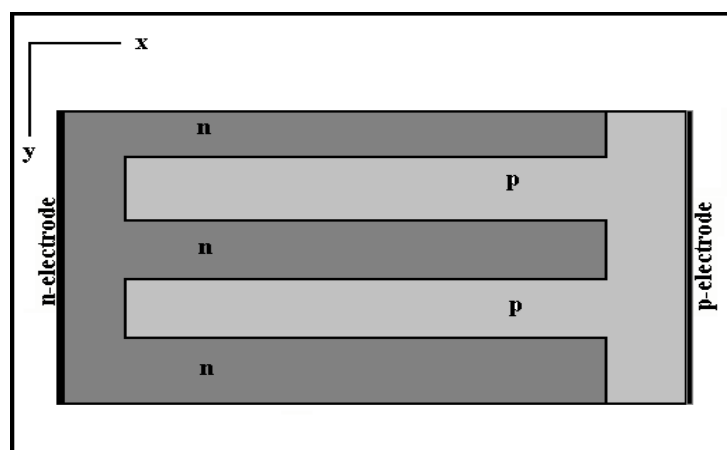
บทที่ 5

การพัฒนาอัลกอริธึมแบบขนานและโปรแกรมแบบขนาน

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการพัฒนาโปรแกรมแบบขนานสำหรับจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แบบตัวชี้บนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน ใช้โมเดลในการจำลองแบบใน 2 มิติ การหาผลเฉลยในการจำลองแบบใช้วิธีเชิงตัวเลขที่ได้กล่าวในบทที่ 3 และใช้วิธีการคำนวณแบบขนานที่ได้อธิบายในบทที่ 4 ในบทนี้มีเนื้อหาประกอบด้วย โมเดลของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แบบตัวชี้ ใน 2 มิติ ที่ใช้ในการจำลองแบบ และการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการจำลองแบบเซลล์สุริยะ ที่พัฒนาเป็น โปรแกรมสร้างกริด และโปรแกรมจำลองแบบ ในโปรแกรมจำลองแบบ แยกการพัฒนาเป็น 2 โปรแกรมคือ โปรแกรมแบบลำดับ และโปรแกรมแบบขนาน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมแบบขนาน โดยรายละเอียดของเนื้อหาของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

5.1 โมเดลของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แบบตัวชี้

การจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แบบตัวชี้ใช้โมเดลใน 2 มิติ มีลักษณะเหมือนในรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นเซลล์สุริยะที่มีการสลับกันระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด n และ ชนิด p หลายชั้นและหลายจังก์ชัน โดยให้แต่ละชั้นขนานในแกน X และให้ขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งเป็นขั้วบวกไว้ผนังด้านขวา ส่วนขั้วแคโทด (Cathode) ซึ่งเป็นขั้วที่เป็นกราวด์ที่ใช้ในการอ้างอิงศักย์ไฟฟ้าไว้ผนังด้านซ้ายของเซลล์ ขนาดของเซลล์อยู่ในระดับของไมครอน (μm) การจำลองแบบคำนวณในระนาบ XY โครงสร้างของเซลล์ให้ด้านแกน X ยาวกว่า แกน Y



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของโมเดลเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แบบตัวชี้สำหรับการจำลองแบบ

5.2 การพัฒนาโปรแกรม

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสำหรับจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์เขียนโดยใช้คอมพิวเตอร์ภาษา Fortran 90 และเรียกใช้ Library ของ PVM เพื่อเขียนโปรแกรมให้มีลักษณะการทำงานแบบขนานบนสภาพแวดล้อมของ PVM ที่ใช้การติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ในเครือข่ายโดยใช้การส่งผ่านข้อความ (Message Passing) และใช้ Library ของ PGPLOT เขียนโปรแกรมสำหรับการแสดงภาพกราฟิกส์ที่มีระดับสีของผลการคำนวณที่ได้จากการจำลองแบบ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์และแปลผล ในการพัฒนาแพ็คเกจ (package tools) กระทำบนระบบปฏิบัติการ LINUX บนคอมพิวเตอร์เวิร์กสเตชัน CPU AMD Athlon มีความเร็ว 800 MHz, 512 Mbyte SDRAM โดยโปรแกรมสำหรับการจำลองแบบได้พัฒนาขึ้น 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมสร้างกริด และโปรแกรมจำลองแบบ ใช้โปรแกรมให้ค่าความหนาแน่นพาหะ ที่พัฒนาขึ้นโดย อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์ จากห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อเป็นตัวกำหนดความหนาแน่นพาหะในเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ รายละเอียดในการพัฒนาโปรแกรมหาดังต่อไปนี้

5.2.1 โปรแกรมสร้างกริด

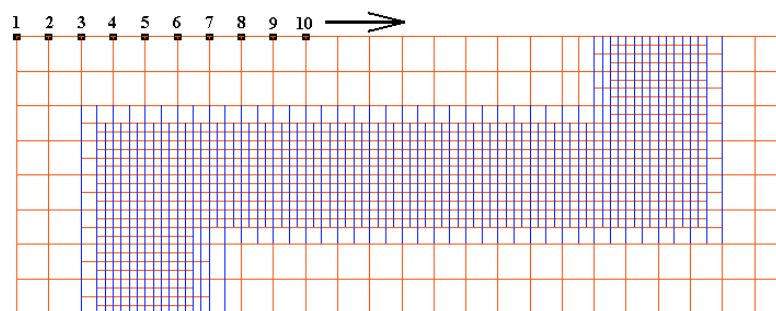
โปรแกรมสร้างกริดทำหน้าที่ในการกำหนดกริดบนโดเมนของเซลล์สุริยะ กริดที่สร้างบนโดเมนเป็นกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมและกริดแบบไฟไนต์บล็อก กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมมี 2 ขนาด คือ กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเล็ก กับกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเล็กจะถูกกำหนดในบริเวณจังก์ชันและครอบคลุมบริเวณขอบของชั้นเซตปลดประจุ (space charge layer) ซึ่งอยู่หน้าข้างของจังก์ชัน และกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่จะถูกกำหนดในบริเวณรอบนอกจังก์ชัน ส่วนกริดแบบไฟไนต์บล็อกจะถูกกำหนดในบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างกริดขนาดใหญ่และกริดขนาดเล็ก เพื่อทำหน้าที่ในการปรับระดับกริดจากขนาดใหญ่ให้ค่อย ๆ ลดขนาดลงมาเท่ากับกริดขนาดเล็ก โปรแกรมสร้างกริดจะอ่านค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการกำหนดขนาดของโครงสร้างของเซลล์และขนาดกริด จากไฟล์ Device Specification File โดยมีลักษณะเป็น Sequential file ซึ่งมีข้อมูลอยู่เป็นคู่ โดยมีบรรทัดแรกอธิบายลักษณะของไฟล์ ข้อมูลในไฟล์ประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังนี้ xmax, ymax, xl, xr, xgrid, yfactor, numfine, lp, junction, yj1, yj2 โดยพารามิเตอร์ใช้ในการกำหนดโครงสร้างของเซลล์และขนาดของกริด แสดงในรูปที่ 5.2 พารามิเตอร์ต่างๆ ในไฟล์ Device Specification File ที่ใช้ในการกำหนดโครงสร้างของเซลล์และขนาดของกริดมีความหมายดังนี้

xmax	คือ พารามิเตอร์ที่บอกขนาดของเซลล์ในแกน X
ymax	คือ พารามิเตอร์ที่บอกขนาดของเซลล์ในแกน Y
xl	คือ พารามิเตอร์ที่บอกตำแหน่งของ junction ที่อยู่ด้านซ้ายของเซลล์
xr	คือ พารามิเตอร์ที่บอกตำแหน่งของ junction ที่อยู่ด้านขวาของเซลล์
xgrid	คือ พารามิเตอร์ที่บอกขนาดของกริดขนาดใหญ่ในแกน X
yfactor	คือ พารามิเตอร์ที่บอกแฟคเตอร์ของกริดขนาดใหญ่ในแกน Y โดยคิดจาก $xgrid / factor$
numfine	คือ พารามิเตอร์ที่บอกขนาดของกริดขนาดเล็กในแกน X โดยคิดจาก $xgrid / 2^{(numfine)}$
lp	คือ พารามิเตอร์ที่บอกขนาดขอบเขตของกริดขนาดเล็ก โดยหน่วยเป็นจำนวนช่องกริดขนาดใหญ่
junction	คือ พารามิเตอร์ที่บอกจำนวนของ junction ในแนวนอน
yj1	คือ พารามิเตอร์ที่บอกตำแหน่งของ junction ที่ 1
yj2	คือ พารามิเตอร์ที่บอกตำแหน่งของ junction ที่ 2

โปรแกรมสร้างกริดจะกำหนดกริดลงบนโดเมนของเซลล์สุริยะ ที่มีลักษณะกริดเป็นตาข่ายสี่เหลี่ยมตลอดทั้งโดเมน มีหลายขนาดและไม่สม่ำเสมอ โดยกริดจะมีลักษณะเป็น 3 บริเวณ (แสดงในรูปที่ 5.2 (ข)) คือ (1) กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก (2) กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ และ (3) กริดแบบไฟไนต์บล็อก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- (1) กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก : อยู่ในบริเวณที่ครอบคลุมจังก์ชันและครอบคลุมบริเวณขอบของชั้นเซตปลอดประจุ เพื่อให้รองรับการเปลี่ยนแปลงเกรเดียนต์ที่รุนแรงของศักย์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นพาหะ ซึ่งบริเวณดังกล่าวต้องใช้กริดขนาดเล็กเพื่อให้การหาผลเฉลยมีความแม่นยำโดยการคำนวณจะเป็นไปตามวิธีการของไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ที่ต้องใช้จุดกริดทั้งหมด 5 จุดกริด เป็นจุดกริดอยู่ตรงกลาง 1 จุดกริดและเป็นจุดกริดที่อยู่โดยรอบทั้ง 4 ทิศอีก 4 จุดกริด
- (2) กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมขนาดขนาดใหญ่: อยู่บริเวณรอบนอกของบริเวณขอบของชั้นเซตปลอดประจุ เพราะบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีเกรเดียนต์ไม่รุนแรง กริดขนาดใหญ่จึงเพียงพอกับความแม่นยำของผลเฉลยและการคำนวณจะเป็นไปตามวิธีการของไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ที่ต้องใช้จุดกริดทั้งหมด 5 จุดกริดเป็นจุดกริดอยู่ตรงกลาง 1 จุดกริดและเป็นจุดกริดที่อยู่โดยรอบทั้ง 4 ทิศอีก 4 จุด
- (3) กริดแบบไฟไนต์บล็อก: อยู่ในบริเวณระหว่างกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่และกริดแบบตารางสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับระดับขนาดของกริดจากขนาดใหญ่ให้ค่อย ๆ ลดขนาดลงจนเท่ากับกริดขนาดเล็ก การคำนวณจะเป็นไปตามวิธีการของไฟไนต์บล็อกที่ต้องใช้จุดกริดทั้งหมด 6 จุดกริด โดยเป็นจุดกริดที่ต้องการหาผลเฉลย 1 จุดกริดและเป็นจุดกริดเพื่อนบ้านที่อยู่โดยรอบอีก 5 จุดกริด

โปรแกรมสร้างกริดจะกำกับตัวเลขของกริดแต่ละจุดโดยใช้ ดัชนีเดียว (Single Indexing) ซึ่งเป็นการใช้ตัวเลขกำกับจุดกริด เรียงลำดับจากจุดกริดแรกจนถึงจุดกริดสุดท้ายบนโดเมน โดยการเรียงลำดับตัวเลขเริ่มจาก 1 ไล่ลำดับไปจนถึงกริดตัวสุดท้ายและไม่ให้ตัวเลขไม่ซ้ำกัน โดยการเรียงลำดับกริดเรียงตามแนวนอนไล่ลำดับแถวจากแถวแรกที่อยู่ด้านบนโดเมนจนถึงแถวสุดท้ายที่อยู่ล่างสุดโดเมน เพื่อเป็นดัชนีอ้างอิงสำหรับคำนวณด้วยการวนซ้ำ การอ้างอิงจุดกริดด้วยดัชนีเดียวแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การใช้ดัชนีเดียว (single indexing) ในการอ้างอิงจุดกริด ที่ใช้ตัวเลขกำกับจุดกริดเรียงลำดับกริดจากจุดแรกจนถึงจุดสุดท้ายตามแถวในแนวนอน

ในขั้นสุดท้ายโปรแกรมสร้างกริดจะเก็บข้อมูลของแต่ละจุดกริดในไฟล์ Grid Specification File และเก็บจำนวนกริดทั้งหมดเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป โดยไฟล์ Grid Specification File เก็บข้อมูลเป็น Record ที่ใช้การเข้าถึงข้อมูลแบบ Random access โดยในแต่ละ Record จะประกอบด้วย 12 Field โดยเรียงตามลำดับตาม Field ดังนี้ Index of grid, Grid type, X, Y, North, East, South, West, hN, hE, hS, hS

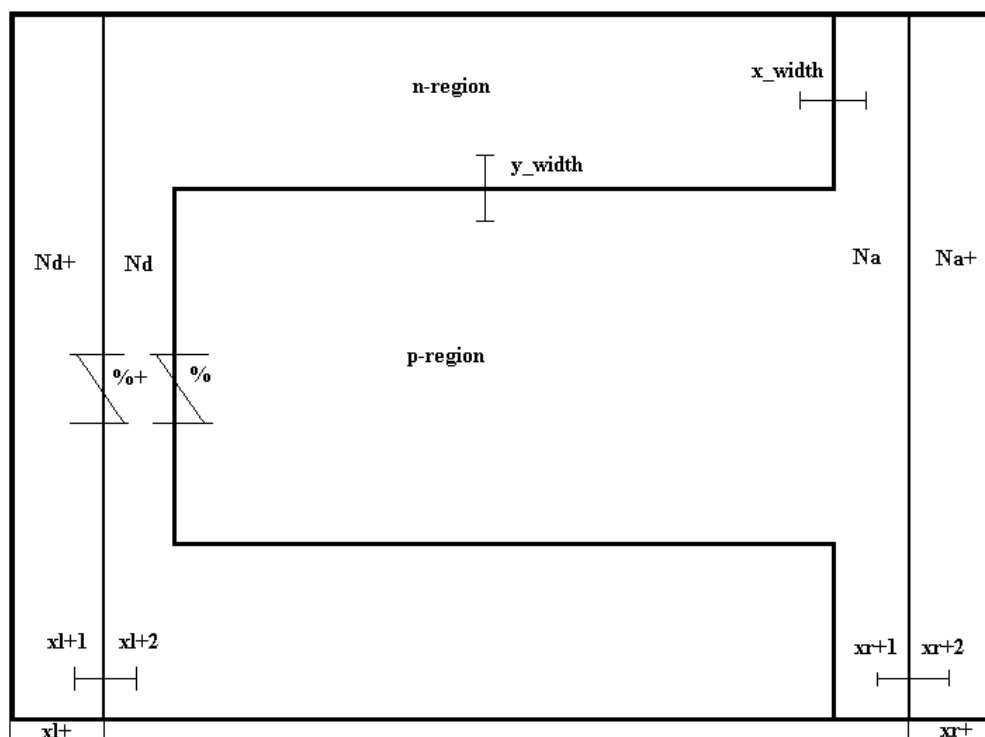
ข้อมูลในแต่ละ Field มีความหมายดังนี้

- Index of grid คือ ดัชนีของจุดกริดโดยเรียงจาก 1 และจะไม่ซ้ำกัน
- Grid type คือ ชนิดของกริดสำหรับใช้ในการคำนวณ ซึ่งได้แสดงในภาคผนวก จ
- X, Y คือ ตำแหน่งของจุดกริด
- North, East, South, West คือ ดัชนีของเพื่อนบ้านที่อยู่ทิศเหนือ ตะวันออก ใต้ และตะวันตก
- hN, hE, hW, hS คือ ระยะห่างจากเพื่อนบ้านของทั้ง 4 ทิศ

5.2.2 โปรแกรมให้ค่าความหนาแน่นพาหะ

โปรแกรมให้ค่าความหนาแน่นพาหะเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดย อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์ ในห้องปฏิบัติการ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น มีหน้าที่ในการให้ค่า doping profile ของพาหะของแต่ละจุดกริด ซึ่งจะเป็นการให้ค่าเริ่มต้นสำหรับการจำลองแบบ โปรแกรมจะให้ค่า fixed charge (n_o, p_o) เท่ากับ free charge (p, n) พารามิเตอร์ที่ต้องอินพุตให้กับโปรแกรมจะเก็บไว้ในไฟล์ Doping Specification File โดยมีลักษณะเป็น sequential file ที่มีข้อมูลอยู่เป็นคู่ มีข้อมูลทั้งหมดประกอบไปด้วยค่าต่างๆ ดังนี้ ni_si , Nd , Nd^+ , Na , Na^+ , x_width , y_width , $\%$, $\%+$, xl^+ , $xl+1$, $xl+2$, xr^+ , $xr+1$, $xr+2$

ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องอินพุตให้กับโปรแกรมให้ค่าความหนาแน่นพาหะ โดยมีความหมายสัมพันธ์กับโครงสร้างเซลล์สุริยะดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในไฟล์ Doping Specification File กับโครงสร้างของเซลล์

พารามิเตอร์ในไฟล์ Doping Specification File มีความหมายดังนี้

- ni_si คือ ค่าของความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์
- Nd คือ ค่าของความหนาแน่นของโฮล
- $Nd+$ คือ ค่าของความหนาแน่นของโฮลในบริเวณที่มีการโด๊ปมาก ๆ
- Na คือ ค่าของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
- $Na+$ คือ ค่าของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในบริเวณที่มีการโด๊ปมาก ๆ
- x_width คือ ค่าความกว้างของรอยต่อในแกน X
- y_width คือ ค่าความกว้างของรอยต่อในแกน Y
- $\%$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของความหนาแน่นของพาหะที่รอยต่อ
- $\%+$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของความหนาแน่นของพาหะที่รอยต่อของบริเวณที่มีการโด๊ปมาก ๆ
- $xl+$ คือ ความกว้างของบริเวณที่โด๊ปมาก ๆ ในด้านซ้าย
- $xl+1$ คือ ความกว้างของบริเวณที่โด๊ปมาก ๆ ในด้านซ้ายของบริเวณด้านซ้ายของรอยต่อ
- $xl+2$ คือ ความกว้างของบริเวณที่โด๊ปมาก ๆ ในด้านขวาของบริเวณด้านซ้ายของรอยต่อ
- $xr+$ คือ ความกว้างของบริเวณที่โด๊ปมาก ๆ ในด้านขวา
- $xr+1$ คือ ความกว้างของบริเวณที่โด๊ปมาก ๆ ในด้านซ้ายของบริเวณด้านขวาของรอยต่อ
- $xr+2$ คือ ความกว้างของบริเวณที่โด๊ปมาก ๆ ในด้านขวาของบริเวณด้านขวาของรอยต่อ

ผลจากทำงานของการโปรแกรม จะนำข้อมูลมาเก็บไว้ในไฟล์ Grid Specification File โดยข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาเก็บต่อท้าย Field ของแต่ละ Record เพิ่มต่อไปอีก 4 Field ข้อมูลที่เพิ่มลงไปในแต่ละ Record เรียงตามลำดับ field ดังนี้ n , p , n_0 และ p_0 ความหมายของแต่ละ field คือ ค่าความหนาแน่นของพาหะของแต่ละจุดกริด

5.2.3 โปรแกรมจำลองแบบ

โปรแกรมจำลองแบบทำหน้าที่คำนวณเพื่อหาค่าผลเฉลยของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แซนดิวซ์ โดยโปรแกรมมีหน้าที่หลักคือแก้ระบบสมการที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ได้พัฒนาโปรแกรมจำลองแบบเป็น 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมแบบลำดับ (sequential program) และ โปรแกรมแบบขนาน (parallel program) เพื่อนำผลการจำลองแบบ และเวลาการทำงานของโปรแกรมมาเปรียบเทียบกัน โปรแกรมทั้ง 2 มีฟังก์ชันการคำนวณที่เหมือนกัน แต่ต่างกันที่ทำงานบนระบบคอมพิวเตอร์ที่ต่างกัน โดยโปรแกรมแบบลำดับทำงานบนคอมพิวเตอร์เวิร์กสเตชันเพียงเครื่องเดียว แต่โปรแกรมแบบขนานทำงานบนระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน ทั้ง 2 โปรแกรมจะมีพารามิเตอร์ที่ต้องป้อนค่าที่เป็นค่าเงื่อนไขเริ่มต้นและค่าเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งเก็บไว้ในไฟล์ Initialize Parameters File ที่มีลักษณะเป็น sequential file มีข้อมูลทั้งหมดในไฟล์เรียงตามลำดับคือ relax, bias, elect P, elect G

ข้อมูลในไฟล์ Initialize Parameters File มีความหมายดังนี้

relax	คือ ค่าสำหรับ relaxation factor ในการคำนวณด้วยการทำซ้ำด้วยวิธี SOR
bias	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าไบแอสให้กับเซลล์
elect P	คือ ตำแหน่งสำหรับการวางขั้วแอโนด
elect G	คือ ตำแหน่งสำหรับการวางขั้วแคโทด

โดยรายละเอียดของโปรแกรมแบบลำดับจะกล่าวไว้ในหัวข้อ 5.3 และ โปรแกรมแบบขนานจะกล่าวในหัวข้อ 5.4 ต่อไป

5.3 โปรแกรมแบบลำดับ

โปรแกรมแบบลำดับเป็นโปรแกรมที่พัฒนาด้วยโค้ดลำดับเพื่อเป็นการทำความเข้าใจในการแก้ระบบปัญหาของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แซนดิวซ์และตรวจสอบค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแบบเพื่อนำไปพัฒนาโปรแกรมแบบขนาน โดยโปรแกรมแบบลำดับทำหน้าที่ในการแก้ระบบสมการเพื่อหาผลเฉลยของการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์แซนดิวซ์ ซึ่งมีขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรกดังนี้

- (1) อ่านค่าข้อมูลกริดจากไฟล์ Grid Specification File และอ่านค่าเงื่อนไขเริ่มต้นและข้อมูลสำหรับค่าเงื่อนไขขอบเขตจากไฟล์ Initialize Parameters File
- (2) อ่านค่า Normalize Parameter เพื่อการนอร์มัลไลซ์ตัวแปรต่างๆ
- (3) ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดเป็น 0.0 โวลต์ และที่ขั้วแอโนดให้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับค่าศักย์ไฟฟ้าไบแอสที่อยู่ในไฟล์ Initialize Parameters File และให้ค่าเริ่มต้นของ ψ, n และ p ของแต่ละจุดกริด (ψ ที่ไม่ได้อยู่บนขั้วไฟฟ้าจะกำหนดค่าเป็น 0.0 โวลต์)

(4) ทำการแก้สมการระบบ ด้วยวิธีการทำซ้ำแบบ Jacobi ดังนี้

4.1 แก้สมการปัวส์ซง เพื่อหาค่า Ψ ของแต่ละจุดกริด

4.2 ปรับปรุง Ψ ใหม่ จาก $\Psi_k^{n+1} = \Psi_k^n + V_k^n$

4.3 คำนวณค่าโมบิลิตี μ ของอิเล็กตรอน และ โฮล ของแต่ละจุดกริด

4.4 แก้สมการค่าความหนาแน่นกระแส หาค่า J_n และ J_p

4.5 หาค่าขั้นเวลา (Δt) ที่น้อยที่สุด

4.6 หาค่าการรวมตัวของพาหะ (R)

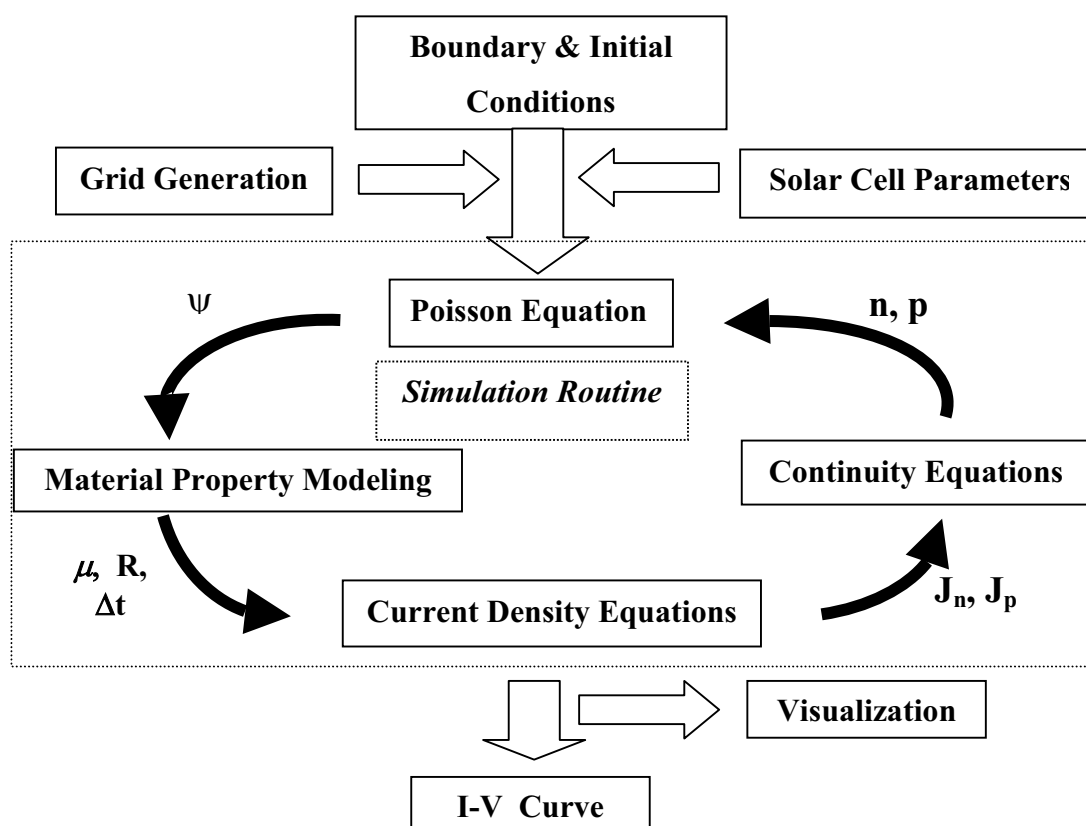
4.7 แก้สมการความต่อเนื่อง

4.8 ปรับปรุงค่า n และ p จาก $n_k^{n+1} = n_k^n + V_k^n$ และ $p_k^{n+1} = p_k^n + V_k^n$

4.9 ทดสอบค่าเงื่อนไขการหยุด ถ้ายังไม่ใช่ กลับไปทำข้อ (4) ใหม่

(5) ค่าของผลการคำนวณทั้งหมดถูกเก็บในไฟล์ Result File

สุดท้ายค่าผลเฉลยถูกนำมาแสดงเป็นภาพ ระดับสีของผลลัพธ์ค่าต่างๆ และ ทิศทางการไหลของความหนาแน่นกระแส เพื่อวิเคราะห์ผล และนำค่าศักยภาพแอสมาเขียนกราฟกับค่าความหนาแน่นกระแส (I-V curve) สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ โดยขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของการจำลองแบบสรุปในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 การทำงานของโปรแกรมจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนตวิช

5.4 โปรแกรมแบบขนาน

โปรแกรมแบบขนานเป็นโปรแกรมที่เขียนด้วยโค้ดแบบขนานซึ่งมีความสามารถประมวลผลแบบขนานได้ โดยทำหน้าที่คำนวณลักษณะเดียวกันกับโปรแกรมแบบลำดับ และใช้ Library ของ PVM เพื่อให้โปรแกรมมีความสามารถในการทำงานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานในสภาพแวดล้อมของ PVM ได้ เพื่อให้ได้อัลกอริทึมแบบขนานที่ดีที่สุด สำหรับนำไปจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิช จึงได้ออกแบบอัลกอริทึมแบบขนาน 3 วิธี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ประกอบด้วย

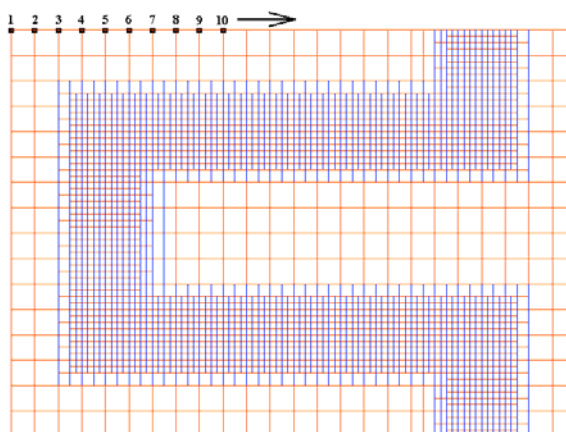
- (1) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้ง
- (2) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอน
- (3) การแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนีเดียว

ในแต่ละอัลกอริทึมแบบขนานได้แยกพัฒนาออกเป็น 2 ส่วนของโปรแกรมคือ 1) โปรแกรมการแบ่งข้อมูลสำหรับแบ่งข้อมูลบนโดเมนของเซลล์สุริยะออกเป็นส่วนใหญ่ (Domain decomposition) เพื่อแจกจ่ายไปคำนวณบนคอมพิวเตอร์ในเครือข่าย 2) โปรแกรมจำลองแบบ สำหรับคำนวณหาผลเฉลยของปัญหา โดยรายละเอียดของโปรแกรมการแบ่งข้อมูลจะมีวิธีการทำงานที่แตกต่าง ซึ่งจะเป็นไปตามลักษณะของแต่ละอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้ ส่วนโปรแกรมการจำลองแบบได้พัฒนาโปรแกรมออกเป็น 2 โปรแกรม ตามลักษณะของ Master-Slave model คือ 1) โปรแกรมแม่ (Master program) เป็นโปรแกรมสำหรับทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องแม่เพื่อทำหน้าที่ในการแจกจ่ายข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และ 2) โปรแกรมลูก (Worker program) เป็นโปรแกรมสำหรับทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทำหน้าที่หลักในคำนวณข้อมูลที่ได้รับจากคอมพิวเตอร์เครื่องแม่ ความสัมพันธ์ของโปรแกรมแม่และโปรแกรมลูกจะได้กล่าวในหัวข้อ 5.4.4 ในโปรแกรมลูกมีส่วนการทำงานที่สำคัญ 2 ส่วน คือ 1) ส่วนสื่อสารข้อมูล กับ 2) ส่วนคำนวณข้อมูล ความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ส่วนจะได้กล่าวถึงอีกในหัวข้อ 5.4.4 ซึ่งในส่วนสื่อสารข้อมูลจะมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างเป็นไปตามโปรแกรมการแบ่งข้อมูลในแต่ละอัลกอริทึม แต่ในส่วนคำนวณข้อมูลของทุกโปรแกรมการจำลองแบบของแต่ละอัลกอริทึมจะมีฟังก์ชันการคำนวณที่เหมือนกันทุกโปรแกรม และคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่องมีฟังก์ชันการคำนวณข้อมูลเหมือนกันทุกเครื่องลูก แต่ทำการคำนวณกับข้อมูลในส่วนที่ได้รับเท่านั้น ตามลักษณะเทคนิคของ SIMD ดังนั้นจึงแยกรายละเอียดการอธิบายดังนี้ รายละเอียดของโปรแกรมการแบ่งข้อมูล และ รายละเอียดของการทำงานในส่วนสื่อสารข้อมูลในโปรแกรมจำลองแบบจะแยกอธิบายเป็นรายละเอียดของแต่ละอัลกอริทึมแบบขนาน แต่รายละเอียดของการทำงานในส่วนคำนวณข้อมูลในโปรแกรมจำลองแบบของทั้ง 3 อัลกอริทึม จะอธิบายพร้อมกันในหัวข้อ 5.4.4 เพราะมีลักษณะฟังก์ชันการทำงานที่เหมือนกัน โดยมีรายละเอียดของการพัฒนาอัลกอริทึมแบบขนานทั้ง 3 วิธีมีดังต่อไปนี้

5.4.1 การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้ง

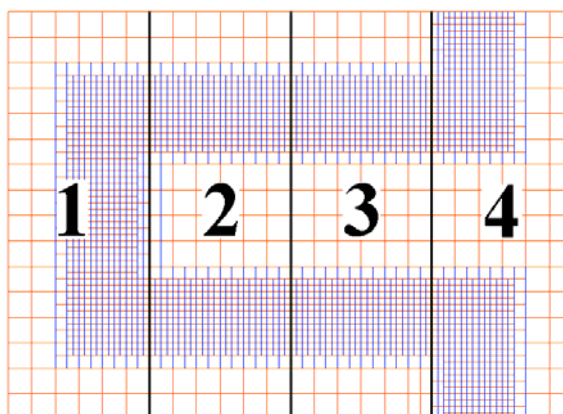
เป็นวิธีการแบ่งโดเมนของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิชออกเป็นส่วนใหญ่ โดยพิจารณาจากพื้นที่แล้วแยกออกเป็นส่วนใหญ่ๆ กันในแนวตั้ง ซึ่งการแบ่งตามลักษณะดังกล่าวจะเป็นการแบ่งข้อมูลแล้วทำให้ดัชนีที่กำกับกริดบนโดเมนไม่ต่อเนื่องกัน และดัชนีไม่เรียงลำดับ ทำให้มีการกระโดดของดัชนีในแต่ละซับโดเมนในข้อมูลที่ถูกแบ่ง ซึ่งจะทำให้การคำนวณด้วยวิธีการทำซ้ำที่ต้องใช้ดัชนีเรียงกันตลอดทั้งซับโดเมนไม่สามารถทำได้ ดังนั้นภายในซับโดเมนจึงต้องมีการเรียงดัชนีใหม่ทุกครั้งที่มีการคำนวณจากการทำซ้ำ โดยมีรายละเอียดการทำงานของการแบ่งโดเมนดังนี้

- (1) โปรแกรมสร้างกริดกำหนดกริดลงบนโดเมนของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิชและกำกับตัวเลขด้วยดัชนีเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5.7



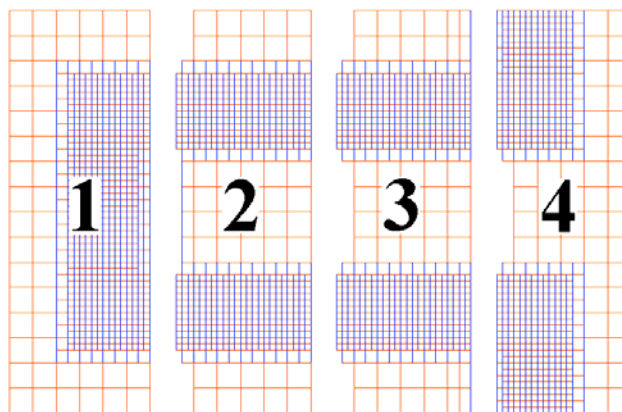
รูปที่ 5.7 โครงสร้างของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิช ซึ่งมีดัชนีกำกับกริดทุกจุด ได้จากโปรแกรมสร้างกริด

- (2) การแบ่งโดเมนจะพิจารณาจากกริดหลักขนาดใหญ่ในแนวตั้งแล้วหารจำนวนกริดหลักด้วยจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก (โดยจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกสามารถเลือกได้) โดยกริดหลักจะเป็นเส้นขอบเขตการแบ่งข้อมูลสำหรับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกในแต่ละเครื่องที่จะได้รับ ซึ่งก็คือข้อมูลในพื้นที่ที่ถูกแบ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.8



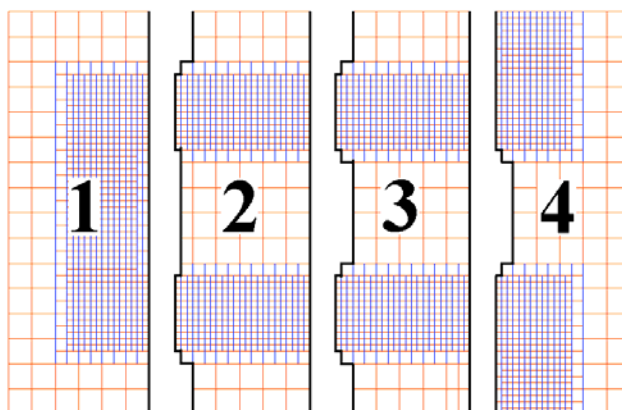
รูปที่ 5.8 การแบ่งโดเมนโดยใช้เส้นกริดหลักในแนวตั้งเพื่อแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วน ๆ (ในที่นี้สมมุติว่าเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกอยู่สี่เครื่อง)

- (3) โปรแกรมแยกข้อมูลบนโดเมนออกเป็นส่วน ๆ โดยแยกออกตามพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 5.9



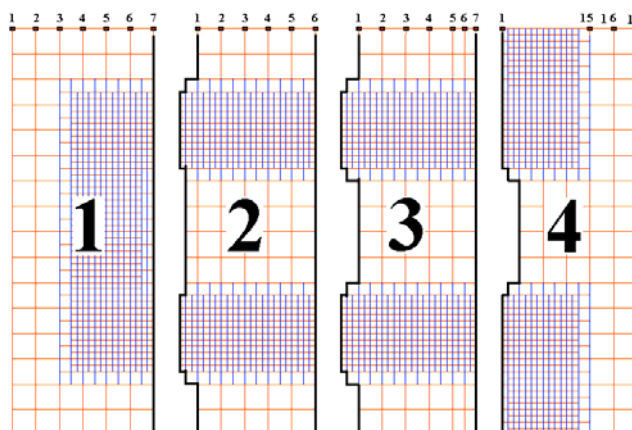
รูปที่ 5.9 ข้อมูลบนโดเมนถูกแยกออกเป็นส่วน ๆ ตามพื้นที่

- (4) โปรแกรมจะหาข้อมูลที่อยู่บนขอบด้านซ้ายและขอบด้านขวาสำหรับส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูกที่อยู่รอบข้างที่ต้องการข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์เครื่องแรกจะไม่มีข้อมูลขอบที่อยู่ด้านซ้ายเพราะไม่ต้องส่งข้อมูลที่ขอบ และคอมพิวเตอร์เครื่องที่สุดท้ายไม่มีข้อมูลขอบด้านขวาเพราะไม่ต้องส่งข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ข้อมูลกริดที่ขอบของแต่ละพื้นที่ หากจากข้อมูลขอบด้านซ้ายและขอบด้านขวา โดยแสดงด้วยเส้นทึบสีดำ

- (5) ข้อมูลในแต่ละส่วนจะต้องถูกเรียงดัชนีใหม่ เพราะต้องนำไปอ้างอิงในการคำนวณบนด้วยวิธีวนทำซ้ำคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องลูก ดังแสดงในรูปที่ 5.11



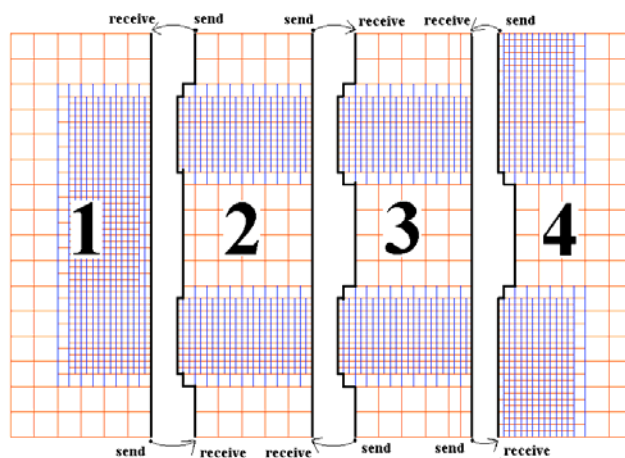
รูปที่ 5.11 ดัชนีของแต่พื้นที่ถูกเรียงใหม่เพื่อใช้ในการอ้างอิงในการคำนวณด้วยวิธีวนทำซ้ำ

เมื่อนำอัลกอริธึมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น มาเขียนเป็นโปรแกรมการแบ่งข้อมูล มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- (1) โปรแกรมจะเริ่มอ่านจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และอ่านค่าจำนวนกริดจากไฟล์ Initialize Cluster File ซึ่งเป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และเก็บจำนวนกริด
- (2) โปรแกรมอ่านค่าข้อมูลกริดจากไฟล์ Grid Specification File
- (3) โปรแกรมทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วน ๆ เท่าจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก โดยแบ่งจากจำนวนกริดหลัก แล้วแยกข้อมูลเป็นส่วน ๆ และหาข้อมูลที่ขอบสำหรับส่งไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องอื่น
- (4) โปรแกรมเรียงดัชนีใหม่สำหรับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องใช้ในการอ้างอิงสำหรับการคำนวณด้วยวิธีการทำซ้ำที่ต้องใช้ดัชนีที่เรียงกันตลอดทั้งซับโดเมนและเก็บข้อมูลทั้งหมดในไฟล์ Data Index File และเก็บค่าจำนวนกริดที่คอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องได้รับในไฟล์ Initialize Cluster File

ในส่วนสื่อสารข้อมูลของโปรแกรมจำลองแบบของอัลกอริธึมที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นส่วนที่สำคัญ เพราะทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ขอบระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกด้วยกัน จึงได้ออกแบบอัลกอริธึมแบบขนานสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ขอบ โดยใช้อัลกอริธึมของการป้องกันการตายข้อมูล ที่ใช้การสลับกันระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องคู่และคอมพิวเตอร์เครื่องคู่ในการส่งและรับข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ขณะที่คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่งไปด้านซ้ายและขวา คอมพิวเตอร์เครื่องคู่จะรับข้อมูลจากด้านซ้ายและขวา และในทางกลับกันเมื่อคอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่ง คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ก็จะรับข้อมูล สำหรับโค้ดในการเขียนโปรแกรมแสดงในรูปที่ 5.12

ใน 1 รอบของการคำนวณด้วยการทำซ้ำ จะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูล ซึ่งดัชนีใหม่ที่เรียงกันภายในซับโดเมนจะถูกกลับเป็นดัชนีเก่าที่ได้จากโปรแกรมสร้างกริดในตอนต้น เพราะจะต้องมีการอ้างอิงถึงเพื่อนบ้านของข้อมูลที่ขอบที่อยู่ในคอมพิวเตอร์เครื่องลูกต่างเครื่องกัน และเมื่อรับข้อมูลเข้ามาเก็บไว้บนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ก่อนจะมีการคำนวณจะต้องมีการเรียงดัชนีใหม่ภายในแต่ละซับโดเมน เพื่อทำการคำนวณด้วยวิธีการวนทำซ้ำ การสลับดัชนีดังกล่าวจะกระทำทุก ๆ รอบของการวนทำซ้ำในการคำนวณ



(ก)

```

if(mod(ordernode,2) == 0)then                                /*If this node is even number*/
  if(rightWorker /= 0)then                                  /*if this node has right worker node*/
    call pvmfrecv(rightWorker,msgtype,err) /*receive from right node*/
    call pvmfsend(rightWorker,msgtype,err) /*send to right node*/
  end if
  if(leftWorker /= 0)then                                    /*if this node has left worker node*/
    call pvmfrecv(leftWorker,msgtype,err) /*receive from left node*/
    call pvmfsend(leftWorker,msgtype,err) /*send to left node*/
  end if
else if(mod(ordernode,2) /= 0)then                          /*If this node is odd number*/
  if(leftWorker /= 0)then                                    /*if this node has left worker node*/
    call pvmfrecv(leftWorker,msgtype,err) /*receive from left node*/
    call pvmfsend(leftWorker,msgtype,err) /*send to left node*/
  end if
  if(rightWorker /= 0)then                                  /*if this node has right worker node*/
    call pvmfrecv(rightWorker,msgtype,err) /*receive from right node*/
    call pvmfsend(rightWorker,msgtype,err) /*send to right node*/
  end if
end if
end if

```

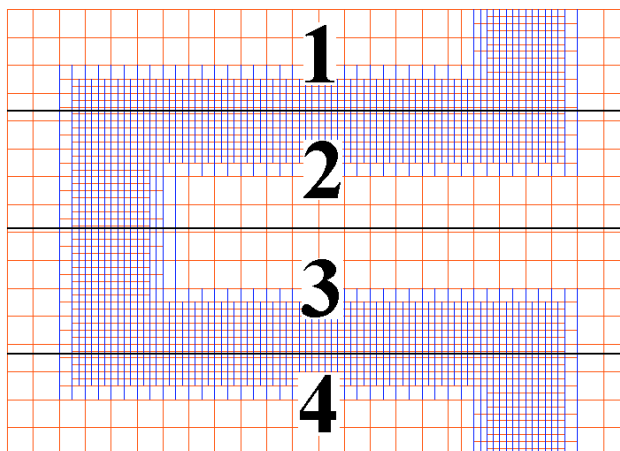
(ข)

รูปที่ 5.12 วิธีการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ขอบ ใช้วิธีของวิธีป้องกันการตายของข้อมูล โดยการสลับจังหวะการส่งไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องด้านซ้ายและคอมพิวเตอร์เครื่องด้านขวา และรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์เครื่องด้านซ้ายและคอมพิวเตอร์เครื่องด้านขวา ระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องคู่และคอมพิวเตอร์เครื่องคี่ (ก)แสดงการทำงานของการทำงานรับส่งข้อมูลที่ขอบของวิธีป้องกันการตายของข้อมูล (ข) แสดงโค้ดของโปรแกรมการทำงานสลับกันระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องคู่กับคอมพิวเตอร์เครื่องคี่

5.4.2 การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนในแนวนอน

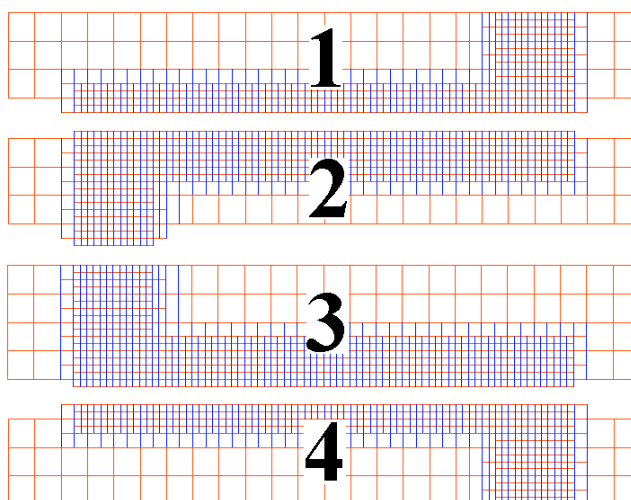
วิธีนี้จะแบ่งโดเมนของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิชโดยอาศัยพื้นที่ในแนวนอน เพราะดัชนีที่กำกับกริดบนโดเมนของเซลล์สุริยะเรียงตามแถวในแนวนอน และเมื่อทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วน ๆ แล้ว ดัชนีถูกแบ่งออกเป็นส่วน ๆ และภายในซับโดเมนดัชนีก็ยังมีเรียงลำดับเหมือนเดิม ซึ่งไม่จำเป็นต้องนำดัชนีมาเรียงใหม่อีก จะมีประโยชน์มากในการคำนวณด้วยการวนซ้ำ โดยรายละเอียดการทำงานในการแบ่งข้อมูลดังนี้

- (1) โปรแกรมสร้างกริดกำหนดกริดลงบนโดเมนของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิชและกำกับตัวเลขดัชนีดังแสดงในรูปที่ 5.7
- (2) ทำการแบ่งโดเมนออกเป็นส่วน ๆ โดยคำนวณจาก จำนวนเส้นกริดขนาดเล็กในแนวนอนหารด้วยจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก (โดยจำนวนเครื่องลูกสามารถเลือกได้) แล้วนำจำนวนกริดให้แต่ละส่วนมีกริดใกล้เคียงกัน ถ้าจำนวนกริดมีค่าเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ จะต้องขยับเส้นกริดขนาดเล็กจนได้จำนวนกริดในแต่ละส่วนมีจำนวนไม่ต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยเส้นกริดขนาดเล็กที่คำนวณได้จะแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วน ๆ ซึ่งแต่ละส่วนจะมีกริดสำหรับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องจะได้รับ ดังแสดงในรูปที่ 5.13



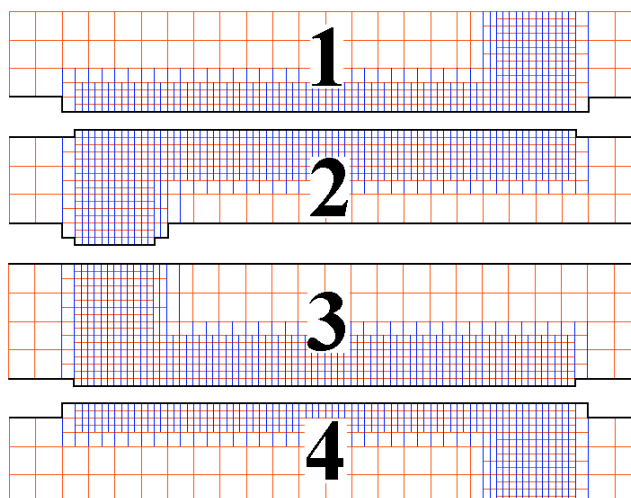
รูปที่ 5.13 โดเมนถูกแบ่งออกเป็นส่วน ๆ โดยใช้เส้นกริดขนาดเล็กในแนวนอนเพื่อแบ่งพื้นที่ของโดเมน (ในที่นี้สมมุติว่าเครื่องลูกอยู่สี่เครื่อง)

- (3) แบ่งข้อมูลออกเป็นส่วน ๆ เพื่อเตรียมสำหรับแจกจ่ายไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูก ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 พื้นที่ของโดเมนถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ

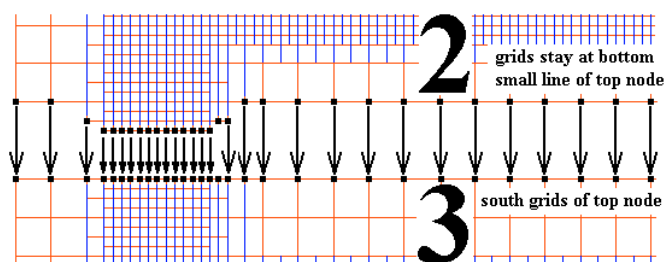
- (3) หาข้อมูลที่อยู่ขอบด้านบนและขอบด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.15 สำหรับส่งข้อมูลที่ขอบแลกเปลี่ยนระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูก



รูปที่ 5.15 ข้อมูลกริดที่ขอบของแต่ละพื้นที่ ถูกหาโดยการหาข้อมูลขอบด้านบนและขอบด้านซ้าย โดยแสดงด้วยเส้นทึบสีดำ

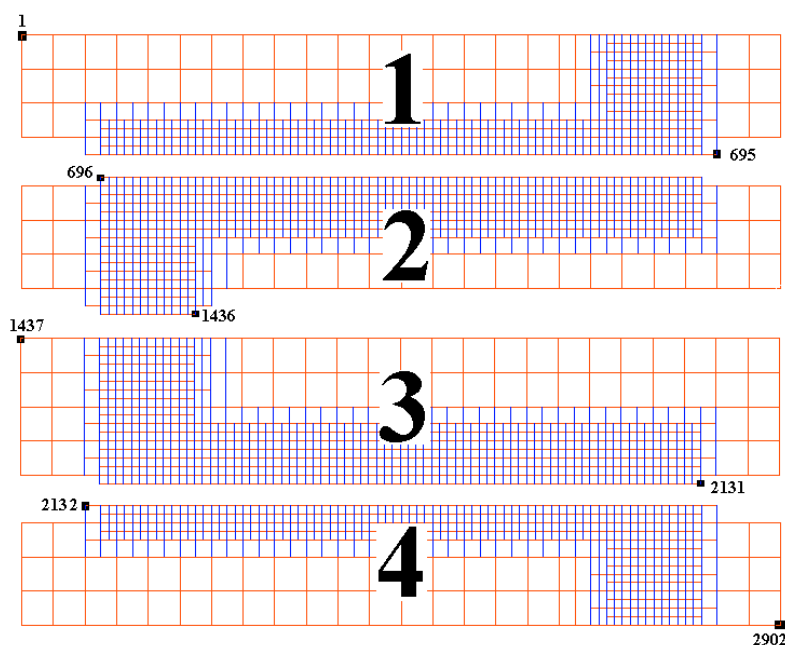
วิธีการหาข้อมูลที่ขอบ มีดังต่อไปนี้

- หากกริดที่อยู่ขอบล่างสุดของพื้นที่ของซับโดเมนปัจจุบัน ซึ่งจะเป็นกริดที่อยู่ขอบล่างของพื้นที่ของซับโดเมนปัจจุบัน
- จากนั้นเอาข้อมูลจากกริดที่อยู่ขอบล่าง มาหากริดที่อยู่ด้านทิศใต้ ซึ่งจะเป็นขอบบนของเครื่องคอมพิวเตอร์อีกเครื่องหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 วิธีการหากริดที่อยู่ขอบบนและกริดที่อยู่ขอบล่าง

- (6) ข้อมูลแต่ละส่วนจะใช้ดัชนีเดิมในการคำนวณของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 พื้นที่แต่ละส่วนยังใช้ดัชนีตัวเลขเดิม

เมื่อนำวิธีการแบ่งข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้น มาเขียนเป็นโปรแกรมการแบ่งข้อมูล มีขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมดังนี้

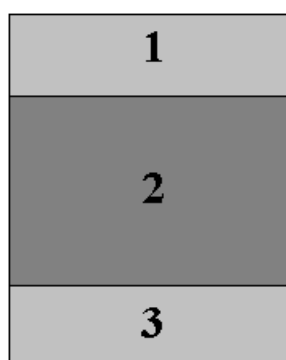
- (1) โปรแกรมจะเริ่มอ่านจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และอ่านค่าจำนวนกริดจากไฟล์ Initialize Cluster File ซึ่งเป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และเก็บจำนวนกริด
- (2) โปรแกรมอ่านค่าข้อมูลกริดจากไฟล์ Grid Specification File
- (3) โปรแกรมแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วน ๆ เท่าจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ตามอัลกอริทึมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น
- (4) โปรแกรมทำการเก็บข้อมูลทั้งหมดในไฟล์ Data Index File และเก็บค่าจำนวนกริดของคอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องได้รับ ในไฟล์ Initialize Cluster File

ในส่วนสื่อสารข้อมูลของโปรแกรมจำลองแบบสำหรับอัลกอริทึมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งเป็นส่วนที่ติดต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกด้วยกัน ดังนั้นจึงได้ออกแบบหน่วยความจำสำหรับคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องเพื่อเก็บข้อมูลที่รับมาจากคอมพิวเตอร์เครื่องแม่ และเก็บข้อมูลที่ขอบที่รับมาจากคอมพิวเตอร์เครื่องลูกที่อยู่ด้านข้าง โดยได้ออกแบบหน่วยความจำเป็น 3 บริเวณดังแสดงในรูป 5.18 เพื่อเก็บข้อมูลดังนี้

บริเวณที่ 1 เก็บข้อมูลที่รับจากคอมพิวเตอร์เครื่องลูกที่ส่งข้อมูลขอบล่างมาให้

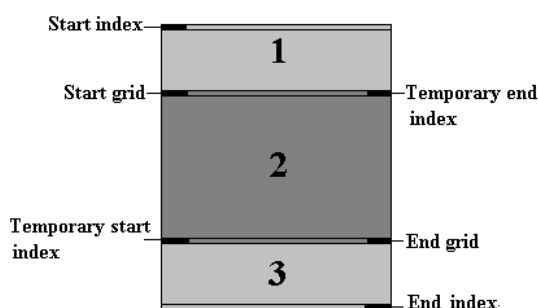
บริเวณที่ 2 เก็บข้อมูลที่รับจากเครื่องแม่

บริเวณที่ 3 เก็บข้อมูลที่รับจากคอมพิวเตอร์เครื่องลูกที่ส่งข้อมูลขอบบนมาให้



รูปที่ 5.18 โครงสร้างของหน่วยความจำที่ออกแบบให้มีพื้นที่ 3 ส่วนสำหรับคอมพิวเตอร์เครื่องแต่ละเครื่อง ในการรับ ข้อมูลขอบจากด้านบนและจากขอบด้านล่างของคอมพิวเตอร์เครื่องลูกที่อยู่ด้านล่างและด้านบน ตามลำดับ

การเก็บข้อมูลดังกล่าวทำให้มี ดัชนีเรียงกันไม่กระโดด ซึ่งทำให้สะดวกในการคำนวณหาผลเฉลยด้วยวิธีทำซ้ำ และได้กำกับชื่อแต่ละตำแหน่งของหน่วยความจำ เพื่อสะดวกในการอ้างอิง และการส่งรับแลกเปลี่ยนข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ชื่อกำกับของดัชนีที่เก็บในหน่วยความจำ

ดัชนีที่กำกับในรูปที่ 5.19 สำหรับใช้ในการอ้างอิงดังนี้

Start index ถึง End index คือ ดัชนีสำหรับการจองหน่วยความจำ

Start index ถึง Start grid - 1 คือ ดัชนีของหน่วยความจำสำหรับรับข้อมูลจากขอบบนของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านล่าง

Start grid ถึง Temporary end index คือ ดัชนีของหน่วยความจำสำหรับส่งข้อมูลขอบบนไปให้เครื่องคอมพิวเตอร์ด้านบน

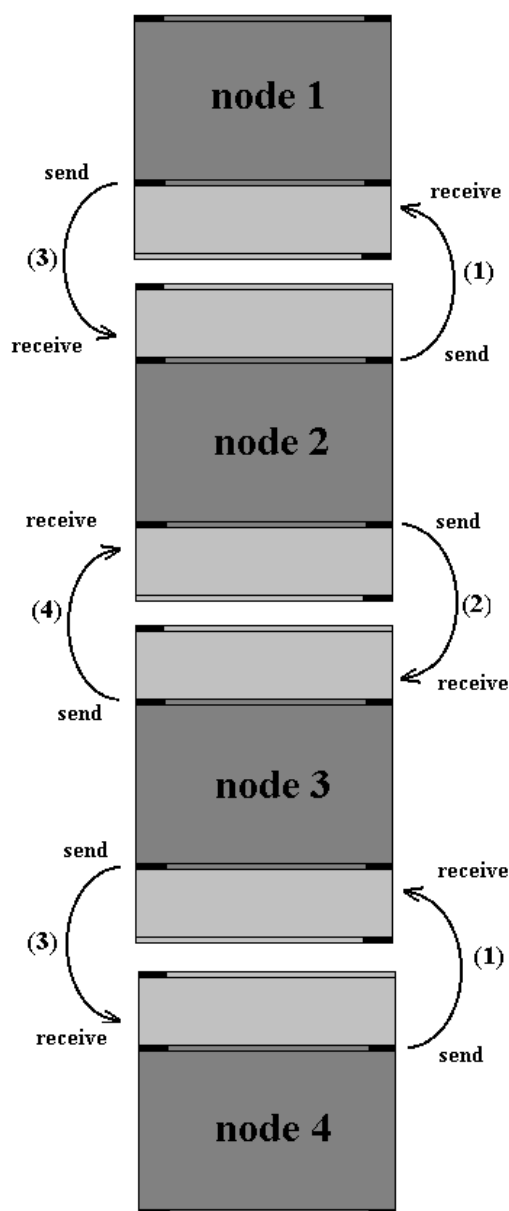
Start grid ถึง End grid คือ พื้นที่ของหน่วยความจำสำหรับรับข้อมูลที่คอมพิวเตอร์เครื่องแม่ส่งมาให้ โดยข้อมูลที่ได้อาจมีการแบ่งข้อมูล

Temporary start index ถึง End index คือ ดัชนีของหน่วยความจำสำหรับส่งข้อมูลขอบล่างไปให้เครื่องคอมพิวเตอร์ด้านล่าง

End grid-1 ถึง End index คือ ดัชนีของหน่วยความจำสำหรับรับข้อมูลขอบล่างของเครื่องคอมพิวเตอร์ด้านบน

มีตัวอย่างการเรียงดัชนีในตัวอย่างในรูปที่ 5.23

เมื่อมีคอมพิวเตอร์เครื่องลูกจำนวนหลายเครื่อง ดังนั้นการติดต่อแลกเปลี่ยนกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ จึงใช้วิธีการเข้าจังหวะของวิธีเพื่อป้องกันการตายของข้อมูลระหว่างการส่ง ซึ่งจะสลับจังหวะการส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องคู่และคอมพิวเตอร์เครื่องคี่ โดยถ้าคอมพิวเตอร์เครื่องคู่ทำการส่งข้อมูลที่ขอบด้านบนและด้านล่าง คอมพิวเตอร์เครื่องคี่จะทำการรับข้อมูลที่ขอบล่างและขอบบน โดยมีจังหวะการทำงานแสดงในรูปที่ 5.20



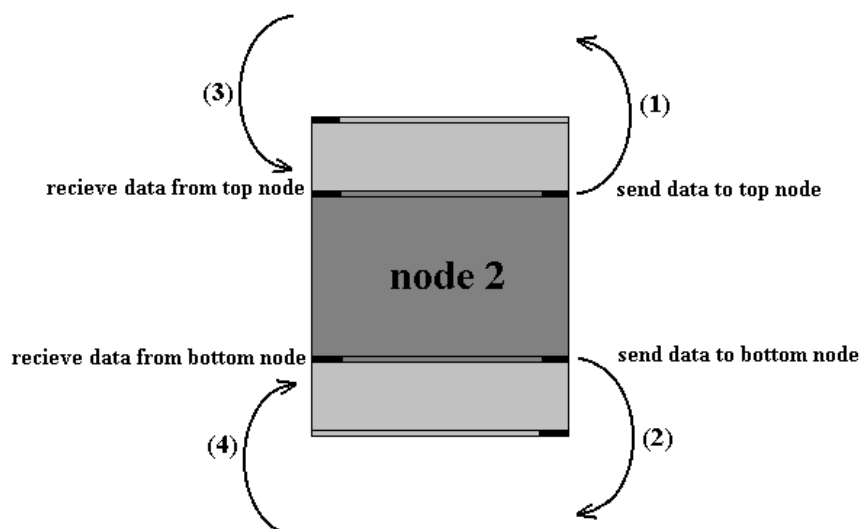
รูปที่ 5.20 วิธี safety deadlock ในการรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูก โดยที่จังหวะที่1 คือ คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่งข้อมูลขอบบนไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ที่อยู่ด้านบน ทำการรับข้อมูล

จังหวะที่2 คือ คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่งข้อมูลขอบล่างไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ที่อยู่ด้านล่าง ทำการรับข้อมูล

จังหวะที่3 คือ คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่งข้อมูลขอบล่างไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ที่อยู่ด้านล่าง ทำการรับข้อมูล

จังหวะที่4 คือ คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ส่งข้อมูลขอบบนไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องคู่ที่อยู่ด้านบน ทำการรับข้อมูล

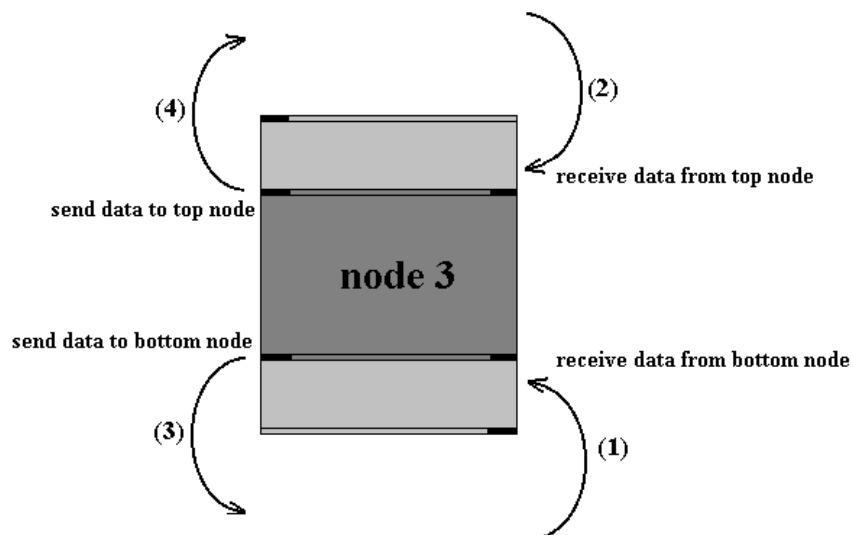
การเข้าจังหวะการทำงานของคอมพิวเตอร์เครื่องคู่แสดงในรูป ที่ 5.21



- (1) ส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ด้านบน (2) ส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ด้านล่าง
(3) รับข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ด้านบน (4) รับข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ด้านล่าง

รูปที่ 5.21 การเข้าจังหวะของคอมพิวเตอร์เครื่องคู่ตามวิธีป้องกันการตายของข้อมูล

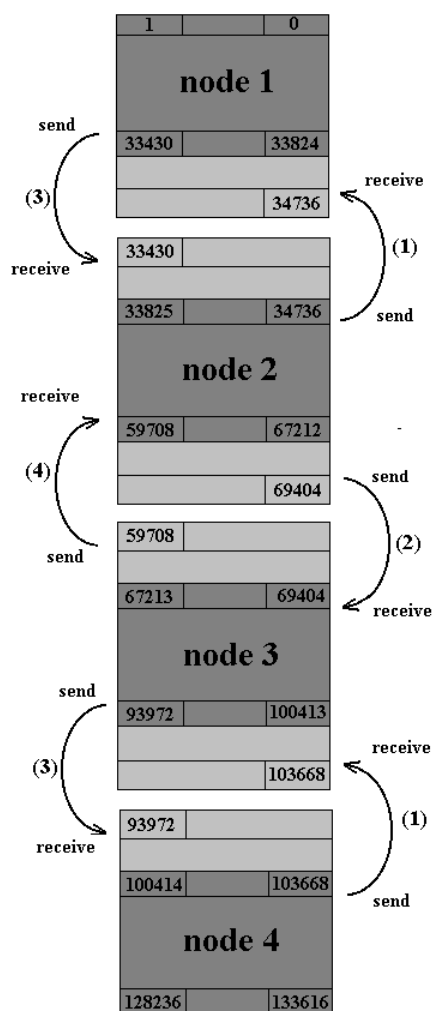
การเข้าจังหวะการทำงานของคอมพิวเตอร์เครื่องคู่แสดงในรูป ที่ 5.22



- (1) รับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์เครื่องด้านล่าง (2) รับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์เครื่องด้านบน
(3) ส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องด้านล่าง (4) ส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ด้านบน

รูปที่ 5.22 การเข้าจังหวะของคอมพิวเตอร์เครื่องคู่ตามวิธีป้องกันการตายของข้อมูล

ตัวอย่างการเข้าจังหวะการรับส่งข้อมูลตามวิธีป้องกันการตายของข้อมูล แสดงในรูป 5.23

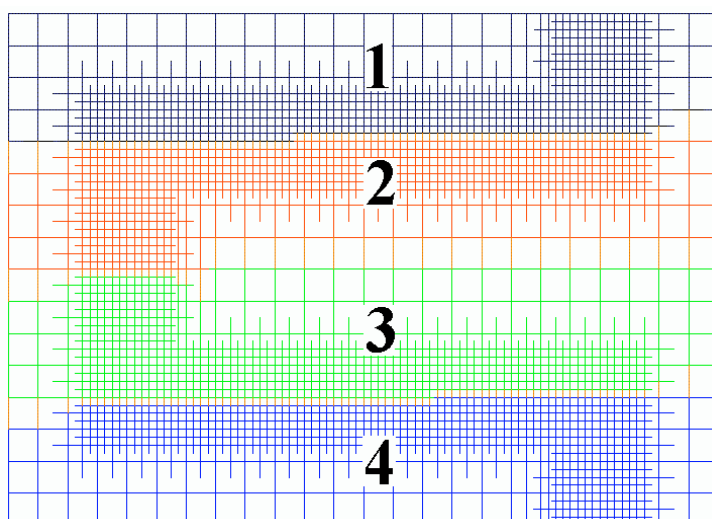


รูปที่ 5.23 ตัวอย่างการอ้างอิงดัชนีในการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ชอบด้วยวิธีป้องกันการตายของข้อมูล

5.4.3 การแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนจากดัชนีเดียว

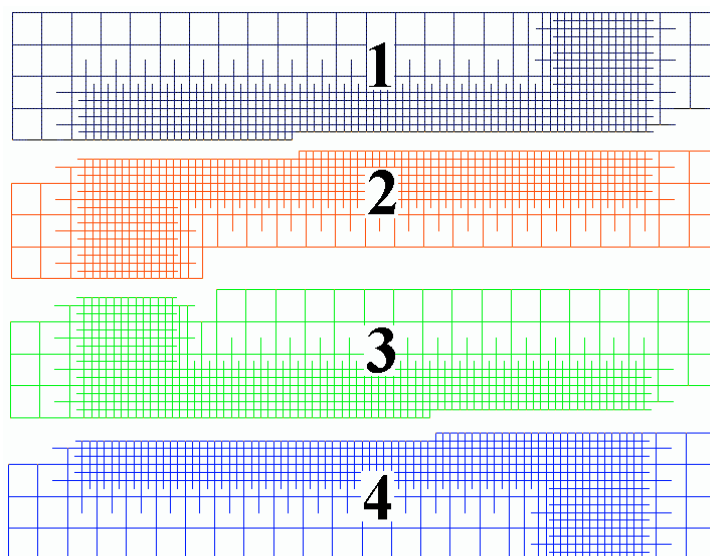
วิธีนี้จะแบ่งโดเมนของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิชโดยวิธีหารจำนวนกริดด้วยจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ซึ่งจะได้ข้อมูลในแต่ละส่วนมีจำนวนกริดเท่ากันและมีดัชนีเรียงลำดับกันเหมือนเดิม มีวิธีการแบ่งข้อมูลดังนี้

- (1) โปรแกรมสร้างกริดกำหนดกริดลงบนโดเมนของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดวิชและกำกับตัวเลขดัชนีดังแสดงในรูป 5.7
- (2) แบ่งจำนวนกริดในโดเมนโดยการคำนวณจากการหารจำนวนกริดทั้งหมดในโดเมนด้วยจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก (โดยจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกสามารถเลือกได้) และยังให้ดัชนีเรียงลำดับกันเหมือนเดิม ดังที่แสดงในรูป 5.24 สีที่ต่างกันแสดงถึงข้อมูลสำหรับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่อง



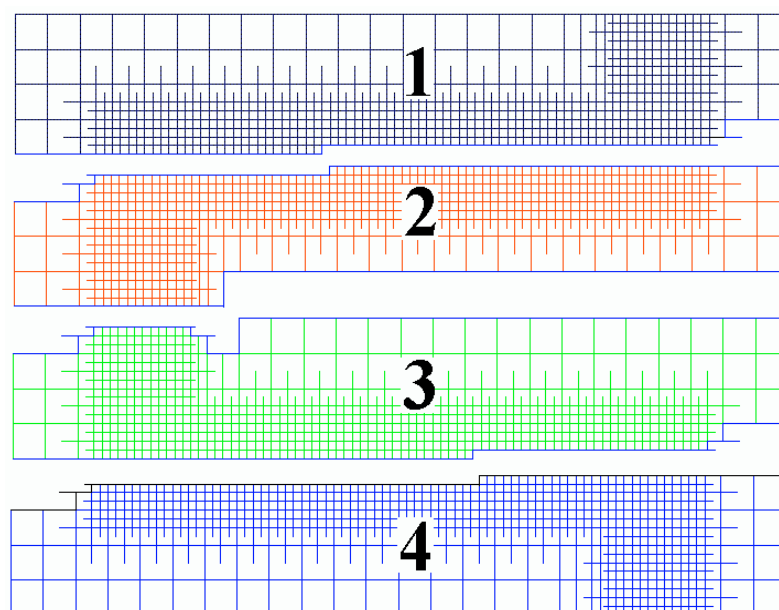
รูปที่ 5.24 การแบ่งจำนวนกริดออกเป็นส่วนๆ โดยการหารจำนวนกริดทั้งหมดด้วยจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก (ในที่นี้สมมุติว่าคอมพิวเตอร์เครื่องลูกอยู่สี่เครื่อง) โดยแต่ละสีคือข้อมูลแต่ละส่วนสำหรับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่อง และดัชนียังคงเรียงลำดับกันเหมือนเดิม

- (3) แบ่งโดเมนออกเป็นส่วนๆ ดัชนียังเรียงลำดับกันเหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 ข้อมูลถูกแยกออกเป็นส่วน ๆ

(4) หาข้อมูลที่อยู่ขอบบนและล่างของข้อมูลในแต่ละส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5.26

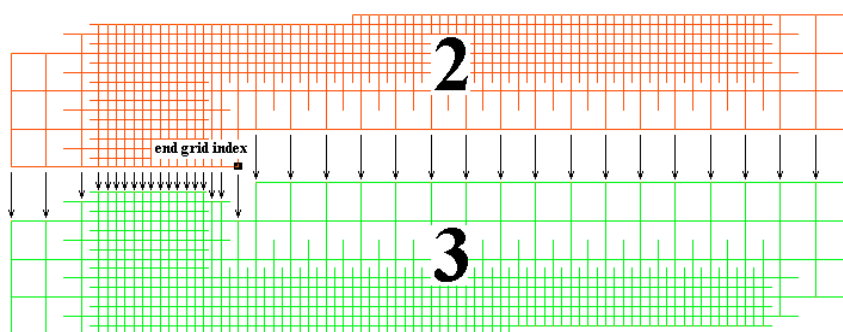


รูปที่ 5.26 หาข้อมูลกริดที่อยู่ขอบบน และขอบล่าง

วิธีการหาขอบข้อมูลที่อยู่ด้านบนและด้านล่างดังต่อไปนี้

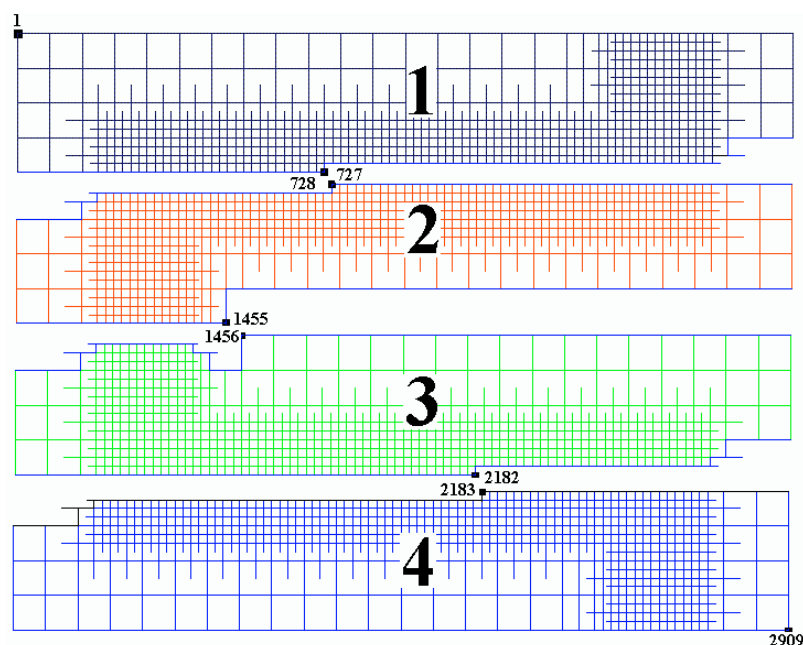
ในแต่ละชั้นโดเมนจะมีดัชนีกำกับจุดกริดที่อยู่ท้ายสุด (end grid index) จึงใช้ประโยชน์มาหาค่าขอบบนและขอบล่างดังนี้

- ทำการอ่านข้อมูลค่าที่อยู่ด้านใต้ของจุดกริด โดยทำทุกจุดกริดในแต่ละชั้นโดเมน ถ้าดัชนีของกริดด้านใต้มากกว่าดัชนีที่อยู่สุดท้าย กริดจุดนี้คือกริดที่เป็นข้อมูลที่ขอบด้านล่างของชั้นโดเมนปัจจุบัน ส่วนกริดด้านใต้จะเป็นข้อมูลที่ขอบด้านบนของชั้นโดเมนถัดไปที่อยู่ด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 วิธีการหาข้อมูลกริดที่อยู่ขอบบนและขอบล่าง

(7) ข้อมูลในแต่ละชั้นโดเมนยังใช้ดัชนีเดิมและยังคงเรียงลำดับเหมือนเดิม ดังแสดงในรูป 5.28

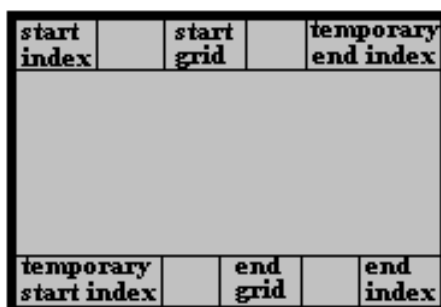


รูปที่ 5.28 ดัชนีของกริดยังคงเรียงลำดับกันเหมือนเดิม

เมื่อนำวิธีการแบ่งข้อมูลข้างต้น มาเขียนเป็นโปรแกรมการแบ่งข้อมูล มีขั้นตอนการทำงานของโปรแกรดังนี้

- (1) โปรแกรมจะเริ่มอ่านจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และอ่านค่าจำนวนกริดจากไฟล์ Initialize Cluster File ซึ่งเป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และเก็บจำนวนกริด
- (2) โปรแกรมอ่านค่าข้อมูลกริดจากไฟล์ Grid Specification File
- (3) โปรแกรมแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนๆ เท่าจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ตามอัลกอริทึมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น
- (4) โปรแกรมทำการเก็บข้อมูลทั้งหมดในไฟล์ Data Index File และเก็บค่าจำนวนกริดที่คอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องได้รับในไฟล์ Initialize Cluster File

ในส่วนสื่อสารข้อมูลของโปรแกรมจำลองแบบของอัลกอริทึมข้างต้น ซึ่งจะมีการติดต่อสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกหลายเครื่อง จึงได้ออกเป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูล ที่ได้รับจากคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นที่ส่งมาให้ และข้อมูลที่รับมา จะต้องเก็บในหน่วยความจำ โดยดัชนีต้องเรียงลำดับกันเพราะจะต้องใช้ในการคำนวณด้วยวิธีการทำซ้ำ และได้ออกแบบหน่วยความจำ ซึ่งมีชื่อกำกับดังแสดงในรูป 5.29



รูปที่ 5.29 ชื่อที่กำกับดัชนีในหน่วยความจำที่ออกแบบ

ชื่อที่กำกับในรูปที่ 5.29 นำมาใช้ประโยชน์ดังนี้

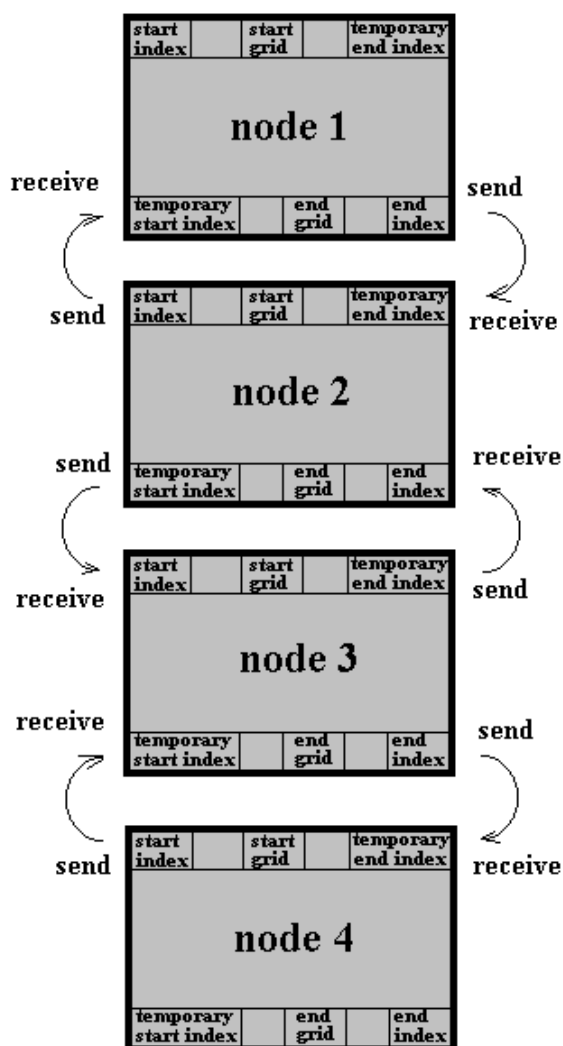
Start index ถึง End index คือ ดัชนีสำหรับการจองหน่วยความจำ

Start grid ถึง End grid คือ พื้นที่ของหน่วยความจำสำหรับรับข้อมูลที่คอมพิวเตอร์เครื่องแม่ส่งมาให้ โดยเป็นข้อมูลที่ได้จากการโปรแกรมแบ่งข้อมูล

Start grid ถึง Temporary end index คือ ดัชนีสำหรับการรับและส่งข้อมูลกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านบน

Temporary start index ถึง End index คือ ดัชนีสำหรับการรับและส่งข้อมูลกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ด้านล่าง

ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกด้วยกันใช้วิธีการเข้าจังหวะของอัลกอริทึมป้องกันการตายของข้อมูล ซึ่งมีการสลับการรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์โหนดคู่และคอมพิวเตอร์โหนดคี่ ดังแสดงในรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 การแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ขอบโดยใช้วิธีป้องกันการตายของข้อมูล โดยมีการสลับการรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์โหนดคู่และคอมพิวเตอร์โหนดคี่ ในลักษณะที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.4.2

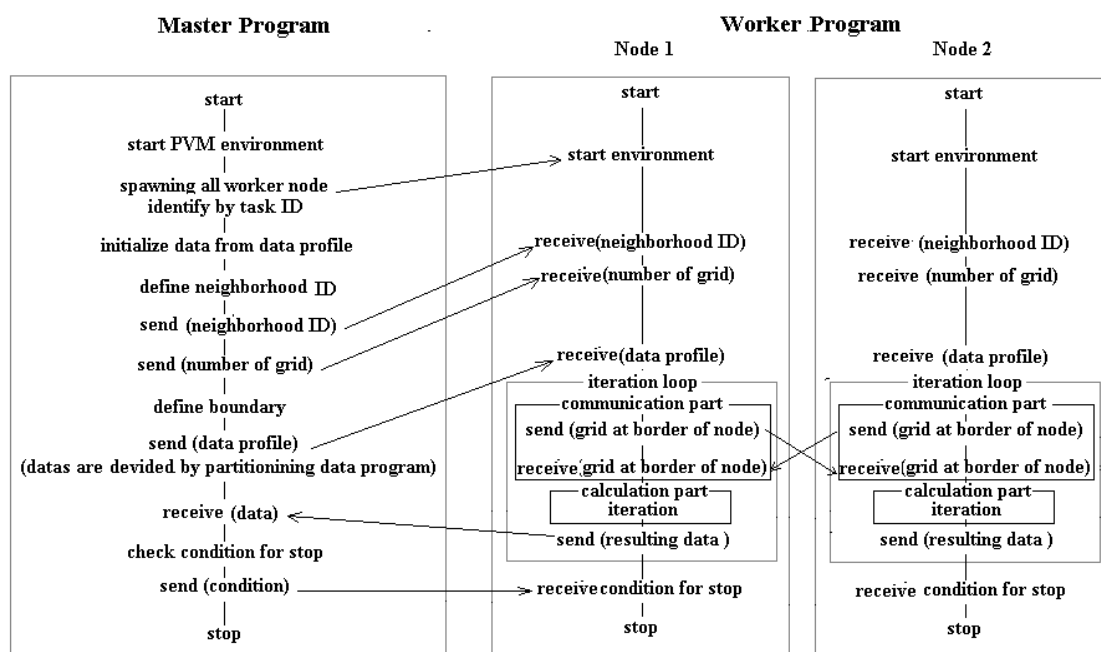
จากวิธีการใช้ตัวเลขกำกับจุดกริดด้วยดัชนีเดียว ซึ่งใช้การเรียงจุดเรียงลำดับตัวเลขกริดตัวแรกเป็นตัวเลข 1 และไล่เรียงลำดับตัวเลขจนถึงจุดกริดตัวสุดท้าย ที่ไม่มีการซ้ำกันของตัวเลข เรียงลำดับกริดตามแนวนอน และเรียงไล่ลำดับแถวไปจนแถวสุดท้าย ดังนั้นวิธีการแบ่งข้อมูลทั้ง 3 อัลกอริธึม คือ (1) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวตั้ง (2) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวนอน และ (3) การแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วนจากดัชนีเดียว จะมีผลทำให้ดัชนีที่กำกับบนจุดกริดแยกจากกัน ตามแต่วิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วน โดยแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียดังต่อไปนี้

- (1) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้ง: วิธีนี้ได้แบ่งข้อมูลบนโดเมนจากการใช้เส้นกริดหลักขนาดใหญ่ในแนวตั้งเพื่อแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่ ๆ ให้เท่ากับจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก เนื่องจากวิธีใช้การแบ่งข้อมูลจากเส้นกริดหลักขนาดใหญ่ จึงทำให้ข้อมูลแต่ละส่วนมีจำนวนกริดไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลให้ไม่เกิด Load Balancing ขณะทำการคำนวณ จากการแบ่งข้อมูลในแนวตั้งแต่ดัชนีได้เรียงลำดับในแนวนอน เมื่อแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่ ๆ ทำให้แต่ละส่วนได้ข้อมูลที่มีการกระโดดของดัชนี การคำนวณด้วยการวนทำซ้ำไม่สามารถทำได้ ดังนั้นในระหว่างที่มีการคำนวณจะต้องเรียงดัชนีใหม่ของแต่ละส่วนข้อมูล และในระหว่างการแลกเปลี่ยนข้อมูล จะต้องกลับมาใช้ดัชนีเก่าเพื่อให้สามารถอ้างอิงกับข้อมูลของเพื่อนบ้านในการแลกเปลี่ยนข้อมูลกัน และจะมีการสลับดัชนีในลักษณะดังกล่าว ทุกรอบของการคำนวณ ดังนั้นการทำงานในวิธีนี้จึงใช้เวลานานมาก
- (2) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอน: วิธีนี้ได้แบ่งข้อมูลบนโดเมนที่ใช้เส้นกริดขนาดเล็กในแนวนอนเพื่อแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่ ๆ โดยจะเป็นการแบ่งออกเป็นส่วนใหญ่เท่าจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก จากการแบ่งโดยใช้เส้นกริดขนาดเล็กทำให้ได้จำนวนกริดในแต่ละส่วนไม่ต่างกันมากซึ่งจะลดปัญหาของ Load Balancing ได้มากกว่าวิธีแรก และเนื่องจากกริดเรียงตามลำดับในแนวนอน เมื่อแบ่งข้อมูลด้วยวิธี กริดยังคงเรียงลำดับเหมือนเดิม ทำให้สามารถคำนวณด้วยวิธีการวนทำซ้ำได้ วิธีนี้จึงทำงานเร็วกว่าวิธีแรก
- (3) การแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนีเดียว: วิธีนี้ได้แบ่งข้อมูลบนโดเมนโดยใช้การแบ่งจำนวนกริดทั้งหมดออกเป็นส่วนใหญ่ ๆ เท่ากับจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก การแบ่งด้วยวิธีนี้จะได้จำนวนจุดกริดเท่ากันทุกส่วน หรือจะเกิดความแตกต่างของจำนวนจุดกริดในแต่ละส่วนก็เพียง 1 จุดกริดเท่านั้น ทำให้เกิด Load Balancing ในระหว่างการคำนวณ และการแบ่งด้วยวิธีนี้ดัชนียังคงเรียงลำดับเหมือนเดิม ทำให้สามารถคำนวณด้วยวิธีการวนทำซ้ำได้ ดังนั้นวิธีนี้จึงทำงานได้เร็วกว่าวิธีแรก และวิธีที่สอง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของทั้ง 3 อัลกอริธึมได้แสดงไว้ในบทที่ 6

5.4.4 ส่วนการคำนวณ

ในโปรแกรมจำลองแบบของทั้ง 3 อัลกอริธึมที่ได้กล่าวมาแล้ว จะมีลักษณะการทำงานของโปรแกรมที่เหมือนกัน การทำงานของโปรแกรมจำลองแบบจะเป็นไปตามเทคนิคของ Master-Slave Model ที่แบ่งการทำงานของโปรแกรมออกเป็น 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมแม่ และ โปรแกรมลูก ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ในการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.31 โปรแกรมแม่จะเป็นตัวจัดการให้ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์เริ่มทำงาน และจัดการแบ่งข้อมูลเพื่อกระจายไปคำนวณในคอมพิวเตอร์เครื่องลูกหลายเครื่องพร้อมกัน และรอรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์เครื่องลูกเพื่อตรวจการรู้เข้าของข้อมูลสำหรับหยุดการทำงานของโปรแกรม และเก็บข้อมูลเข้าไฟล์ ส่วนโปรแกรมลูกจะทำหน้าที่ในการคำนวณ และจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกด้วยกัน ดังนั้นในโปรแกรมลูกจะมีส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนสื่อสารข้อมูล กับส่วนคำนวณข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 5.32 โดยส่วนสื่อสารข้อมูลจะมีวิธีการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ต่างกันในแต่ละอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูล ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว ในรายละเอียดของแต่ละอัลกอริธึมแบบขนาน แต่ในส่วนคำนวณข้อมูลจะมีหน้าที่หลักในการคำนวณหาผลเฉลยซึ่งจะมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกันในทุกอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

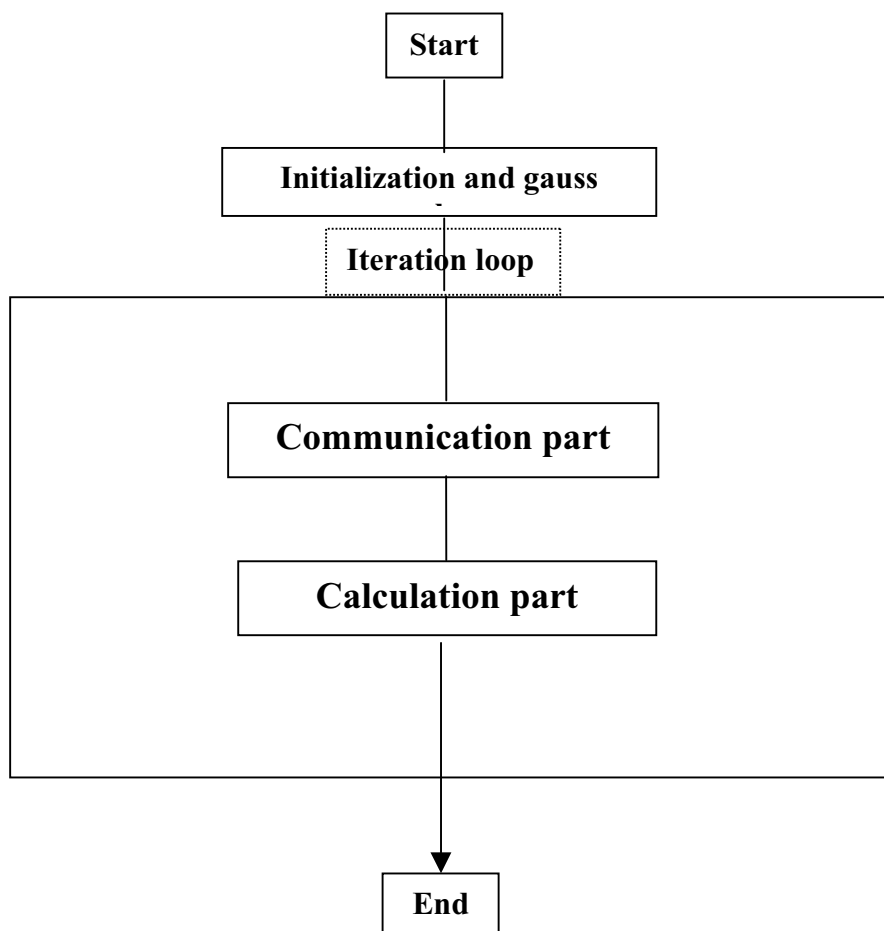


รูปที่ 5.31 โค้ดเทียมแสดงการทำงานระหว่าง โปรแกรมแม่ กับโปรแกรมลูก ของโปรแกรมจำลองแบบ โดยมีการส่งข้อมูลให้กันระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องแม่กับคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และคอมพิวเตอร์เครื่องลูกกับคอมพิวเตอร์เครื่องลูก

โปรแกรมแม่ เป็นโปรแกรมสำหรับทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องแม่ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- (1) อ่านจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกจากไฟล์ Initialize Cluster File
- (2) เริ่มให้คอมพิวเตอร์แบบขนานทำงาน โดย spawns task ไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่อง
- (3) อ่านค่าเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขที่ขอบจากไฟล์ Initialize Parameters File
- (4) ระบุตัวเลขประจำเครื่องลูกเพื่อสะดวกต่อการอ้างอิงในการส่งข้อมูลระหว่างกัน
- (5) อ่านข้อมูลกริดจากไฟล์ Grid Specification File
- (6) อ่านข้อมูลที่ถูกแบ่งจากโปรแกรมการแบ่งกริด แล้วกระจายข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่อง
- (7) รวบรวมข้อมูลที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์เครื่องลูกเพื่อตรวจสอบการลู่เข้าของข้อมูลและเก็บข้อมูลเข้าไฟล์ Result File

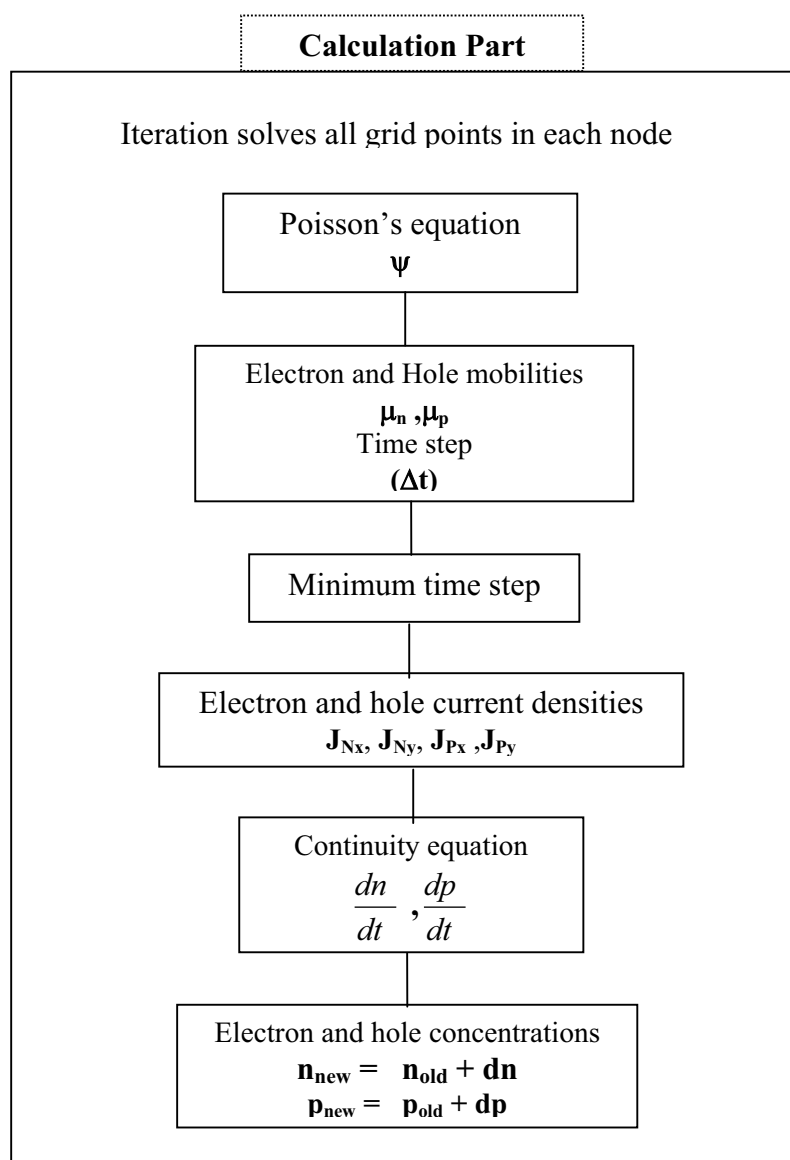
โปรแกรมลูก เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานเหมือนกันทุกเครื่อง และทำงานพร้อมกันขนานกันไป แต่คำนวณกับข้อมูลที่ต่างกัน ตามเทคนิคของ SIMD ในขั้นตอนการทำงานมีส่วนการทำงานที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนสื่อสารข้อมูล (Communication part) สำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกด้วยกัน และส่วนคำนวณข้อมูล (Calculation part) สำหรับแก้ระบบสมการเพื่อหาผลเฉลยของการจำลองแบบ โดยทั้ง 2 ส่วนทำงานอยู่ในรอบของการวนซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5.32 แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.32 การทำงานของโปรแกรมลูก โดยส่วนสื่อสารข้อมูล กับส่วนคำนวณข้อมูลอยู่ในรูปการทำซ้ำ การทำซ้ำจะทำให้ครบจำนวนรอบที่กำหนดไว้ เช่น 100 รอบ แล้วจากนั้นคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่องจะส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องแม่ เพื่อตรวจสอบการลู่เข้าของข้อมูลสำหรับหยุดการทำงาน of โปรแกรม และเก็บข้อมูลเข้าไฟล์ แต่ถ้ายังไม่ลู่เข้าก็จะสั่งให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูกทำการคำนวณต่อ

- ส่วนสื่อสารข้อมูล (Communication part):** ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ชอบระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกด้วยกัน ใช้การเข้าจังหวะการส่งและรับข้อมูลของวิธีป้องกันการตายของข้อมูล โดยใช้วิธีการรับและส่งข้อมูลของแต่ละอัลกอริทึมที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น
- ส่วนคำนวณข้อมูล (Calculation part):** ทำหน้าที่ส่วนใหญ่ในการคำนวณหาผลเฉลี่ย ซึ่งขั้นตอนเหมือนกับโปรแกรมแบบลำดับทุกอย่าง ต่างกันเพียงคำนวณในข้อมูลที่น้อยกว่า โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังแสดงในรูป 5.33 ส่วนค่าขั้นเวลา (Δt) จะต้องเป็นค่าที่เล็กที่สุดที่ได้จากการเปรียบเทียบกับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่อง

เมื่อคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่องทำการคำนวณเสร็จหรือได้จำนวนรอบตามที่กำหนดไว้ก็จะส่งผลลัพธ์ที่คำนวณได้ไปกลับไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องแม่เพื่อเก็บข้อมูลเข้าไฟล์และตรวจสอบการลู่เข้าของข้อมูล ถ้ายังไม่ลู่เข้าคอมพิวเตอร์เครื่องแม่จะสั่งให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูกทำการคำนวณต่อในรอบใหม่อีก

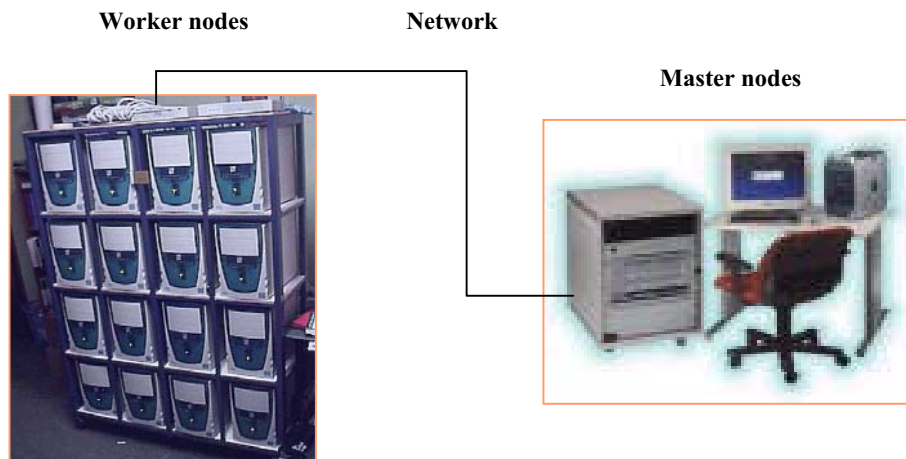


รูปที่ 5.33 การทำงานของส่วนคำนวณข้อมูลในโปรแกรมลูกแต่ละโปรแกรม เมื่อคำนวณเสร็จจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ซึ่งอยู่ในส่วนของการสื่อสาร

บทที่ 6

ประสิทธิภาพของโปรแกรมแบบขนาน

โปรแกรมแบบขนานที่พัฒนาจากอัลกอริทึมแบบขนานทั้ง 3 วิธีได้แก่ (1) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวนตั้ง (2) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวนอน และ (3) การแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วนจาก ดัชนีเดียว ถูกนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความถูกต้องของโปรแกรม โดยเปรียบเทียบผล กับโปรแกรมแบบลำดับ การทดสอบทำบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนาน ที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น มีคอมพิวเตอร์ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์เครื่องแม่ 1 เครื่อง และ คอมพิวเตอร์เครื่องลูก 16 เครื่อง โดยคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องเชื่อมต่อกันด้วยเน็ตเวิร์ก (network) ดังที่ แสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 เครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานที่ได้จัดตั้งขึ้นที่ห้องปฏิบัติการ ในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (โดยคอมพิวเตอร์เครื่องลูกเป็นรูปจริงในห้องปฏิบัติการ ส่วน คอมพิวเตอร์เครื่องแม่เป็นรูปสมมติ เพื่อให้เกิดความเข้าใจ)

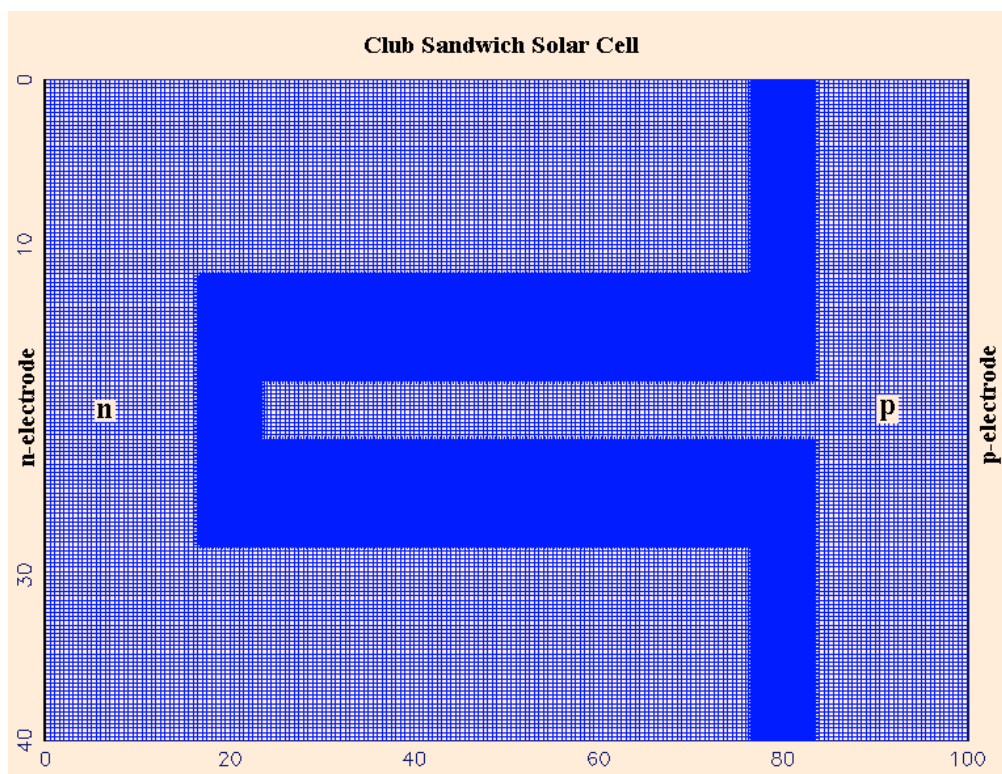
ส่วนประกอบของเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานมีดังต่อไปนี้

- (1) คอมพิวเตอร์เครื่องแม่ 1 เครื่อง (Master node)
 - 800 MHz AMD Athlon CPU
 - 512 Mbyte SDRAM
 - 100 Mbit/sec network card
- (2) คอมพิวเตอร์เครื่องลูก 16 เครื่อง (Worker nodes)
 - 550 MHz Intel Pentium III CPU per node
 - 123 Mbyte SDRAM per node
 - 100 Mbit/sec network card per node
- (3) เน็ตเวิร์ก (Network)
 - 100 Mbit/sec Switching Hub 32 port

เนื้อหาในบทนี้เกี่ยวข้องกับการทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมแบบขนาน มีการทดสอบดังนี้ 1) การทดสอบอัลกอริธึมแบบขนาน เพื่อเปรียบเทียบหาอัลกอริธึมที่ดีที่สุดสำหรับนำไปจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนด์วิช 2) ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบบขนาน โดยเปรียบเทียบผลกับโปรแกรมแบบลำดับ และ 3) เปรียบเทียบผลการจำลองแบบกับโครงสร้างกริด เพื่อทดสอบความถูกต้องและความเหมาะสมของกริดบนโดเมน มีรายละเอียดของเนื้อหาแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

6.1 การทดสอบอัลกอริธึมแบบขนาน

อัลกอริธึมแบบขนานที่ได้พัฒนาขึ้นทั้ง 3 วิธี คือ (1) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้ง (2) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอน และ (3) การแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนีเดียว ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพ เพื่อเปรียบเทียบหาอัลกอริธึมที่ดีที่สุดสำหรับจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนด์วิช ในการทดสอบใช้โมเดลของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนด์วิชใน 2 มิติ และใช้โครงสร้างเซลล์ 2 จังก์ชัน ดังแสดงในรูปที่ 6.2 กำหนดให้ตัวเซลล์มีขนาด 40×100 ไมครอน ให้ชั้นแอโนดอยู่ผนังด้านขวา และให้ชั้นแคโทดอยู่ผนังด้านซ้ายของเซลล์ และใช้โปรแกรมสร้างกริดบนโดเมนของเซลล์สุริยะ กำหนดให้มีกริดขนาดใหญ่ 0.25 ไมครอน และ กริดขนาดเล็ก 0.03125 ไมครอน ได้กริดบนโดเมนทั้งหมด 536,600 จุดกริดดังแสดงในรูป 6.2



รูปที่ 6.2 โดเมนสำหรับการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนด์วิชใน 2 มิติซึ่งมีจุดกริดบนโดเมนทั้งหมด 536,660 จุดกริด

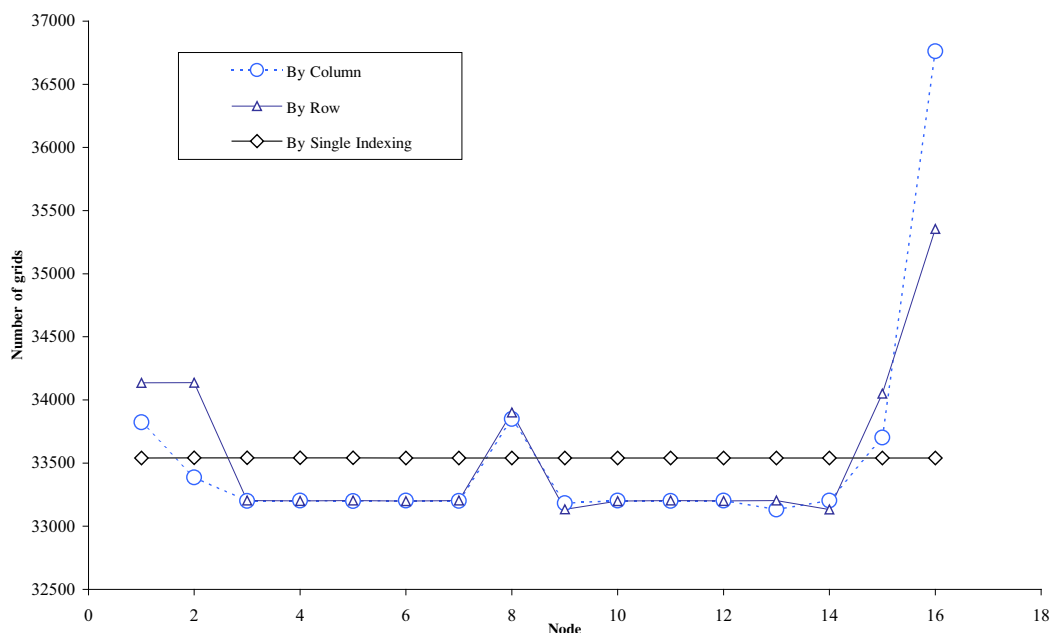
การทดสอบอัลกอริธึมแบบขนานได้แยกการทดสอบเป็น 2 ส่วน คือ 1) ทดสอบโปรแกรมการแบ่งข้อมูลสำหรับแจกจ่ายให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูกจำนวน 16 เครื่อง เพื่อทดสอบความสามารถในการแบ่งจำนวนกริดสำหรับส่งไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูก โปรแกรมสามารถแบ่งได้จำนวนกริดได้เท่ากันทุกเครื่องหรือไม่ เพราะมีความสำคัญในการทำให้เกิด Load Balancing และ 2) ทดสอบโปรแกรมจำลองแบบ โดยเปรียบเทียบเวลาในการทำงานของโปรแกรมแบบขนานของแต่ละอัลกอริธึมแบบขนาน และเปรียบเทียบสปีดอัป (speed up) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบเวลาการทำงานของโปรแกรมแบบขนานกับการทำงานของโปรแกรมแบบลำดับ ในการทดสอบการจำลองแบบใช้การวนทำซ้ำคำนวณบนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก 100 ครั้ง ผลการทดสอบอัลกอริธึมแบบขนาน มีดังต่อไปนี้

6.2 ผลการทดสอบอัลกอริธึมแบบขนาน

การทดสอบประสิทธิภาพอัลกอริธึมแบบขนาน มีการทดสอบดังนี้ (1) การทดสอบการแบ่งจำนวนกริด (2) เวลาในการจำลองแบบ และ (3) สปีดอัป (speed up) ผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

6.2.1 การทดสอบการแบ่งจำนวนกริด

การทดสอบโปรแกรมการแบ่งข้อมูล โดยให้โปรแกรมทำการแบ่งจำนวนกริดออกเป็น 16 ส่วน เพื่อแจกจ่ายไปให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูก 16 เครื่อง ผลการทดสอบแต่ละอัลกอริธึมของการแบ่งข้อมูลแสดงในรูปที่ 6.3 โดยจะเปรียบเทียบผลต่างระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องที่ได้จำนวนกริดมากที่สุดกับคอมพิวเตอร์เครื่องที่ได้จำนวนกริดน้อยที่สุด เรียกว่า Range of data จากรูปวิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวตั้ง มี Range of data เท่ากับ 3629 จุดกริด และ วิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวนอน มี Range of data เท่ากับ 2220 จุดกริด ส่วนในวิธีการแบ่งข้อมูลเป็นส่วนจากดัชนีเดียว มี Range of data เท่ากับ 0 ดังนั้น วิธีการแบ่งข้อมูลเป็นส่วนจากดัชนีเดียว สามารถแบ่งข้อมูลเพื่อแจกจ่ายให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูกได้จำนวนกริดเท่ากันทุกเครื่อง ส่วนวิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวนอน แบ่งจำนวนกริดแล้วเกิดผลต่างมากที่สุดพิจารณาจากรูปที่ 6.3 ในวิธีวิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวตั้ง และวิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวนอน โดยพิจารณาจากคอมพิวเตอร์เครื่องลูกที่โหนด 1 กับ 2 เป็นช่วงที่ 1 โหนด 8 เป็นช่วงที่ 2 และ โหนด 15 กับ 16 เป็นช่วงที่ 3 บริเวณทั้ง 3 ช่วงของกราฟจะมีจำนวนกริดมากกว่าปกติ เนื่องจากทั้ง 2 วิธีการแบ่งข้อมูลจะเป็นการแบ่งพื้นที่ออกเป็น ส่วนๆ บางบริเวณจะมีจำนวนกริดมากกว่าปกติ ดังที่แสดงในรูปช่วงที่ 1 2 และ 3 จึงมีจำนวนกริดมากกว่าบริเวณอื่น แต่ถ้าวัดพื้นที่แล้วไม่ลงตัวจะให้เศษที่เหลือทั้งหมดแก่คอมพิวเตอร์โหนดที่ 16 ดังนั้นโหนดที่ 16 จึงมีจำนวนกริดมากกว่าคอมพิวเตอร์โหนดอื่นๆ มาก



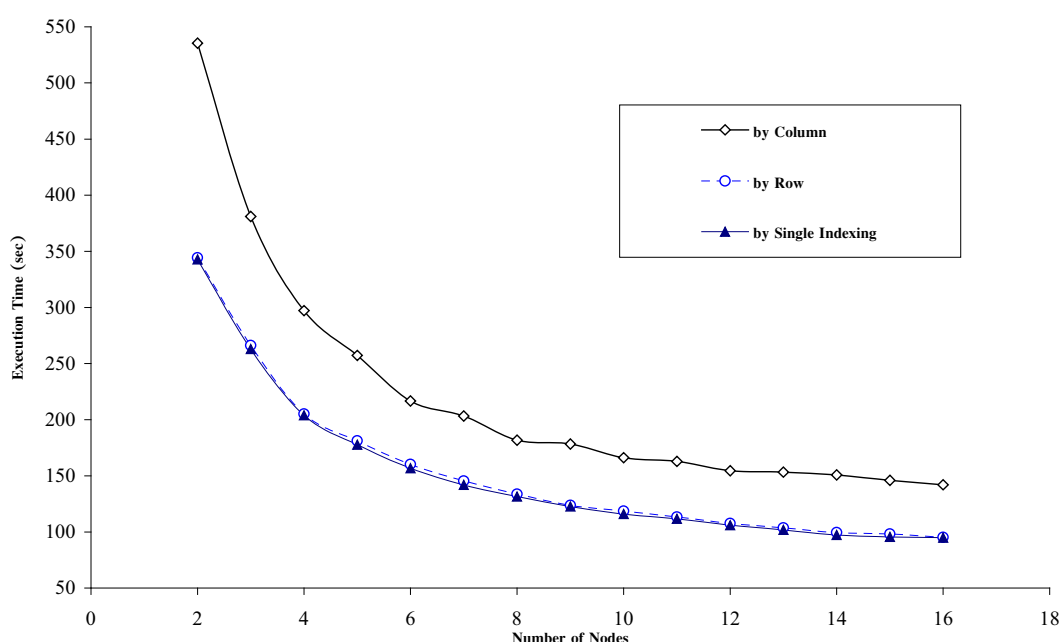
รูปที่ 6.3 จำนวนกริดของคอมพิวเตอร์เครื่องลูกแต่ละเครื่องได้รับ ของแต่ละอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูล สำหรับจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกจำนวน 16 เครื่อง

6.2.2 การทดสอบเวลาในการจำลองแบบ

ผลการทดสอบเวลาการจำลองแบบทั้ง 3 อัลกอริธึม แสดงในรูปที่ 6.4 จากรูปจะเห็นว่ากราฟของวิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนี ใช้เวลาในการจำลองแบบน้อยกว่าอีก 2 วิธี โดยเปรียบเทียบจากการใช้คอมพิวเตอร์ในจำนวนที่เท่ากัน

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นว่าวิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอน ใช้เวลาในการทำงานใกล้เคียงกับเวลาการทำงานของวิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนีเดียว แต่ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้งมาก ทั้งที่วิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอนมี Range of data จำนวนมากเหมือนกับวิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้ง เป็นเพราะวิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้งจะต้องมีการเรียงดัชนีใหม่หมดเพื่ออ้างอิงในการคำนวณตัววิธีวนซ้ำ และต้องกลับไปใช้ดัชนีแบบเก่าในขณะที่ทำการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูก ซึ่งต้องมีการสลับดัชนีในลักษณะดังกล่าวทุกรอบของการวนซ้ำ ในขณะที่วิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอน จะใช้ดัชนีอ้างอิงที่ได้จากคอมพิวเตอร์เครื่องแม่ส่งมาให้ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับวิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนี จึงทำให้วิธีการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอน ใช้เวลาในการทำงานเร็วกว่าวิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้ง แต่ก็ยังช้ากว่าวิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนี เพราะมีผลต่างของจำนวนกริดในคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทำให้การคำนวณเสร็จไม่พร้อมกัน จึงเกิดการหน่วงเวลาในการทำงาน

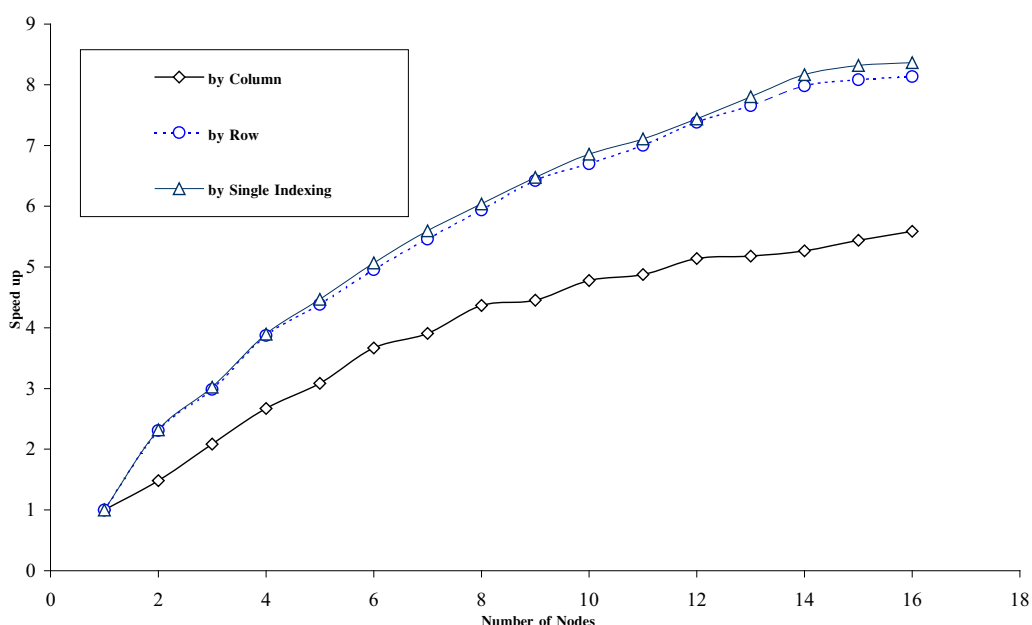
จากรูปที่ 6.4 เมื่อเพิ่มจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกจาก 2-8 เครื่อง โปรแกรมแบบขนาน ทั้ง 3 โปรแกรมใช้เวลาในการคำนวณลดลงเร็วมากตามการเพิ่มของจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเมื่อเพิ่มจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกเป็น 8-10 เครื่อง ทุกโปรแกรมใช้เวลาการคำนวณค่อยๆลดลง ในขณะที่จำนวนคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกเป็น 10-16 เครื่อง เวลาในการคำนวณเริ่มคงที่ และเวลาไม่ลดลงตามการเพิ่มของจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์อีก ดังนั้นจำนวนเครื่องลูกที่เหมาะสมในการจำลองแบบคือ 8-10 เครื่อง เพราะเวลาการจำลองแบบยังลดลงได้อีก แต่เมื่อเพิ่มจำนวนของคอมพิวเตอร์มากกว่า 10 เครื่อง เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเท่าเดิมซึ่งไม่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์แต่อย่างใด



รูปที่ 6.4 เวลาการทำงานของโปรแกรมแบบขนานของแต่ละโปรแกรม โดยการทำงานบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์คำนวณแบบขนานที่ โดยการทดสอบการทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกจาก 2-12 เครื่อง (ไม่มีเวลาการทำงานของคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง เนื่องจากการทำงานของโปรแกรมแบบขนาน ถูกพัฒนาให้เริ่มทำงานตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไป)

6.2.3 สปีดอัป (speed up)

สปีดอัปเป็นการเปรียบเทียบเวลาการทำงานของโปรแกรมแบบขนานกับโปรแกรมแบบลำดับ โดยคำนวณตามสมการที่ 4.3 ในบทที่ 4 เพื่อวัดความสามารถในการทำงานของโปรแกรมแบบขนาน จากโมเดลข้างต้น โปรแกรมแบบลำดับใช้เวลาในการคำนวณ 794.25 วินาที เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 6.4 มาคำนวณค่าสปีดอัปและเขียนกราฟได้ผลแสดงในรูปที่ 6.5 จากกราฟจะเห็นว่าวิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วนจากดัชนี มีสปีดอัปสูงสุดเป็น 8.2 ที่จำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก 16 เครื่อง การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวนอน มีสปีดอัปเป็น 8.0 ที่จำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก 16 เครื่อง และการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวตั้งมีสปีดอัปเป็น 5.5 เท่า ที่จำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก 16 เครื่อง ดังนั้นวิธีการแบ่งข้อมูล ออกเป็นส่วนจากดัชนีเดียว มีสปีดอัปสูงที่สุด และการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็น ส่วนในแนวตั้ง มีสปีดอัปต่ำที่สุด



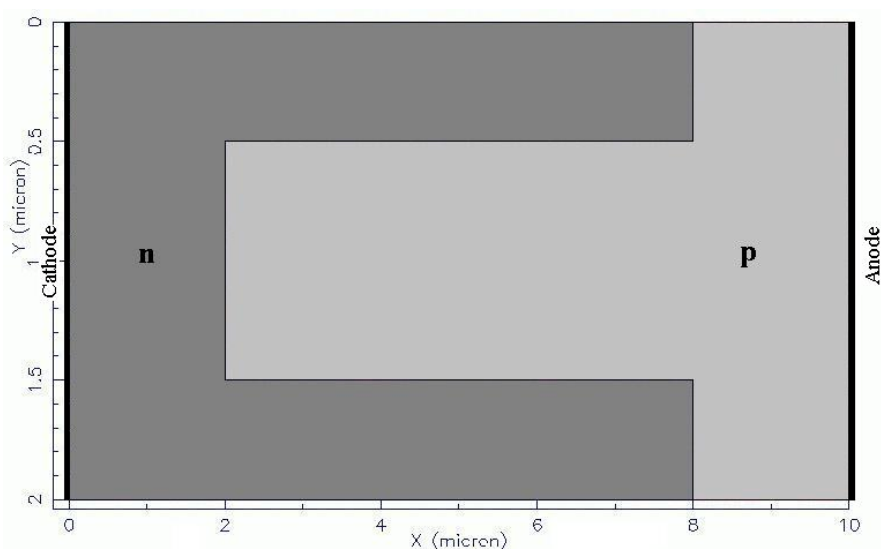
รูปที่ 6.5 speed-up ของโปรแกรมแบบขนานทั้ง 3 อัลกอริธึม

6.3 สรุปผลการทดสอบอัลกอริธึมแบบขนาน

จากการทดสอบความสามารถในการทำงานของอัลกอริธึมแบบขนานทั้ง 3 วิธีที่ได้พัฒนาขึ้น ปรากฏว่าวิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วนจากดัชนีเดียว มีความสามารถในการทำงานสูงที่สุด โดยพิจารณาจากการแบ่งข้อมูลออกเป็น ซึ่งสามารถแบ่งข้อมูลได้จำนวนกริดเท่ากันทุกส่วนสำหรับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกทุกเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และมีสปีดอัปสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6.5 ดังนั้นวิธีการแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วนจากดัชนีจึงถูกเลือกสำหรับการคำนวณแบบขนานในการจำลองแบบเพื่อค้นหาพารามิเตอร์เบื้องต้นในเซลล์สุริยะแบบกลับ แชนดริชใน 2 มิติ และจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกที่เหมาะสมในการคำนวณแบบขนานคือ 8-10 เครื่อง เนื่องจากเวลาการทำงานของโปรแกรมยังลดลงได้อีกตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์ (แต่จะมีอัตราการลดลงน้อยกว่าการใช้จำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่น้อยกว่า 8 เครื่องมาก)

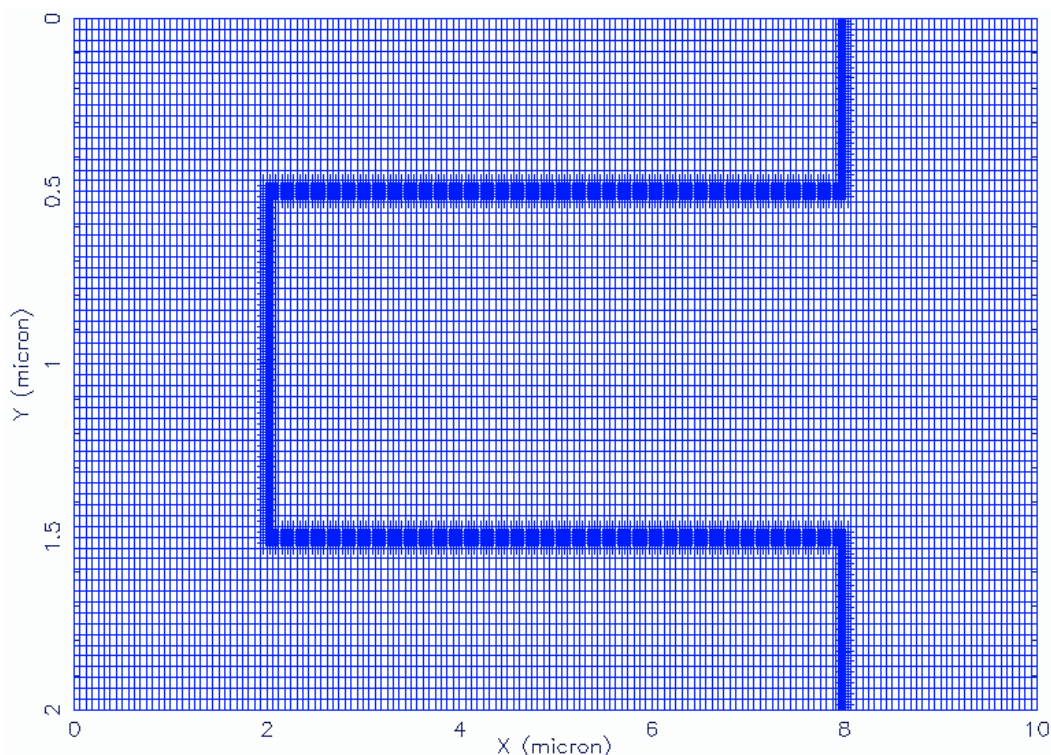
6.4 การค้นหาพารามิเตอร์เบื้องต้นในการทดสอบโปรแกรมแบบขนาน

เพื่อทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบบขนาน ได้นำโปรแกรมแบบขนานที่ใช้อัลกอริทึมการแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วนจากดัชนีเดียว มาจำลองแบบเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของโปรแกรมแบบลำดับ โดยใช้โมเดลสำหรับการจำลองแบบที่แสดงในรูปที่ 6.6 ซึ่งเป็นเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ 2 จังก์ชัน มีการสลับกันระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด n และ ชนิด p วางชั้นแอโนดไว้ผ่นงด้านซ้าย และชั้นแคโทดไว้ด้านขวาของเซลล์ ใช้ซิลิกอน (Si) ในการจำลองแบบตัวเซลล์ มี intrinsic concentration $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ เซลล์มีขนาด 2×10 ไมครอน ให้รอยต่อแรกที่ขนานกับแกน X อยู่ที่ 0.5 ไมครอน และรอยต่อที่ 2 อยู่ที่ 1.5 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ในโมเดลยังไม่มี การให้แสงตกกลงในเซลล์ จึงใช้เฉพาะ ค่า R ไม่มีค่า G



รูปที่ 6.6 โมเดลที่ใช้ในการจำลองแบบของเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ 2 จังก์ชัน

เมื่อนำโปรแกรมสร้างกริดมากำหนดกริดบนโมเดลดังกล่าว กำหนดให้ขนาดกริดที่ขนานแกน Y ละเอียดกว่ากริดที่ขนานแกน X ประมาณ 2 เท่า โดยกริดขนาดใหญ่ในด้านที่ขนานแกน X มีขนาด 0.0625 ไมครอน และกริดขนาดใหญ่ในด้านที่ขนานกับแกน Y มีขนาด 0.03221 ไมครอน และกำหนดให้กริดขนาดเล็กมีขนาดละเอียดกว่ากริดขนาดใหญ่ 4 เท่า โดยกริดขนาดเล็กในด้านที่ขนานแกน X เป็น 0.016405 ไมครอน และกริดขนาดเล็กในด้านที่ขนานแกน Y เป็น 0.008054 ไมครอน ได้กริดทั้งหมด 16027 จุดกริดบนโดเมนโครงสร้างกริดบนโดเมนสำหรับจำลองแบบแสดงในรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมกับกริดแบบไฟไนต์บล็อกที่สร้างบนโดเมนเซลล์สุริยะแบบกลับแกนตัวชี้ มีจุดกริดทั้งหมด 16027 จุดกริด

6.5 เงื่อนไขเริ่มต้น เงื่อนไขขอบเขต และ เงื่อนไขการรู้เข้า

รายละเอียดของเงื่อนไขต่างๆ สำหรับการจำลองแบบมีดังต่อไปนี้

6.5.1 ค่าเริ่มต้นของ doping profile

ในการจำลองแบบ ค่า doping profile ซึ่งได้จากการใช้โปรแกรมให้ค่าความหนาแน่นพาหะ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อ 5.2.2 ซึ่งโปรแกรมทำหน้าที่ให้ค่าความหนาแน่นของ n , p , n_0 , p_0 โดยในตอนเริ่มต้นของการจำลองแบบ โปรแกรมจะให้ค่า $n = n_0$ และ $p = p_0$ โดยค่า n และ n_0 ให้มีความหนาแน่นเป็น 10^{13} cm^{-3} ในด้าน n และค่อยๆ ลดลงที่รอยต่อ และมีค่าน้อยที่สุด ด้าน p ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6.8 ส่วนค่าในด้าน p และ p_0 ให้ค่าความหนาแน่นเป็น $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ และค่อยๆ ลดลงที่รอยต่อ และมีค่าน้อยที่สุด ด้าน n ดังที่แสดงในรูปที่ 6.9

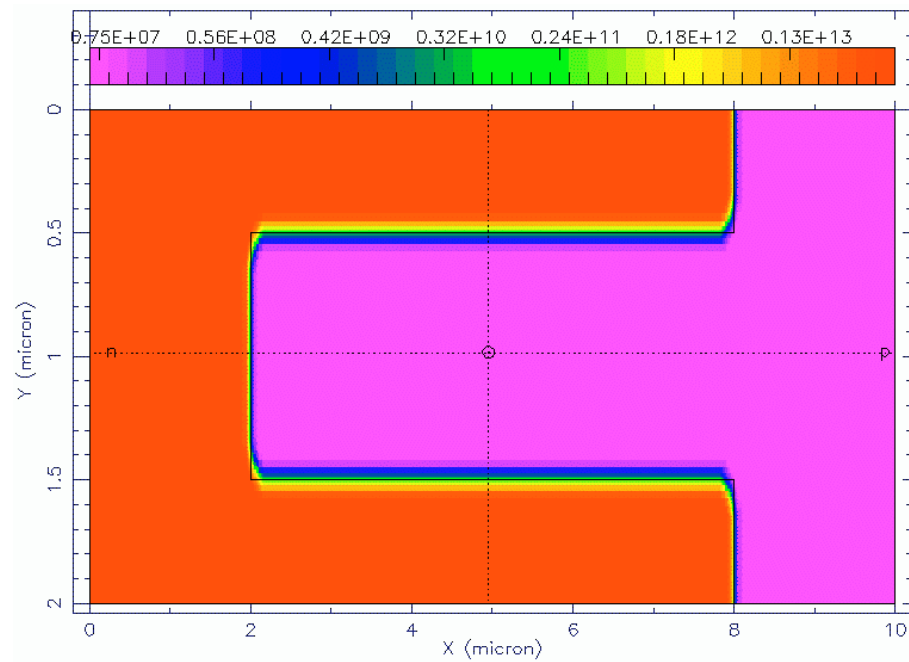
6.5.2 ค่าเริ่มต้นของศักย์ไฟฟ้า

สำหรับค่าเริ่มต้นของศักย์ไฟฟ้า ที่ขั้วแอโนดให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ตลอดเวลาเท่ากับค่าที่ bias ให้แก่เซลล์ ส่วนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทด ให้ศักย์คงที่ตลอดเวลาเท่ากับ 0.0 โวลต์ ส่วนจุดกริดอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่บนขั้วแอโนดและขั้วแคโทดซึ่งเป็นกริดค่าที่ยังไม่รู้ค่า จะให้ค่าเริ่มต้นเป็น 0.0 โวลต์

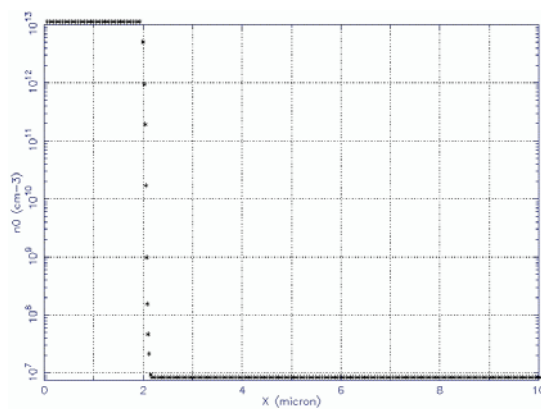
6.5.3 ค่าเงื่อนไขตรวจสอบการลู่เข้า

เพื่อตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบในการจำลองแบบและหยุดการทำงานของโปรแกรม
ใช้เงื่อนไขในการตรวจสอบดังนี้

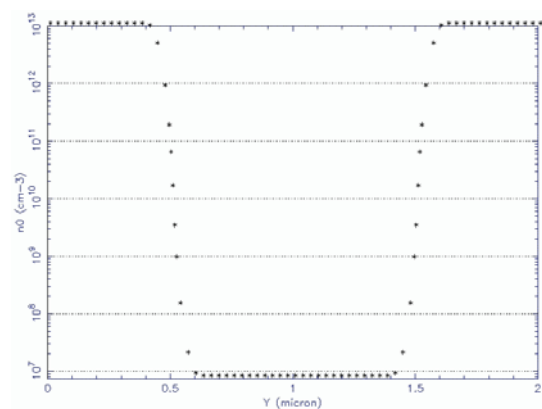
- (1) ทุกจุดกริดต้องมีค่าของ $d\psi/dt \approx 0.0$ (V/sec) (แรงดันจะนิ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา)
- (2) ทุกจุดกริดต้องมีค่าของ $dn/dt \approx 0.0$ และ $dp/dt \approx 0.0$ ($\text{cm}^{-3} / \text{sec}$) (n และ p จะนิ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา)
- (3) ผลรวมของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่ไหลในทิศแกน x ที่ขั้วแอโนด ต้องเท่ากับ ผลรวมของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของโฮลที่ไหลในทิศแกน x ที่ขั้วแคโทด



(ก)

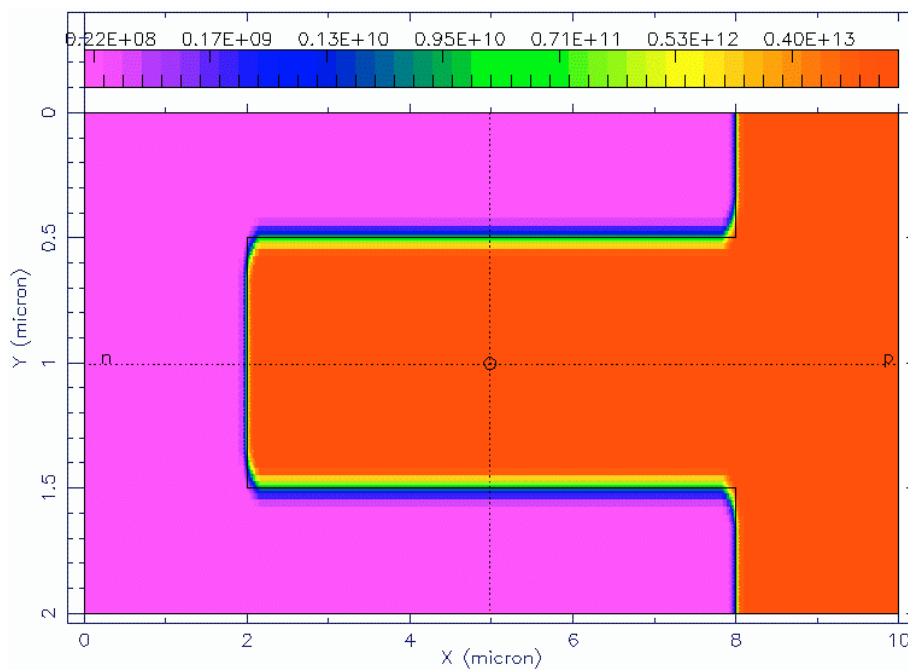


(ข)

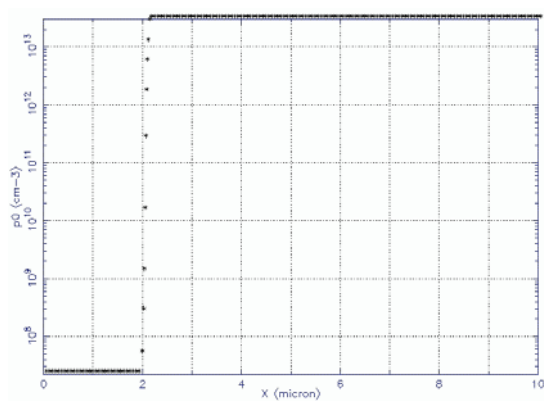


(ค)

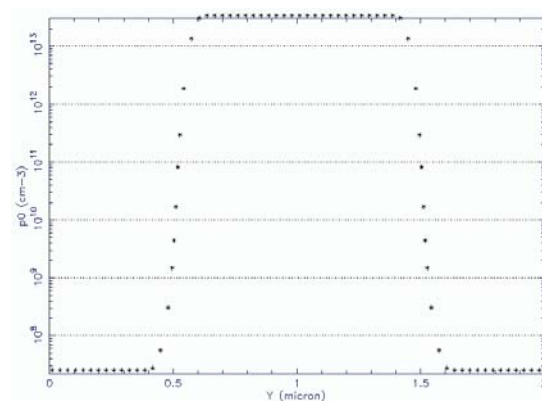
รูปที่ 6.8 ค่าเริ่มต้นของ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n) และ ความหนาแน่นของโฮล (p) ใน หน่วย(atom/cm^3) (ก) Doping profile ของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสำหรับการจำลอง แบบ (ข) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพิจารณาในแกน X (ค) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพิจารณาในแกน Y



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6.9 ค่าเริ่มต้นของ ความหนาแน่นของโฮล (p) และ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (p_0) ในหน่วย (atom/cm^3) (ก) Doping profile ของความหนาแน่นของโฮลสำหรับการจำลองแบบ (ข) ความหนาแน่นของโฮลพิจารณาในแกน X (ค) ความหนาแน่นโฮลพิจารณาในแกน Y

6.6 ผลการทดสอบโปรแกรมแบบขนาน

จากการทดสอบการจำลองแบบของโปรแกรมแบบลำดับและโปรแกรมแบบขนาน โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าไบแอส ที่ -0.25 , -0.125 , 0.0 , 0.125 , 0.25 และ 0.5 V ตามลำดับ ทั้ง 2 โปรแกรมไม่สามารถจำลองแบบจนถึงค่าเงื่อนไขการลู่เข้าได้ โดยโปรแกรมแบบลำดับใช้เวลาในการจำลองแบบมากกว่า 10 วัน สามารถลดค่ามากที่สุดของ dn/dt และ dp/dt ได้ 4 order แต่โปรแกรมแบบขนาน ใช้เวลาจำลองแบบ 3 วัน สามารถลดค่ามากที่สุดของ dn/dt และ dp/dt ได้ 6 order ซึ่งจะได้อีกกล่าวในรายละเอียดต่อไป และในหัวข้อนี้จะแสดงผลการจำลองแบบเฉพาะผลที่ได้จากการค่าศักย์ไฟฟ้าไบแอส 0.0 V ส่วนผลการจำลองแบบที่ได้จากการ bias voltage ที่ค่าอื่นๆ (-0.25 , -0.125 , 0.125 , 0.25 และ 0.5 V) จะไม่นำผลการจำลองแบบที่แสดงค่าระดับสีและกราฟมาแสดงในบทนี้ แต่จะนำผลของการรวมค่าความหนาแน่นกระแสที่ชั่วไฟฟ้ามาเขียนกราฟกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบแอส (I-V Curve) ซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อ 6.7

6.6.1 ผลการจำลองแบบจากการค่าศักย์ไฟฟ้าไบแอส 0.0 V

โปรแกรมแบบลำดับใช้เวลาในการจำลองแบบมากกว่า 10 วัน สามารถลดค่ามากที่สุด dn/dt และ dp/dt ได้ 4 order โดยลดจาก 10^{22} ลดลงเป็น 10^{18} ($\text{cm}^{-3}/\text{second}$) แต่โปรแกรมแบบขนานใช้เวลาการจำลองแบบ 3 วัน สามารถลดค่า มากที่สุด dn/dt และ dp/dt ได้ 6 order จาก 10^{22} ลดลงเป็น 10^{16} ($\text{cm}^{-3}/\text{second}$) ทั้งสองโปรแกรมใช้ค่า $\Delta t = 1.5631 \times 10^{-14}$ วินาที และใช้ค่า $\tau = 1 \times 10^{-4}$ s โดยที่ทั้งสองโปรแกรมก็ไม่สามารถจำลองแบบจนถึงเงื่อนไขการลู่เข้า

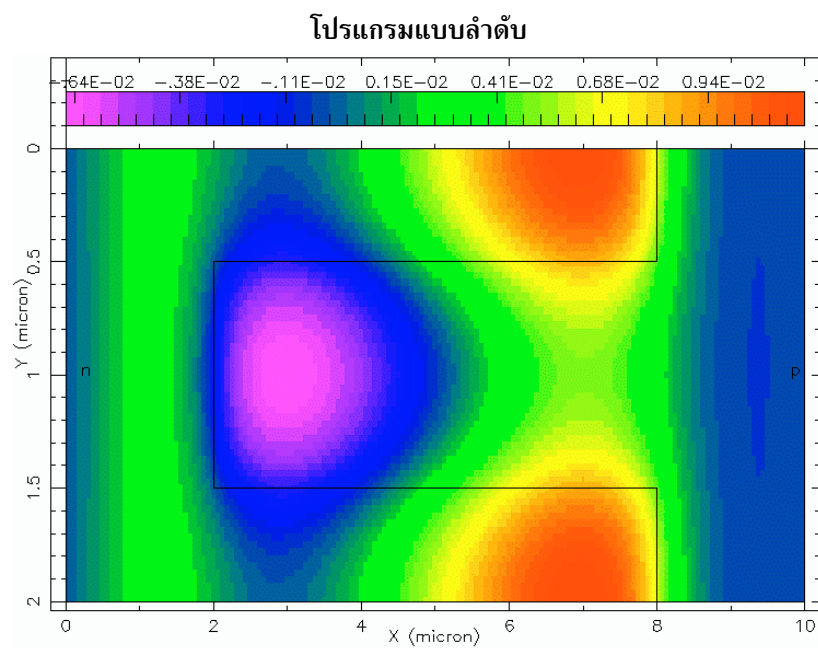
ผลจากการทำงานของทั้ง 2 โปรแกรม (โปรแกรมแบบลำดับและโปรแกรมแบบขนาน) ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.10–6.19 โดยเป็นการเปรียบเทียบผลจากการจำลองแบบของโปรแกรมแบบลำดับกับโปรแกรมแบบขนาน มีการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบดังนี้ (1) เปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 6.10–6.12 (2) การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน แสดงในรูปที่ 6.13–6.15 (3) ผลการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของโฮล แสดงในรูปที่ 6.16–6.18 และ (4) ผลการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวม แสดงในรูปที่ 6.19

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 6.10–6.11 ทั้งสองโปรแกรมให้ผลการจำลองแบบลักษณะเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับตอนเริ่มต้นที่ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็น 0.0 V ทุกจุดกริด หลังการจำลองแบบแล้วค่าศักย์ไฟฟ้ามีการปรับตัวดังแสดงในรูปที่ 6.10–6.11 ตามลำดับ

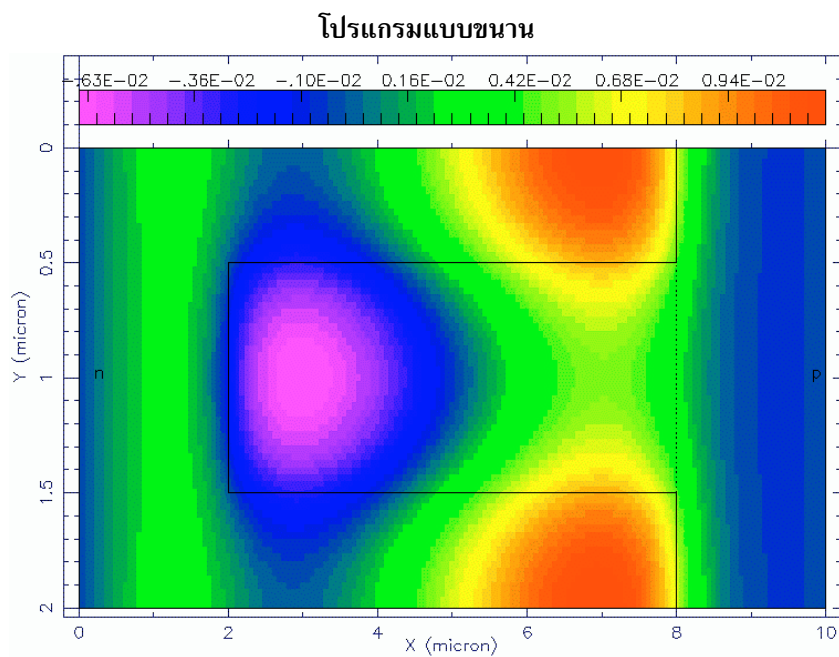
ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล ที่แสดงในรูปที่ 6.13–6.15 และ 6.16–6.18 ตามลำดับ ทั้งโปรแกรมแบบลำดับและโปรแกรมแบบขนานให้ผลการจำลองแบบลักษณะเดียวกัน โดยเปรียบเทียบผลกับค่าความหนาแน่นในตอนเริ่มต้น หลังการจำลองแบบแล้วค่าความหนาแน่น ทั้งโฮลและอิเล็กตรอนมีการปรับตัวเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า และเกรเดียนต์ของพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 6.13–6.15 และ 6.16–6.18

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของทั้งสองโปรแกรมมีทิศทางและขนาดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ในหน่วยของ A/cm^2) เหมือนกันดังที่แสดงในรูปที่ 6.19 โดยค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าน้อยที่สุดที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่ขนานกับแกน X มีค่า $0.545 \times 10^{-3} \text{ A}/\text{cm}^2$ และมีค่าความหนาแน่นกระแสมีค่ามากที่สุดในด้าน p ในบริเวณที่มุมของจังก์ชัน มีค่า $0.181 \times 10^{-1} \text{ A}/\text{cm}^2$

ศักย์ไฟฟ้า



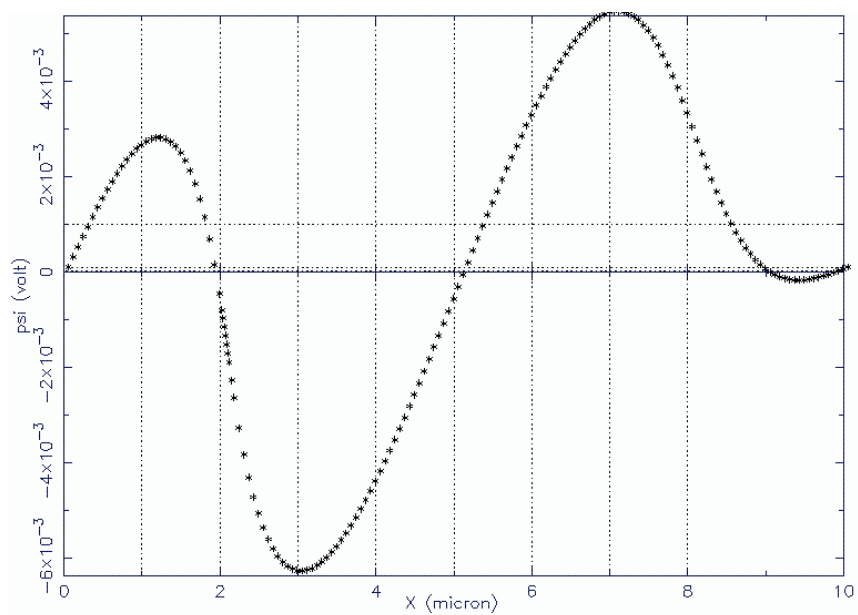
(ก)



(ข)

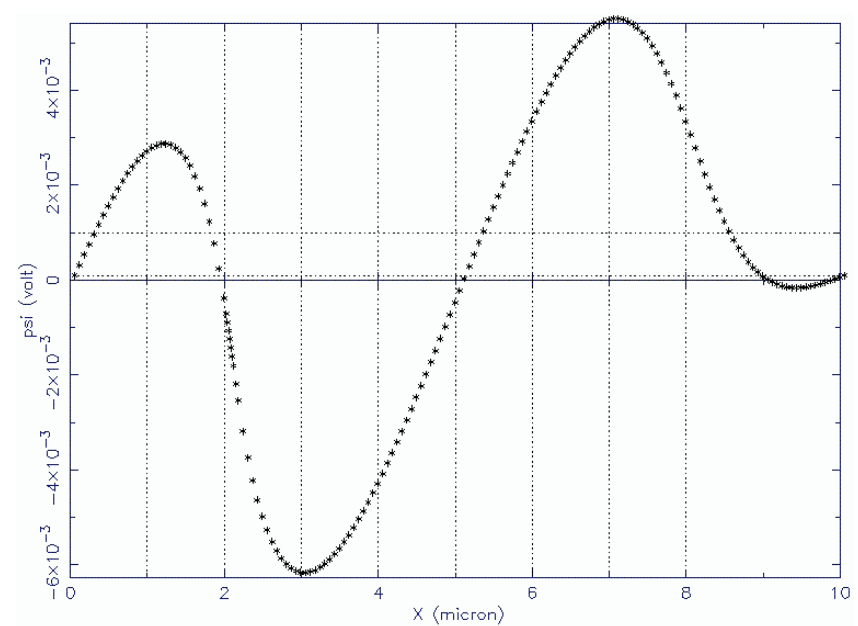
รูปที่ 6.10 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบแอส 0.0 V (ก) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมแบบลำดับ
 (ข) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมแบบขนาน (ค่าระดับสีระหว่างรูป (ก) และ รูป (ข)
 บางบริเวณอาจต่างกันบ้าง เนื่องจากการลดลงของค่า dn/dt และ dp/dt ของทั้ง 2
 โปรแกรมได้ order ไม่เท่ากัน)

โปรแกรมแบบลำดับ



(ก)

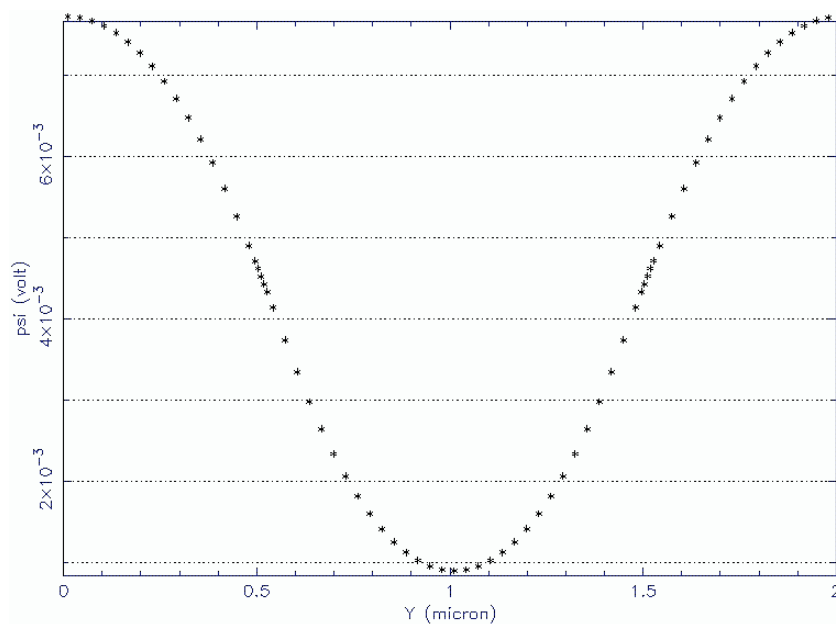
โปรแกรมแบบขนาน



(ข)

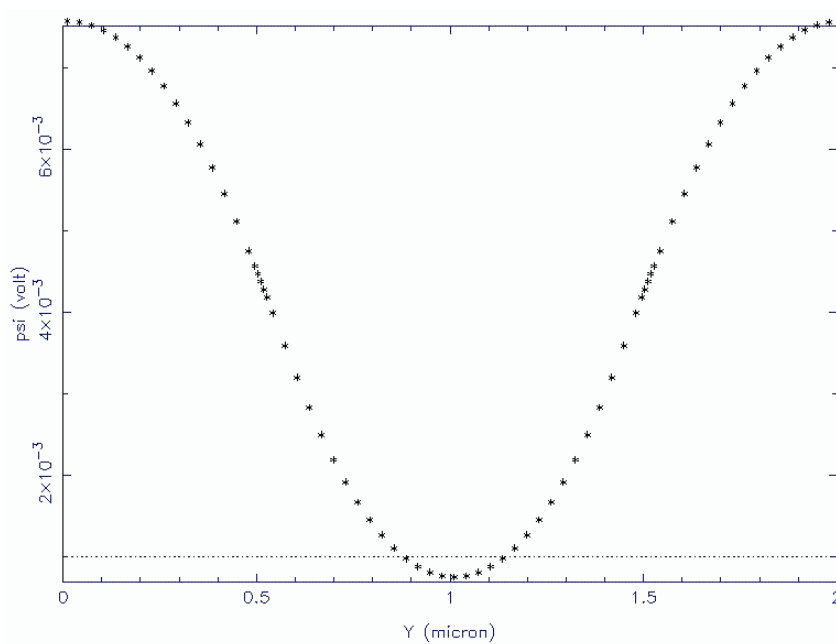
รูปที่ 6.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าในรูปที่ 6.10 ในแกน X (ก) ค่าศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรมแบบขนาน

โปรแกรมแบบลำดับ



(ก)

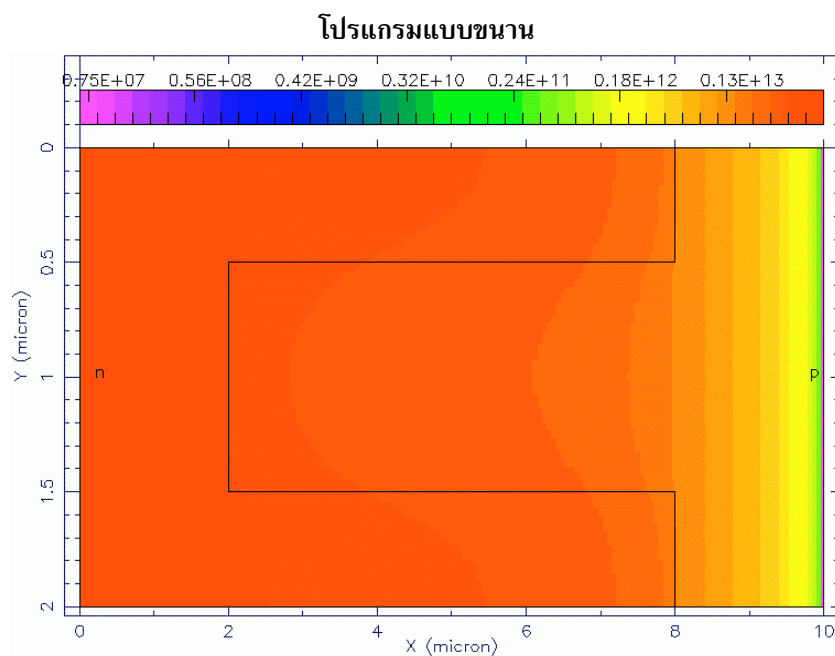
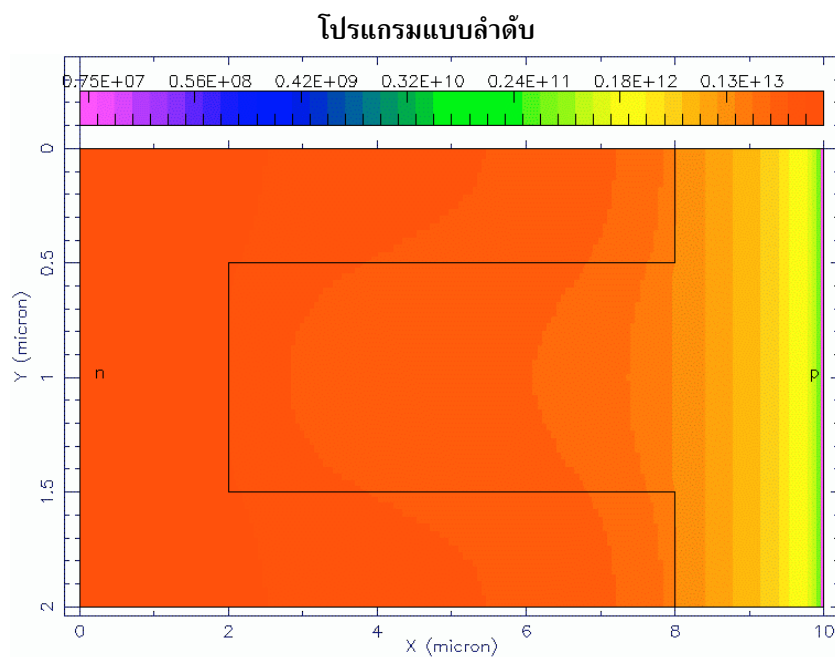
โปรแกรมแบบขนาน



(ข)

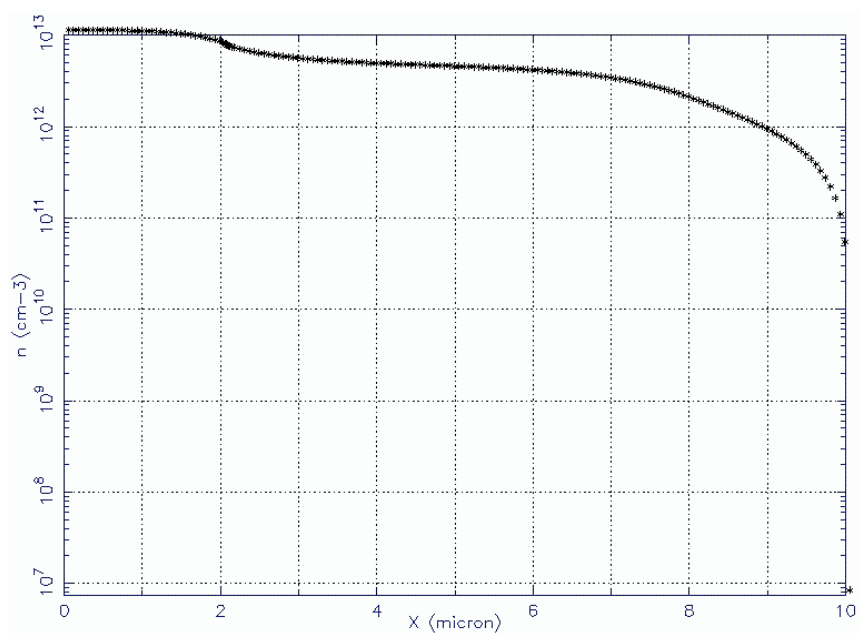
รูปที่ 6.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าในรูปที่ 6.10 ในแกน Y (ก) ค่าศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าศักย์ไฟฟ้าจากโปรแกรมแบบขนาน

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน



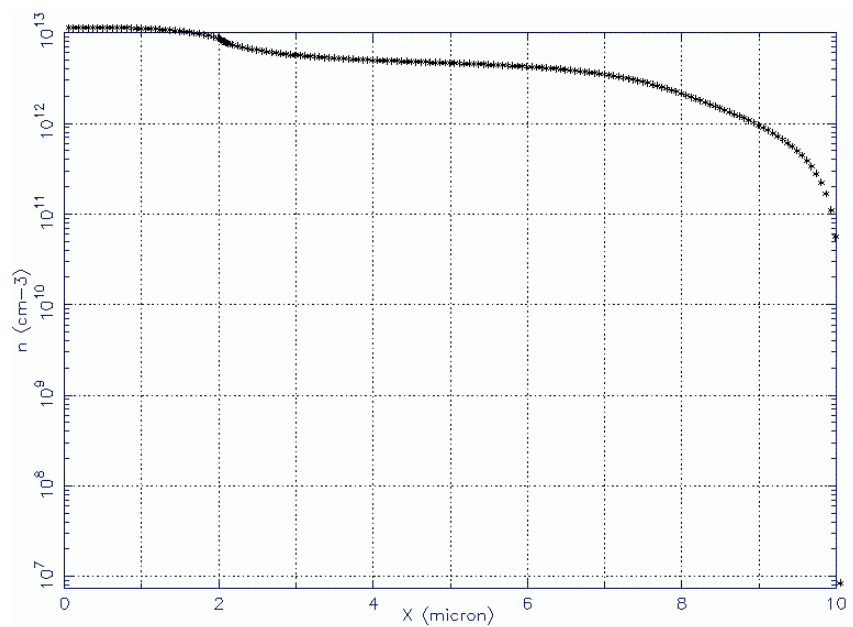
รูปที่ 6.13 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ไบแอส 0.0 V (ก) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ได้จากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ได้จากโปรแกรมแบบขนาน

โปรแกรมแบบลำดับ



(ก)

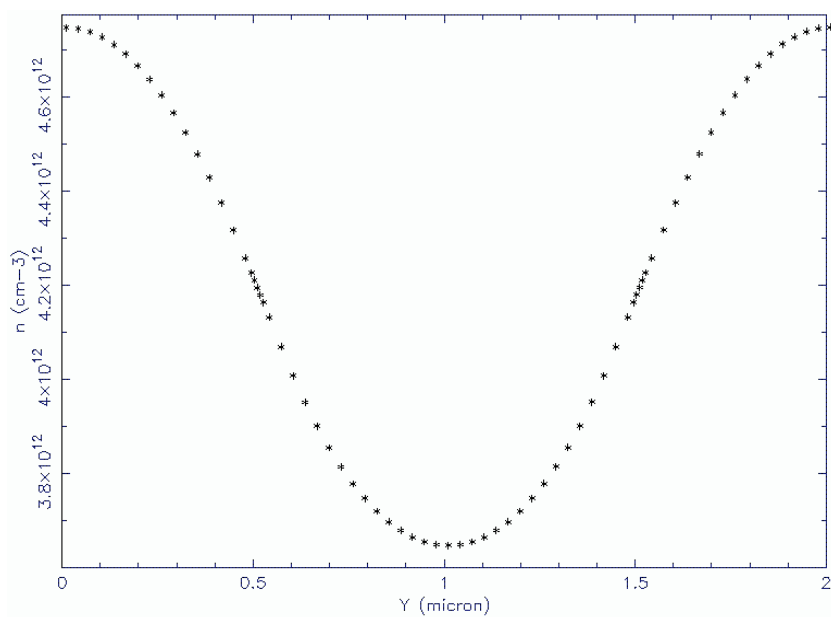
โปรแกรมแบบขนาน



(ข)

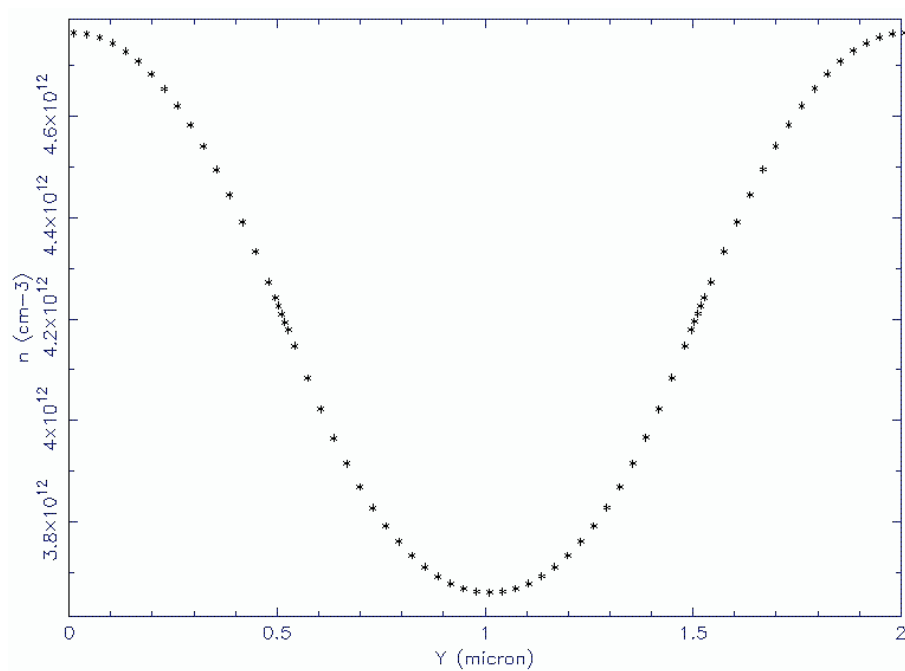
รูปที่ 6.14 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในรูปที่ 6.13 ในแกน X (ก) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากโปรแกรมแบบขนาน

โปรแกรมแบบลำดับ



(ก)

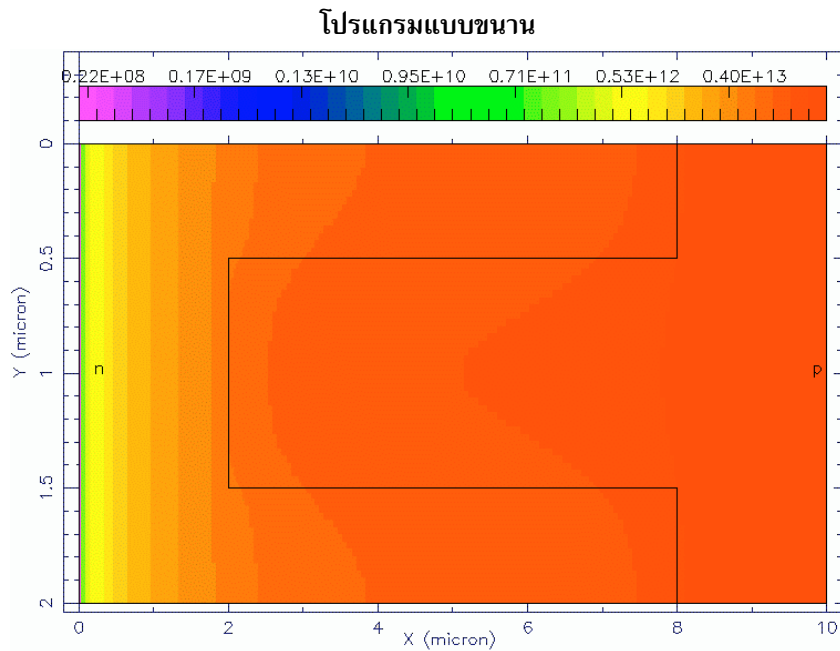
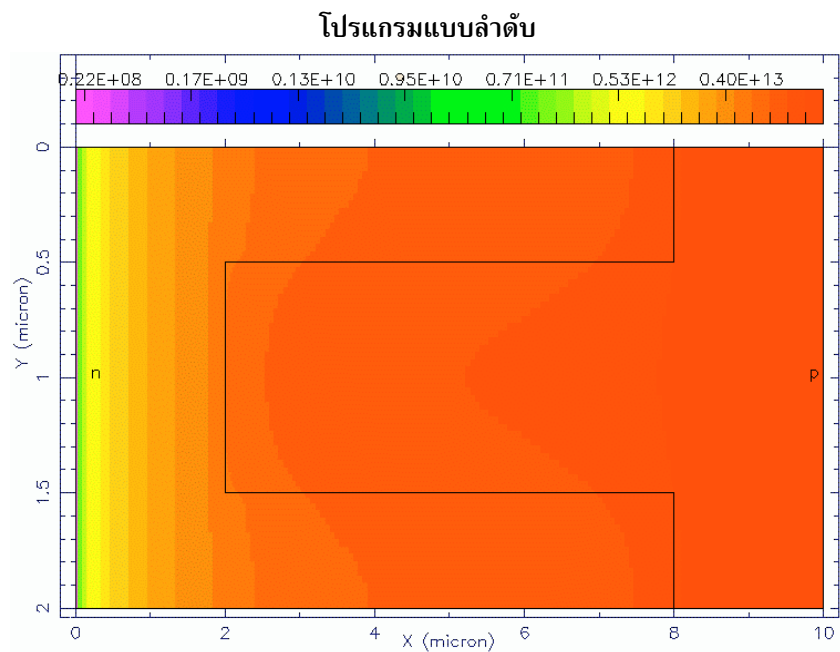
โปรแกรมแบบขนาน



(ข)

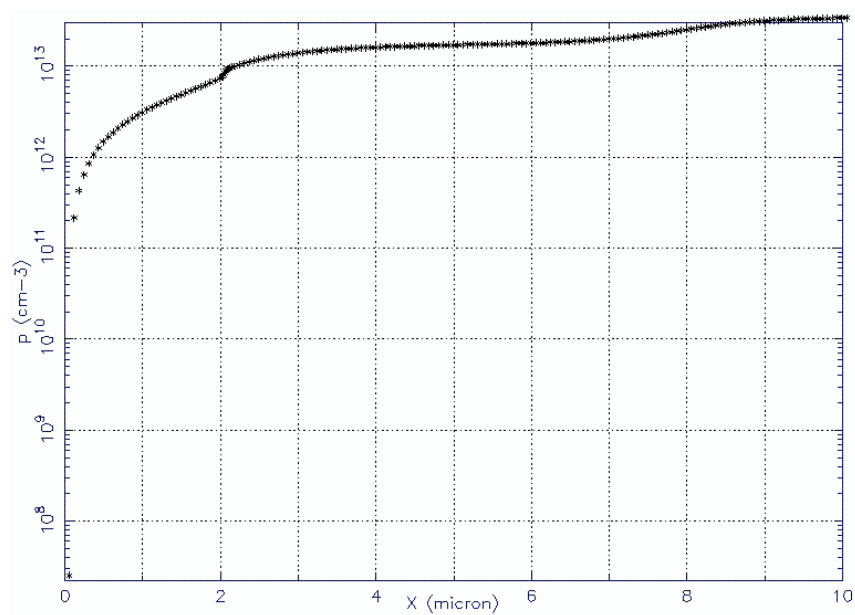
รูปที่ 6.15 ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในรูปที่ 6.13 ในแกน Y (ก) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากโปรแกรมแบบขนาน

ความหนาแน่นของโฮล



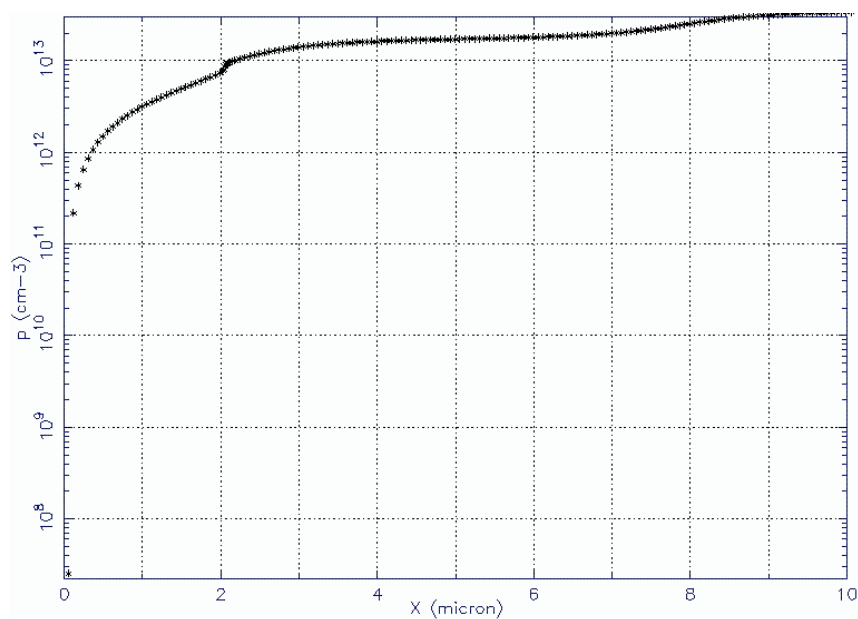
รูปที่ 6.16 ค่าความหนาแน่นของโฮลที่ไบแอส 0.0 V (ก) ค่าความหนาแน่นของโฮลที่ได้จากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของโฮลที่ได้จากโปรแกรมแบบขนาน

โปรแกรมแบบลำดับ



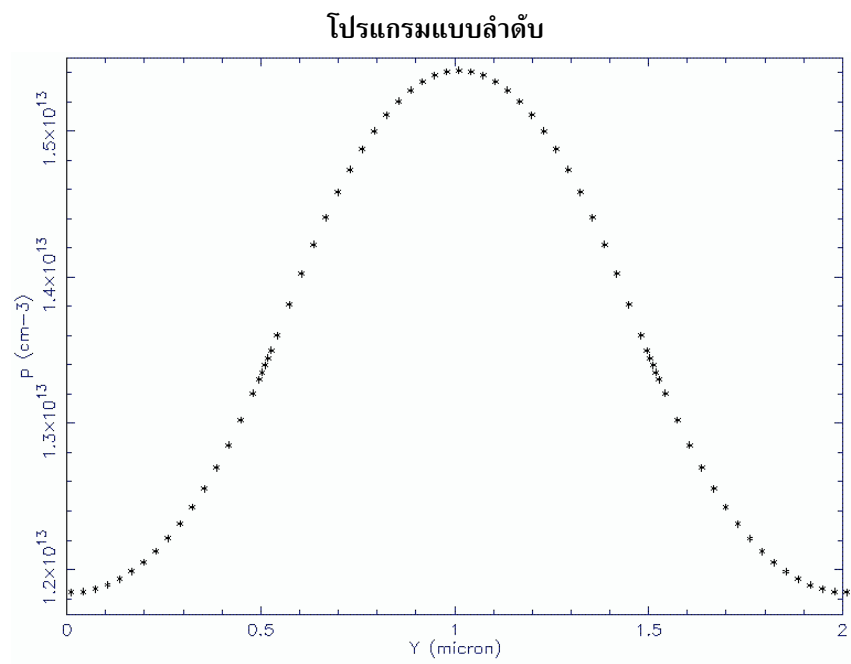
(ก)

โปรแกรมแบบขนาน

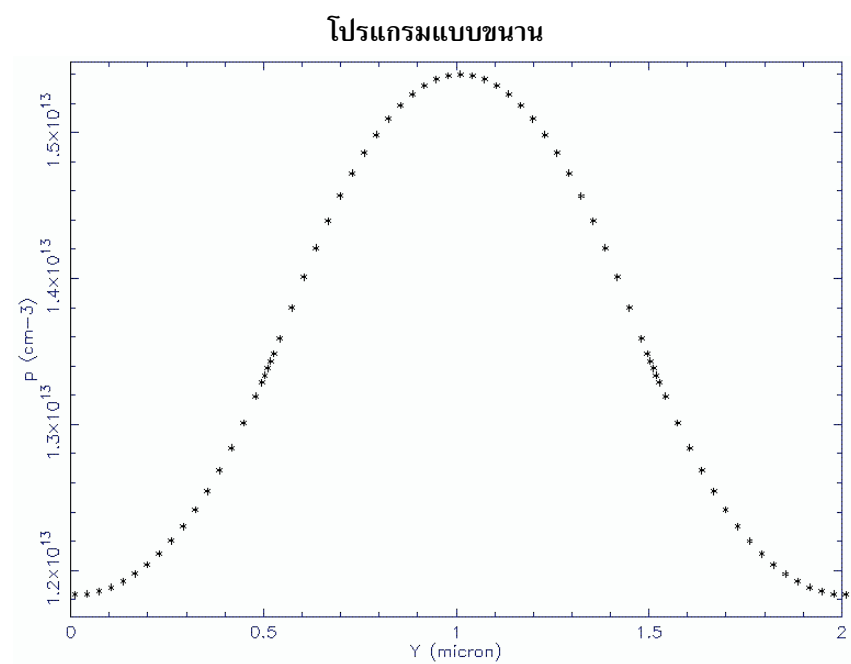


(ข)

รูปที่ 6.17 ค่าความหนาแน่นของโฮลในรูปที่ 6.16 ในแกน X (ก) ค่าความหนาแน่นของโฮลจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของโฮลจากโปรแกรมแบบขนาน



(ก)

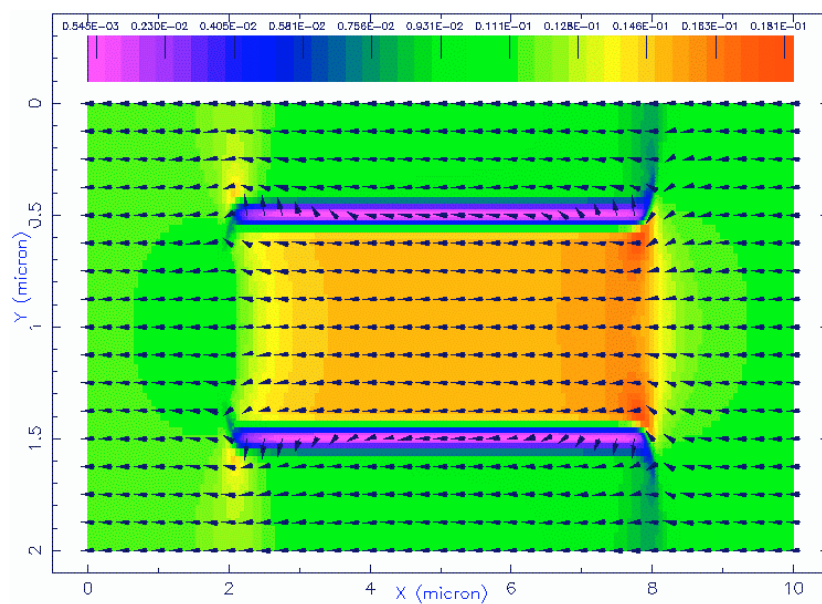


(ข)

รูปที่ 6.18 ค่าความหนาแน่นของโฮลในรูปที่ 6.16 ในแกน Y (ก) ค่าความหนาแน่นของโฮลจากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นของโฮลจากโปรแกรมแบบขนาน

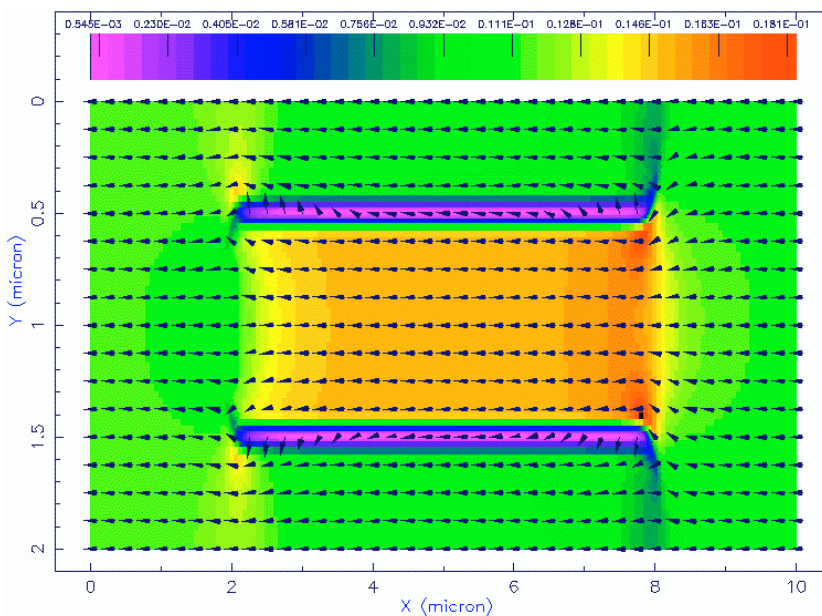
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

โปรแกรมแบบลำดับ



(ก)

โปรแกรมแบบขนาน

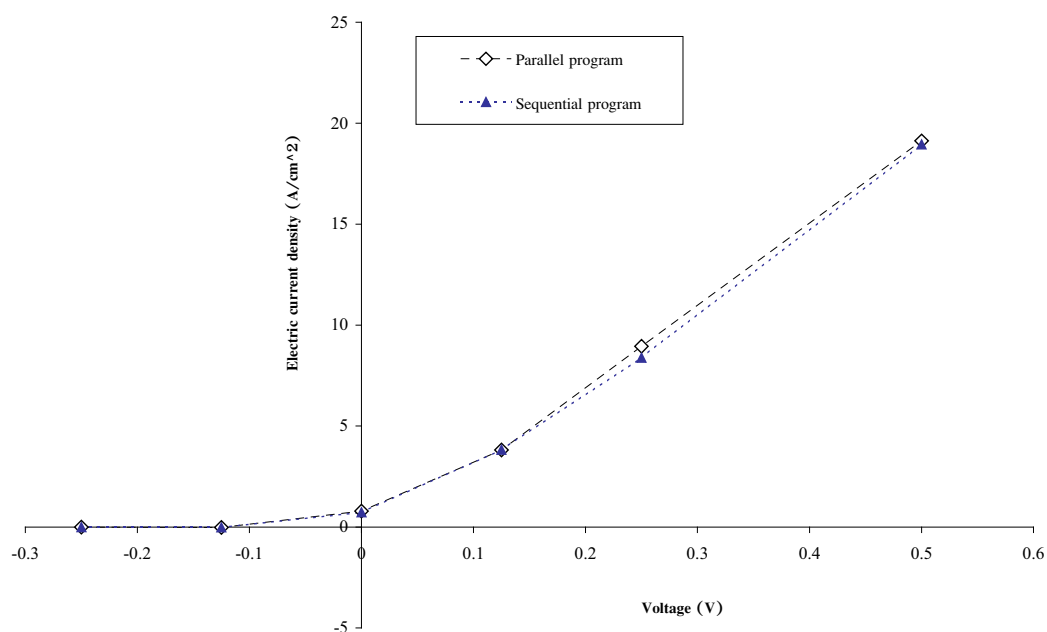


(ข)

รูปที่ 6.19 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่โบนัส 0.0 V (ก) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมแบบลำดับ (ข) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมแบบขนาน

6.7 J-V Characteristic Curve

ลักษณะกราฟของ J-V curve ที่ได้จากการจำลองแบบของโปรแกรมแบบลำดับและแบบขนาน โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าไบโอส ที่ -0.25 -0.125 0.0 0.125 0.25 และ 0.5 V ตามลำดับ ได้ผลแสดงในรูปที่ 6.20 จากรูปจะเห็นว่าทั้งสองโปรแกรมแสดงผลของกราฟ J-V ของเซลล์สุริยะอยู่ในที่มืดได้ถูกต้องเหมือนกัน แต่ค่าความหนาแน่นกระแสที่ได้ยังมีค่าสูงเกินกว่าค่าจริง เนื่องจากโปรแกรมยังไม่รู้ค่า จากกราฟแสดงว่าโปรแกรมแบบขนานที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องเพราะผลการจำลองแบบได้ลักษณะใกล้เคียงกันกับโปรแกรมแบบลำดับ



รูปที่ 6.20 J-V characteristic ของโปรแกรมแบบลำดับและโปรแกรมแบบขนาน

6.8 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองแบบกับโครงสร้างกริด

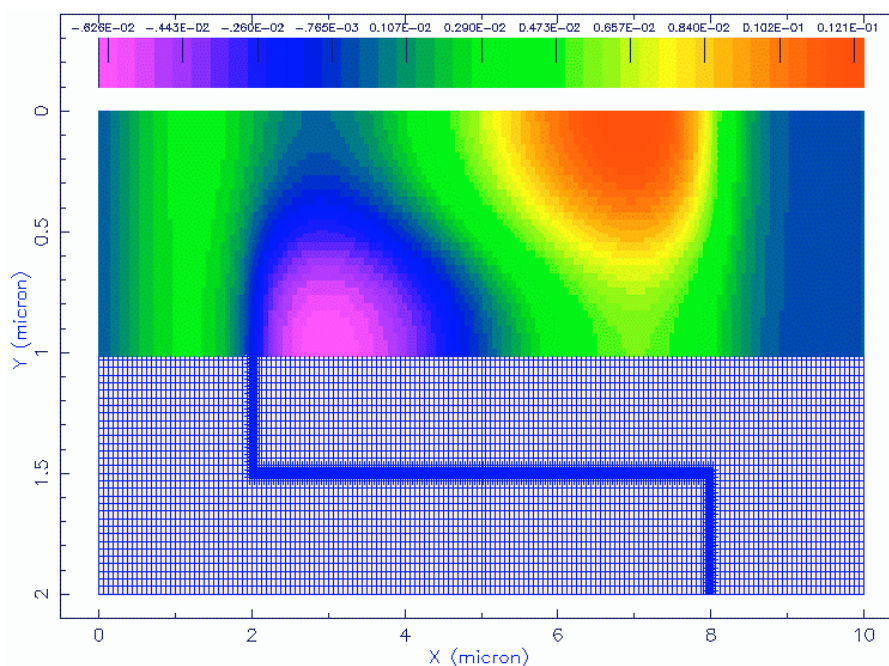
เมื่อนำผลจากการจำลองแบบมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับโครงสร้างกริด เพื่อพิจารณาบริเวณกริดขนาดเล็กกับบริเวณที่ต้องการหาผลเฉลยที่มีเกรเดียนต์เปลี่ยนแปลงรุนแรง ค่าที่นำมาเปรียบเทียบประกอบด้วย 1) ค่าศักย์ไฟฟ้า 2) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3) ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล โดยได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.21, 6.22, 6.23 และ 6.34 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.21 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากับโครงสร้างกริด จะเห็นว่าบริเวณที่มีเกรเดียนต์รุนแรงมีลักษณะโค้งงอ แต่บริเวณกริดขนาดเล็กมีลักษณะเป็นเส้นตรงตามรอยต่อของจังก์ชัน แสดงว่าโครงสร้างกริดที่ได้สร้างไว้ในตอนเริ่มต้นไม่สามารถรองรับในการหาผลเฉลยของศักย์ไฟฟ้าได้เลย

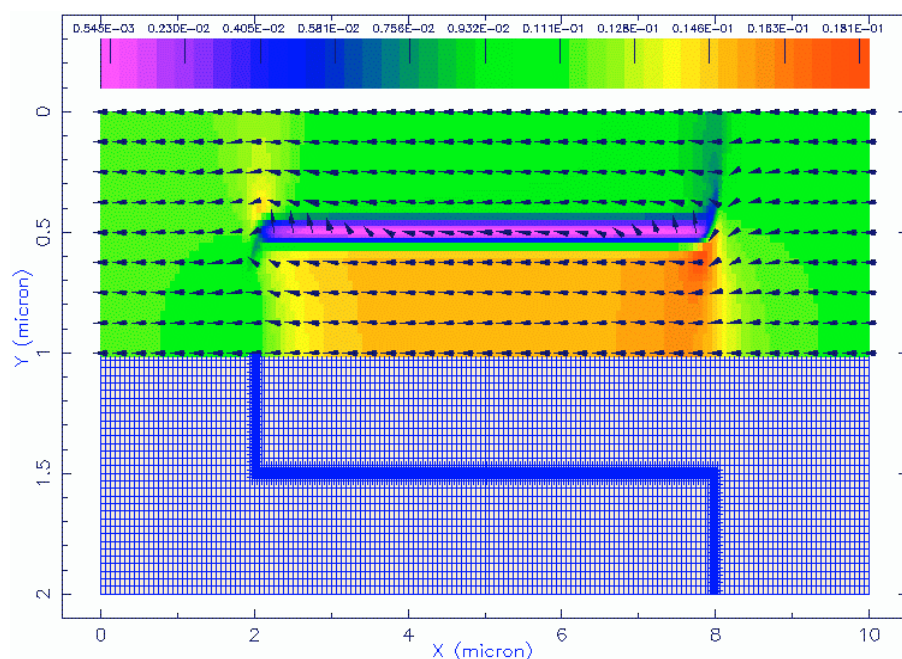
เมื่อพิจารณารูปที่ 6.22 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับโครงสร้างกริด โดยบริเวณเกรเดียนต์ของกระแสไฟฟ้าจะเกิดที่จังก์ชัน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณขนาดกริดขนาดเล็กมาก และเกรเดียนต์ของกระแสไฟฟ้ามีลักษณะโค้งงอที่มุมของจังก์ชัน ในขณะที่กริดขนาดเล็กที่ใช้มีลักษณะเป็นมุมฉาก ซึ่งลักษณะดังกล่าว แสดงให้เห็นว่ากริดขนาดเล็กไม่เหมาะสมในการคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.23 และ 6.24 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน กับ โฮล ตามลำดับ กับโครงสร้างกริด จะเห็นว่าทั้งสองรูป บริเวณค่าความหนาแน่นพาหะที่มีเกรเดียนต์รุนแรงมีบริเวณขนาดใหญ่กว่าบริเวณกริดขนาดเล็กมาก และมีลักษณะโค้งงอด้วย ซึ่งต่างจากลักษณะกริดขนาดเล็กที่เป็นมุมฉาก

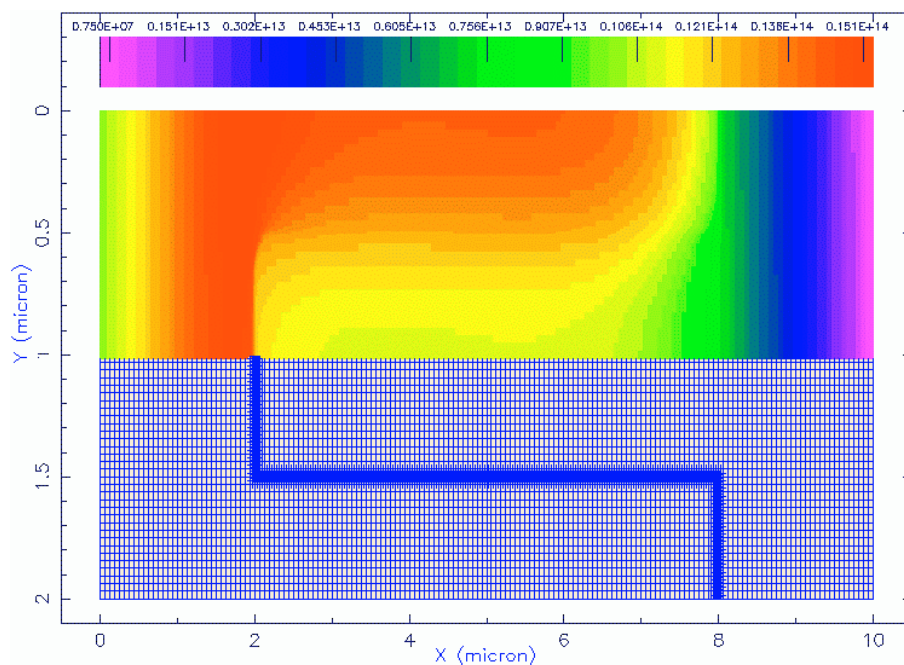
จากลักษณะกริดดังกล่าวที่ไม่สามารถรองรับบริเวณที่มีเกรเดียนต์เปลี่ยนแปลงรุนแรงทำให้การคำนวณหาผลเฉลยในบริเวณดังกล่าวไม่มีความแม่นยำ และส่งผลให้การจำลองแบบไม่สามารถลู่เข้าได้ แม้จะใช้โปรแกรมแบบขนานเพื่อลดเวลาในการคำนวณก็ตาม



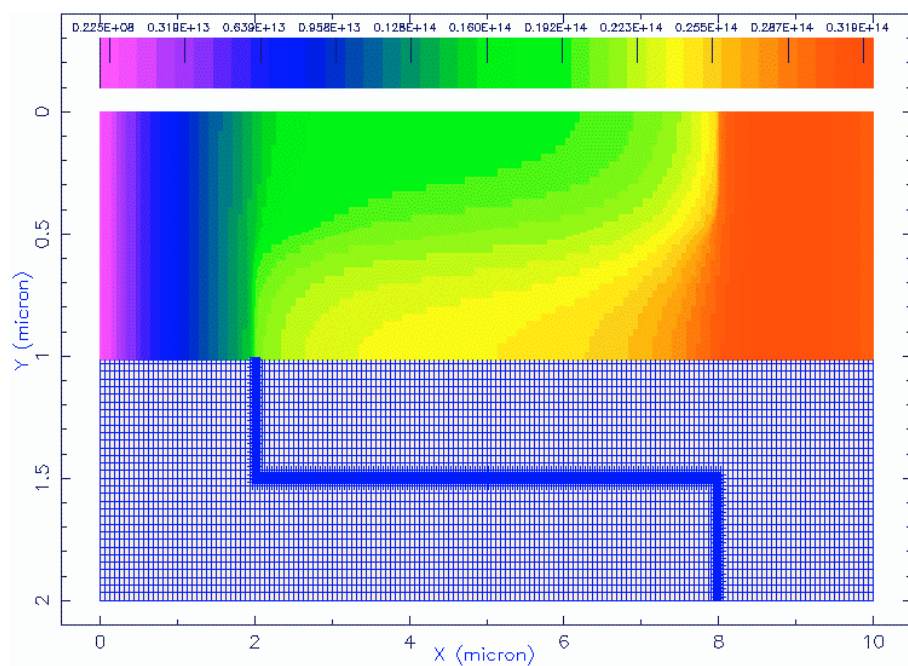
รูปที่ 6.21 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าศักย์ไฟฟ้า ที่ไบแอส 0.0 V กับ โครงสร้างกริด



รูปที่ 6.22 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J/cm^2) ที่ไบแอส 0.0 V กับ โครงสร้างกริด



รูปที่ 6.23 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (cm^{-3}) ที่ไบแอส 0.125 V กับ โครงสร้างกริด



รูปที่ 6.24 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าความหนาแน่นของโฮล (cm^{-3}) ที่ไบแอส 0.125 V กับ โครงสร้างกริด

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาอัลกอริธึมแบบขนานและพัฒนาโปรแกรมคำนวณแบบขนานเพื่อลดเวลาในการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์ใน 2 มิติ โดยการหาผลเฉลี่ยของชุดสมการสถานะที่อธิบายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในเซลล์สุริยะ ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวโยงซึ่งกันและกัน และเป็นสมการไม่เชิงเส้น ชุดสมการสถานะมี 3 สมการ คือ 1) สมการปัวซอง 2) สมการความหนาแน่นกระแส และ 3) สมการความต่อเนื่อง ชุดสมการดังกล่าวได้ถูกหาผลเฉลี่ยด้วยวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้เทคนิคของไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ที่แบ่งพื้นที่บนโดเมนโดยใช้กริดแบบตารางสี่เหลี่ยมและกริดแบบไฟไนต์บ็อก และแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงผลต่างสำหรับคำนวณบนคอมพิวเตอร์ การหาผลเฉลี่ยใช้วิธีการวนทำซ้ำจนได้ค่าคำตอบลู่เข้า

เพื่อให้การพัฒนาโปรแกรมแบบขนานมีความถูกต้องจึงได้พัฒนาโปรแกรมแบบลำดับก่อน สำหรับทำความเข้าใจในระบบปัญหา ขั้นตอนการหาผลเฉลี่ย และเป็นข้อมูลในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบบขนาน ส่วนการพัฒนาโปรแกรมแบบขนานได้ออกแบบอัลกอริธึมแบบขนานขึ้น 3 วิธี คือ 1) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอน 2) การแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้ง 3) การแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนีเดียว สำหรับเปรียบเทียบหาอัลกอริธึมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด นำไปใช้ในการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์ และนำผลที่ได้จากการจำลองแบบของโปรแกรมแบบขนานมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมแบบลำดับเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

ในการพัฒนาโปรแกรมแบบขนานของแต่ละอัลกอริธึม ได้แยกการพัฒนาออกเป็น 2 ส่วน คือ อัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่เพื่อพัฒนาโปรแกรมการแบ่งข้อมูลสำหรับแจกจ่ายไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และอัลกอริธึมการส่งและรับข้อมูลสำหรับแลกเปลี่ยนระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกเพื่อพัฒนาโปรแกรมจำลองแบบให้สามารถเข้าจังหวะส่งและรับข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์เครื่องลูกได้ ในโปรแกรมจำลองแบบได้แยกเป็น 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมแม่ สำหรับทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องแม่เพื่อควบคุมการทำงานและแจกจ่ายข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องลูก และโปรแกรมลูก สำหรับทำงานบนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกเพื่อคำนวณข้อมูลที่รับจากคอมพิวเตอร์เครื่องแม่โดยมีลักษณะการคำนวณเหมือนกันทุกเครื่องแต่คำนวณกับข้อมูลที่ต่างกันตามเทคนิคของ SIMD

ในการทดสอบความสามารถการทำงานของอัลกอริธึมแบบขนานของทั้ง 3 วิธี เพื่อหาอัลกอริธึมที่มีความสามารถสูงที่สุด โดยทดสอบในเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์ 2 จังก์ชัน ขนาด 40×100 ไมครอน มีจำนวนกริดบนโดเมนของเซลล์ทั้งหมด 536,600 จุดกริด โดยทดสอบการแบ่งจำนวนกริดสำหรับจ่ายให้คอมพิวเตอร์เครื่องลูก และทดสอบเวลาที่ใช้ในการจำลองแบบโดยการวนทำซ้ำคำนวณ 100 ครั้ง การทดสอบใช้จำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกจาก 2-16 เครื่อง ผลปรากฏว่าอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนีเดียวมีความสามารถในการทำงานสูงที่สุด โดยสามารถแบ่งข้อมูลสำหรับคอมพิวเตอร์เครื่องลูกได้เท่ากันทุกเครื่อง และได้ speed-up เป็น 8.5 ที่จำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก 16 เครื่อง ในขณะที่อัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวนอนและอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลพื้นที่ออกเป็นส่วนใหญ่ในแนวตั้ง ไม่สามารถแบ่งจำนวนกริดได้เท่ากันทุกเครื่อง และได้ speed-up curve เป็น 5.5 และ 8.0 (ที่จำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก 16 เครื่อง) ตามลำดับ ดังนั้นอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนีจึงถูกเลือกไปใช้ในการจำลองแบบเซลล์สุริยะ

แบบคลับแซนดิวซ์เพราะมีความสามารถในการทำงานสูงที่สุด และจากการทดสอบการทำงานอัลกอริธึมแบบขนานทั้ง 3 วิธีโดยใช้จำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูก จาก 2-16 เครื่องปรากฏว่าจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกที่เหมาะสมในการคำนวณของโปรแกรมแบบขนานสำหรับจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์คือ 8-10 เครื่อง เพราะเป็นช่วงที่ speed-up ยังลดลงได้ตามการเพิ่มจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์ แต่ถ้าจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกมากกว่านี้จะเกิดการหน่วงกันระหว่างการสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลของเครื่องลูกทำให้ speed-up อิ่มตัวแม้จำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์จะเพิ่มขึ้นก็ตาม

เมื่อนำโปรแกรมแบบขนานจากอัลกอริธึมการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนใหญ่จากดัชนีเดียว มาจำลองแบบเพื่อค้นหาพารามิเตอร์เบื้องต้นของเซลล์สุริยะ โดยเปรียบเทียบผลกับโปรแกรมแบบลำดับ ใช้แบบจำลองของเซลล์สุริยะแบบคลับแซนดิวซ์ 2 จังก์ชัน ขนาดของเซลล์ 2×10 ไมครอน ใช้ความหนาแน่นของโดเนอร์ 10^{13} cm^{-3} และความหนาแน่นของแอคเซ็ปเตอร์ $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ และใช้โปรแกรมสร้างกริดได้จำนวนกริด 16027 จุด กริดบนโดเมนของเซลล์ ในการจำลองแบบได้ใช้ศักย์ไฟฟ้าไบแอส -0.25, -0.125, 0.0, 0.125, 0.25 และ 0.5 V ตามลำดับ ผลปรากฏว่าทั้งโปรแกรมแบบขนานและโปรแกรมแบบลำดับให้ผลเหมือนกัน คือได้ค่าศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และค่าความแน่นกระแส ใกล้เคียงกัน และทั้ง 2 โปรแกรมไม่สามารถรันโปรแกรมจนถึงเงื่อนไขการลู่เข้า โปรแกรมแบบลำดับใช้เวลามากกว่า 10 วันสามารถลดค่ามากที่สุดของ dn/dt และ dp/dt ได้ 4 order โดยลดจาก 10^{22} เหลือ $10^{18} \text{ (cm}^{-3}/\text{second)}$ แต่โปรแกรมแบบขนานใช้เวลาการจำลองแบบ 3 วัน สามารถลดค่ามากที่สุดของ dn/dt และ dp/dt ได้ 6 order โดยลดจาก 10^{22} เหลือ $10^{16} \text{ (cm}^{-3}/\text{second)}$ ซึ่งเห็นได้ว่าโปรแกรมแบบขนานสามารถใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า และเมื่อนำผลการจำลองแบบของทั้ง 2 โปรแกรมมาเขียนกราฟ J-V curve ปรากฏว่าทั้ง 2 โปรแกรมสามารถแสดงลักษณะของ J-V curve ของเซลล์สุริยะในที่มืดได้ถูกต้อง และมีลักษณะของกราฟแบบเดียวกัน เพียงแต่ค่าความหนาแน่นกระแสสูงเกินกว่าค่าจริงเนื่องจากโปรแกรมยังไม่ลู่เข้า แสดงว่าโปรแกรมแบบขนานที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง

เมื่อนำค่าผลจากการจำลองแบบมาเปรียบเทียบกับโครงสร้างกริด พบว่ากริดที่ใช้ในการจำลองแบบไม่สามารถรองรับบริเวณที่มีเกรเดียนต์รุนแรงที่อยู่บนขอบของชั้นเซตปลอดประจุซึ่งอยู่ขอบข้างของจังก์ชันที่ต้องใช้กริดขนาดเล็กในการหาผลเฉลยเพื่อให้เกิดความแม่นยำ และเนื่องจากกริดไม่สามารถปรับตัวได้ในขณะทำการจำลองแบบ จึงทำให้บริเวณของกริดขนาดเล็กมีบริเวณแคบกว่าบริเวณที่เกรเดียนต์รุนแรงและที่มุมของจังก์ชันก็เป็นมุมฉากซึ่งไม่โค้งงอตามลักษณะของเกรเดียนต์ มีผลให้การจำลองแบบไม่สามารถลู่เข้าได้

ข้อเสนอแนะ

- 1) ต้องพัฒนาโปรแกรมแบ่งกริดที่สามารถปรับตัวเองได้ในขณะที่ทำการจำลองแบบ โดยต้องมีความสามารถเพิ่มจำนวนกริดหรือลดจำนวนกริดได้ และสามารถยืดขยายขนาดของกริดได้ เพื่อให้รองรับบริเวณที่มีเกรเดียนต์เปลี่ยนแปลงรุนแรงเพราะบริเวณดังกล่าวต้องการความแม่นยำในการหาผลเฉลย และจะทำให้โปรแกรมสามารถลู่เข้าได้
- 2) ใช้ระบบเครือข่ายของคอมพิวเตอร์ที่เร็วกว่า 100 Mbit/sec เช่น ใช้ระบบเครือข่ายของ Giga Bit หรือ myrinet แทน ทำให้เวลาการ saturate ของจำนวนคอมพิวเตอร์เครื่องลูกช้าลง สามารถเพิ่มจำนวนคอมพิวเตอร์ได้อีก

เอกสารอ้างอิง

1. Ahmed S. Bovazei, Mohamed A buab, Bahri Rezig. A new model of very high efficiency buried emitter silicon solar cell. *Solar Energy Materials and solar cells* 1997; 46: 29-41
2. W. Tantraporn. เมื่อใดจึงจะผลิตไฟฟ้าจากแสงแดดได้โดยราคาถูกพอ. *TDO Quarlerty* 1995 JAN - MAR; 4(1): 22-26
3. M. A. Green, et.al. Buried contact cells and modules centre for photovoltaic devices & system. University of New South Weles; *Australia annual report* 1993: 23-25.
4. C.B. Honsberg, F. Yun, A. Ebong, M. Taouk, S.R. Wenham, M.A. Green. 685 mV Open-circuit voltage laser grooved silicon solar cell. *Solar Energy Materials and solar cells* 1994; 34: 117-123.
5. S.R. Wenham, M.A. Green, S. Edmiston, P. Cambell, L. Koschier, C.B. Honsberg and et al. Limits of the efficiency of silicon multi layer thin file solar cells. *Solar Energy Materials and solar cells* 1996; 41/42: 9-17.
6. A.G. Aberle, G. Heijer, Martin A. Green. Two - dimensional minority carrier flow in high - efficiency silicon solar cells at short- circuit, open-circuit and maximum power point operation condition. *Solar Energy Materials and solar cells* 1994; 34: 149-160.
7. J. Zhao, Aihua Wang, G. F. Zheng, S.R. Wenlan, Matin A. green. Improved performance of multilayer silicon solar cells. Centre of photovoltaic device and system university of New South Wales
8. W. Tantraporn. Proposed computer simulation study of the "Club Sandwich Solar Cell" *TDO Quarlerty* 1995 APR - JUN; 4(2): 43 - 45.
9. H. K. Gummel. A self-consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculation. *IEEE Trans.Electron Devices* 1964 ; 11: 445 - 465.
10. Jan W. Slotboom. Computer-aided two-dimensional analysis of bipolar transistors. *IEEE Trans.Electron Devices* 1973 AUG; 20(8): 669 - 679.
11. Yu. SP, W. Tantraporn. Computer modeling of mesfets. *VLSI Electronics- microstructure science* Acad press 1982; 3: 163-195.
12. A. D. Sutherland. On the user of overrelaxation in conjunction with Gummel's algorithm to speed the convergent in a two-dimensional computer model for MOSFET's. *IEEE Trans.Electron Devices* 1980 July; 27(7).
13. Andrea F. Franz; Gerhard A. Franz; Siegfried Selberherr and etc.at.al. Finite boxes -a generalization of the finite-difference method suitable for semiconductor device simulation. *IEEE Trans.Electron Devices* 1983; 30(9): 1070 - 1082.
14. James A. Greenfield, Ronert W. Dutton. Nonplanar VLSI device analysis using the solution of poisson's equation. *IEEE Trans.Electron Devices* 1980 August; 27(8)

15. A. Geist, A. Beguelin, J. Dongarra, W. Jiang, R. Manchek, V. Sunderam. PVM:Parallel Virtual Machine. *A User's Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing*; Web version, <http://www.netlib.org/pvm3/book/PVM-book.html>, MIT Press Scientific and Engineering Computation; (ed) Jenuse kowalik, Massachusetts Institute of Technology 1994
16. R. Buyya. ***Hight Performance Cluster Computing Architectures and Systems***: volume 1, School of Computer Science and Software Engineering Monash University Melbourne Australia, New Jersey: Prentice Hall; 1999
17. R. Buyya. ***Hight Performance Cluster Computing Programming and Applications*** :volume 2, School of Computer Science and Software Engineering Monash University Melbourne Australia, New Jersey: Prentice Hall; 1999
18. Heshan El-Rewini, Ted G. Lewis. ***Distributed and Parallel Computing***. USA: Manning Publications Co; 1998.
19. Bary Wilkinson and Michael Allen. ***Parallel programming techniques and applications using networked workstations and parallel computer***. Prentice Hall; New Jersey 1999.
20. Martin A. Green. ***Solar cells operating principles technology and system application***. Kensington: The university of New South Wales; 1992.
21. Ahmed S. Bouazzi. High - efficiency silicon solar cells. ***IEEE Potentials*** 2000 Apr-May; 19(2): 16-19.
22. S. Selberherr. ***Analysis and simualtion of semiconductor devices***. Wien New York: Springer-Verlag; 1984.
23. William B. Burford and H. Gray Verner. ***Semiconductor junction and devices***. Mcgraw-Hill; New York 1965.
24. Z. Lisik and M. Turowski. Two-dimensional simulation of thysistor transient states from condition to forward block. ***IEEE Procesing-G*** 1991 OCT; 138(5): 575 - 581.
25. S. M. Sze. ***Modern semiconductor device physics***. New York: John Wiley & Sons, INC; 1988.
26. David J. Roulston. ***Bipolar semiconductor devices***. New York: Mcgraw- Hill; 1990.
27. D. L. Scharfetter nad H.K. Gummel. Large-signal analysis of a silicon read diode oscillator. ***IEEE Trans.Electron Devices*** 1969; 16(1): 64 - 77.
28. Se Puan Yu and Wirojana Tantraporn. A computer simulation scheme for various solid-state devices. ***IEEE Trans.Electron Devices*** 1975 AUG; 22(8): 515 - 1975.
29. Z. Lisik and M. Turowski. Two-dimensional simulation of thysistor transient states from condition to forward block. ***IEEE Procesing-G*** 1991 OCT; 138(5): 575 - 581.
30. Friedman, Menahem and Kacdel Bralak. "Iterative method", ***Fundamental of computer numerical analysis***. Florida: CRC Press, CN 7 1993: 333 - 362.
30. Thomas Sterling, Donald J. Becker and Daniel Savarese. Beowulf: a parallel workstation for science computation
31. Susann Regsdale. ***Parallel programming***. Mcgraw-Hill New York 1992

32. Otto Manck, Helmut H. Heimeier and Walter L. Engl. High injection in a two-dimensional transistor. ***IEEE Trans. Electron Devices***. 1974 JUL; 21(7): 403 – 409.
33. S. Guha, J. Yang, A. Banerjee, T. Glatfelter, S. Sugiyama. Advance in amorphous silicon alloy cell and module technology. ***Solar Energy Materials and solar cells***. 1997; 48: 265–271.
34. Hall RN. Silicon photovoltaic cells. ***Technical information series***. General electric company corporate research and development schenectady New York 1981 JAN

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การตีสคริปต์สัมภาษณ์ปัสซังตามเทคนิคของ Gummel

การตีสคริปต์สมการปัวซองตามเทคนิคของ Gummel

การตีสคริปต์สมการปัวซองตามเทคนิคของ Gummel [9] มีรายละเอียดดังต่อไปนี้
พิจารณาสมการปัวซองที่ผ่านการที่ผ่านการนอร์มาไลซ์และการแปลงสมการด้วยตัวแปรของ Slotboom [10] ดัง
ที่แสดงในสมการ (3.14) ในบทที่ 3 ดังต่อไปนี้

$$\nabla^2 \psi = e^{(\psi - \varphi_n)} - e^{(\varphi_p - \psi)} - N \quad (\text{ก-1})$$

โดยหน่วยของค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ถูกดูดซับอยู่ในเทอมของความยาวของเดอบาย (L_D) ซึ่งเป็นตัว
นอร์มาไลซ์ของระยะทาง (X,Y) ตามที่ได้กล่าวไว้ในหน้า 19

ในการแก้สมการของวิธีเชิงวิเคราะห์ ค่า ψ ที่ได้จะเป็นผลเฉลยแม่นยำตรง (ψ_{exact}) เขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\nabla^2 \psi_{\text{exact}} = e^{(\psi_{\text{exact}} - \varphi_n)} - e^{(\varphi_p - \psi_{\text{exact}})} - N \quad (\text{ก-2})$$

โดยที่ $N = n_0 - p_0$

ในการแก้สมการด้วยวิธีเชิงตัวเลขตามวิธี Gummel ใช้หลักการหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) (ψ_{exact})
โดยการเอาผลต่าง ที่เกิดจากค่าความผิดพลาดจากการคำนวณ $\delta(x)$ มารวมชดเชยกับค่าที่คำนวณได้ (trial
solution) (ψ) โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$\psi_{\text{exact}} = \psi + \delta \quad (\text{ก-3})$$

เมื่อ ψ_{exact} คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง

ψ คือ ผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณ

δ คือ ค่าความผิดพลาดจากการคำนวณ

เมื่อแทนสมการ(ก-3)ลงในสมการ(ก-2) จะได้สมการเป็น

$$\nabla^2 (\psi + \delta) = [e^{(\psi + \delta - \varphi_n)}] - [e^{(\varphi_p - \psi - \delta)}] - N + O^2(s) \quad (\text{ก-4})$$

จาก Tantraporn [11] ให้ประมาณค่าเอกซ์โปเนนเชียลคือ $e^{\psi + \delta} = e^\psi (1 + \delta)$ ซึ่งได้จากการกระจายเชิง
เส้น $\exp(+\delta) = (1 + \delta)$ ดังนั้น ค่า δ จะมีค่าได้มีค่าไม่เกิน $|0.1|$

จากสมการ(ก-4) จะได้

$$\nabla^2 (\psi - \delta) = [e^{(\psi - \varphi_n)} + \delta e^{(\psi - \varphi_n)}] - [e^{(\varphi_p - \psi)} - \delta e^{(\varphi_p - \psi)}] - N + O^2(s) \quad (\text{ก-5})$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้เป็น

$$\nabla^2 \delta - \delta(e^{(\Psi-\varphi_n)} + e^{(\varphi_p-\Psi)}) = (-\nabla^2 \Psi + e^{(\Psi-\varphi_n)} - e^{(\varphi_p-\Psi)} - N) + O^2(s) \quad (ก-6)$$

เมื่อทิ้งเทอม $O^2(s)$ และให้ $\nabla^2 \psi = \psi''$ ให้ $\nabla^2 \delta = \delta''$
จะได้สมการเป็น

$$\delta'' - \delta(e^{(\Psi-\varphi_n)} + e^{(\varphi_p-\Psi)}) = (-\Psi'' + e^{(\Psi-\varphi_n)} - e^{(\varphi_p-\Psi)}) - N \quad (ก-7)$$

ซึ่งจะได้สมการ(ก-7)เหมือนกับที่ Gummel ได้เสนอไว้ใน[9]

เมื่อแทนค่าของตัวแปรของ Slotboom โดยให้ $\phi_p = \exp(\varphi_p)$ และ $\phi_n = \exp(-\varphi_n)$ ได้สมการใหม่เป็น

$$\nabla^2 \delta - a^2 \delta = b \quad (ก-8)$$

$$\text{เมื่อ } a^2 = \phi_n \exp(\Psi) + \phi_p \exp(-\Psi) = n + p$$

$$\begin{aligned} b &= -\nabla^2 \psi + \phi_n \exp(\Psi) - \phi_p \exp(-\Psi) - N \\ &= -\nabla^2 \psi + n - p - N \end{aligned}$$

ซึ่งจะสมการ(ก-8)เหมือนกับที่ Slotboom ได้เสนอไว้ใน [10]

เมื่อแทนค่าจะได้สมการ(ก-8)เป็น

$$\nabla^2 \delta - (n + p) \delta = (-\nabla^2 \Psi + n - p) - N \quad (ก-9)$$

เมื่อตีสคริปต์พจน์ $\nabla^2 \psi$ ให้อยู่ในจุดกริด 5 จุด จะได้สมการเป็น

$$\nabla^2 \psi = 2 \left[\frac{\psi_N}{h_N(h_N+h_S)} + \frac{\psi_S}{h_S(h_N+h_S)} + \frac{\psi_E}{h_E(h_E+h_W)} + \frac{\psi_W}{h_W(h_E+h_W)} - \frac{(h_W h_E + h_N h_S)}{h_W h_E h_N h_S} \psi_K \right] \quad (ก-10)$$

ในทำนองเดียวกัน พจน์ $\nabla^2 \delta$ ตีสคริปต์ได้เป็น

$$\nabla^2 \delta = 2 \left[\frac{\delta_N}{h_N(h_N+h_S)} + \frac{\delta_S}{h_S(h_N+h_S)} + \frac{\delta_E}{h_E(h_E+h_W)} + \frac{\delta_W}{h_W(h_E+h_W)} - \frac{(h_W h_E + h_N h_S)}{h_W h_E h_N h_S} \delta_K \right] \quad (ก-11)$$

จัดรูป สมการ(ก-11) ใหม่จะได้สมการเป็น

$$\begin{aligned} \nabla^2 \delta = 2 & \left[\frac{\delta_N}{h_N(h_N+h_S)} + \frac{\delta_S}{h_S(h_N+h_S)} + \frac{\delta_E}{h_E(h_E+h_W)} + \frac{\delta_W}{h_W(h_E+h_W)} \right] \\ & - \left[\frac{2(h_N+h_S)}{h_N h_S(h_N+h_S)} + \frac{2(h_E+h_W)}{h_E h_W(h_E+h_W)} \right] \delta_k \end{aligned} \quad (\text{ก-12})$$

จัดรูป สมการ(ก-12) ใหม่อีกจะได้

$$\begin{aligned} \nabla^2 \delta = & \frac{2\delta_N}{h_N(h_N+h_S)} - \left[\frac{2}{h_N(h_N+h_S)} + \frac{2}{h_S(h_N+h_S)} \right] \delta_k + \frac{2\delta_S}{h_S(h_N+h_S)} \\ & + \frac{2\delta_E}{h_E(h_E+h_W)} - \left[\frac{2}{h_W(h_E+h_W)} + \frac{2}{h_E(h_E+h_W)} \right] \delta_k + \frac{2\delta_W}{h_W(h_E+h_W)} \end{aligned} \quad (\text{ก-13})$$

จะได้ค่า $\nabla^2 \delta$ จาก สมการ(ก-12) เป็น

$$\nabla^2 \delta = \frac{2}{(h_N+h_S)} \left[\frac{\delta_N}{h_N} - \left[\frac{1}{h_S} + \frac{1}{h_N} \right] \delta_k + \frac{\delta_S}{h_S} \right] + \frac{2}{(h_E+h_W)} \left[\frac{\delta_E}{h_E} - \left[\frac{1}{h_E} + \frac{1}{h_W} \right] \delta_k + \frac{\delta_W}{h_W} \right] \quad (\text{ก-14})$$

เมื่อแทนสมการ(ก-14) ลงในสมการ (ก-8) จะได้สมการเป็น

$$\frac{2}{(h_N+h_S)} \left[\frac{\delta_N}{h_N} - \left[\frac{1}{h_S} + \frac{1}{h_N} \right] \delta_k + \frac{\delta_S}{h_S} \right] + \frac{2}{(h_E+h_W)} \left[\frac{\delta_E}{h_E} - \left[\frac{1}{h_E} + \frac{1}{h_W} \right] \delta_k + \frac{\delta_W}{h_W} \right] - a_k^2 \delta_k = b_k \quad (\text{ก-15})$$

$$\text{เมื่อ } a^2 = n + p$$

$$b_k = -\nabla^2 \psi + n - p - n^0 + p^0$$

ซึ่งจะได้สมการ(ก-15)เหมือนกับที่ Tantraporn ได้เสนอไว้ใน [11]

ในการทำงานเดียวกันเมื่อแทนค่า $\nabla^2 \psi$ ลงในสมการ(ก-15) จะได้สมการเป็น

$$\begin{aligned}
& -2 \frac{(h_w h_E + h_N h_S)}{h_w h_E h_N h_S} \delta_K - (n_k + p_k) \delta_k \\
& + 2 \frac{\delta_N}{h_N (h_N + h_S)} + 2 \frac{\delta_S}{h_S (h_N + h_S)} + 2 \frac{\delta_E}{h_E (h_E + h_W)} + 2 \frac{\delta_W}{h_W (h_E + h_W)} \\
& = -[+2 \frac{\Psi_N}{h_N (h_N + h_S)} + 2 \frac{\Psi_S}{h_S (h_N + h_S)} + 2 \frac{\Psi_E}{h_E (h_E + h_W)} + 2 \frac{\Psi_W}{h_W (h_E + h_W)}] \\
& \quad - [-2 \frac{\Psi_k}{h_N (h_N + h_S)} - 2 \frac{\Psi_k}{h_S (h_N + h_S)} - 2 \frac{\Psi_k}{h_E (h_E + h_W)} - 2 \frac{\Psi_k}{h_W (h_E + h_W)}] \\
& \quad + [n_k - p_k - n_k^0 + p_k^0]
\end{aligned} \tag{ก-16}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\begin{aligned}
& \{[2 \frac{(h_w h_E + h_N h_S)}{h_w h_E h_N h_S}] + (n_k + p_k)\} \delta_k^{(m+1)} \\
& = \frac{2}{h_N (h_N + h_S)} [\delta_N^m + \Psi_N^m - \Psi_k^m] + \frac{2}{h_S (h_N + h_S)} [\delta_S^m + \Psi_S^m - \Psi_k^m] \\
& \quad + \frac{2}{h_E (h_E + h_W)} [\delta_E^m + \Psi_E^m - \Psi_k^m] + \frac{2}{h_W (h_E + h_W)} [\delta_W^m + \Psi_W^m - \Psi_k^m] \\
& \quad - [n_k - p_k - n_k^0 + p_k^0]^m
\end{aligned} \tag{ก-17}$$

โดยที่ $m+1$ คือ รอบการคำนวณในรอบปัจจุบัน

m คือ รอบการคำนวณในรอบครั้งก่อน

สมการ(ก-17)เป็นรูปสมการที่เหมาะสมนำไปใช้งานในการคำนวณ

จากสมการ(ก-17)สามารถหาค่า $^{m+1}\delta_k$ ได้เมื่อรู้ค่า $^m\delta_k, ^m\Psi_L, ^m\Psi_k$ เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$ เป็น รอบของการทำซ้ำและเมื่อได้ค่า $\delta_k^{(m+1)}$ ก็สามารถหาค่า Ψ_{exact} ได้จากสมการที่(ก-3) คือ

$$\Psi_{\text{exact}}^{(m+1)} = \Psi_k^m + \delta_k^{(m+1)} \tag{ก-18}$$

โดยที่ $m+1$ คือ รอบการคำนวณในรอบปัจจุบัน

m คือ รอบการคำนวณในรอบครั้งก่อน

ในการหาผลเฉลยของวิธี Gummel's จะเป็นการหาค่า $\Psi_{\text{exact}}^{(m+1)}$, Ψ_k^m , $\delta_k^{(m+1)}$, n^m , p^m โดยใช้วิธีการทำซ้ำ ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อ 3.3.3.2 ในบทที่ 3 โดย Gummel หาผลเฉลยแม่นยำได้จากสมการ $\Psi_{\text{exact}}^{(m+1)} = \Psi_k^m + \delta_k^{(m+1)}$ ซึ่งหาผลเฉลยจากการทำซ้ำ และจะเหมือนกับการแก้สมการปัวซองในรูปแบบสมการต่อไปนี้

$$\nabla^2 \delta^{(m+1)} - (n^m + p^m) \delta^{(m+1)} = (-\nabla^2 \Psi^m + n^m - p^m) - N^m \quad (\text{ก-19})$$

และใช้วิธีการปรับปรุงของวิธีของ Gummel ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อ 3.4.2.3 ในบทที่ 3 ที่เสนอโดย Sutherland [12] ที่ใช้วิธี SOR ซึ่งปรับปรุงมาจากวิธีของ Gummel ดังสมการต่อไปนี้

$$\Psi^{(m+1)} = \Psi^m + \omega (V^{(m+1)} - \Psi^m) \quad (\text{ก-20})$$

โดย $V^{(m+1)}$ คือ ค่า $\Psi_{\text{exact}}^{(m+1)}$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ (ก-18) ในรอบการทำซ้ำที่ (m+1)

ω คือ empirical determined over relaxation parameter ซึ่งมีค่ามากกว่า 1

ภาคผนวก ข
การดีสคริปต์ชี้สมการความหนาแน่นกระแส

การดีสคริไตซ์สมการความหนาแน่นกระแส

การดีสคริไตซ์สมการความหนาแน่นกระแสโดยใช้เทคนิคของ Slotboom [10] มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ โดยจะแยกขั้นตอนการดีสคริไตซ์ออกเป็น 2 ส่วน คือ สมการความหนาแน่นกระแสสำหรับโฮล ใช้วิธีการดีสคริไตซ์ที่เสนอโดย Slotboom และ สมการความหนาแน่นกระแสสำหรับอิเล็กตรอน ใช้วิธีการดีสคริไตซ์ที่เสนอโดย Tantraporn [11] ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

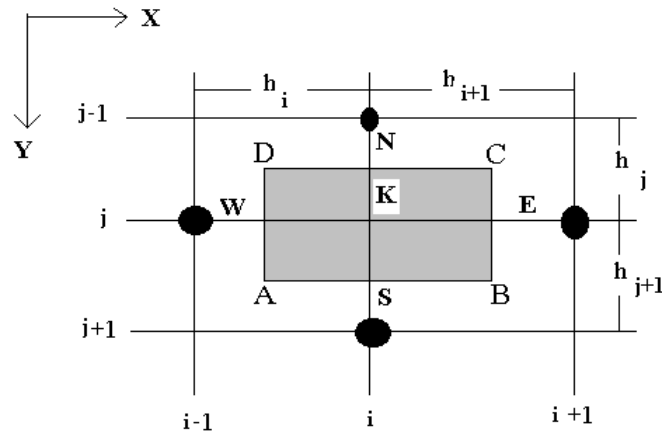
พิจารณาสมการความหนาแน่นกระแสที่ผ่านการนอร์มาไลซ์และการแปลงสมการด้วยตัวแปรของ Slotboom ดังที่แสดงในสมการ (3.15) และ (3.16) ในบทที่ 3 ดังนี้

$$\vec{J}_p = -\gamma_p^{-1} \exp(-\psi) \vec{\nabla} \phi_p \quad (\text{ข-1})$$

$$\vec{J}_n = \gamma_n^{-1} \exp(\psi) \vec{\nabla} \phi_n \quad (\text{ข-2})$$

เมื่อ $\gamma_p^{-1} = \mu_p$ และ $\gamma_n^{-1} = \mu_n$

1) พิจารณาการดีสคริไตซ์สมการความหนาแน่นกระแสของโฮลตามวิธีการของ Slotboom ดังนี้



รูปที่ ข-1 แสดงองค์ประกอบของความหนาแน่นกระแสที่ไหลเข้าหรือออกจากจุด K

จากรูปพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสของโฮลจากสมการที่ (ข-1) ดังนี้

$$\vec{J}_p = -\gamma_p^{-1} \exp(-\psi) \vec{\nabla} \phi_p$$

เมื่อพิจารณาที่จุด $K(i,j)$ ในพื้นที่สี่เหลี่ยม $ABCD$ จะมีความหนาแน่นกระแสไหลเข้าและออกด้วยกัน 4 องค์ประกอบ คือ J_N, J_E, J_S, J_W โดยค่าความหนาแน่นกระแสจะเป็นการพิจารณาที่จุดกึ่งกลางระหว่าง 2 จุดกริด และจะมีค่าคงที่ระหว่าง 2 จุดกริดนั้น

เพื่อความเข้าใจจะพิจารณาความหนาแน่นกระแสของโหนดระหว่างจุด K และ จุด S โดยใช้สัญลักษณ์เป็น J_p^S และ ให้มีค่าคงที่ในระหว่างจุดทั้ง 2 เขียนสมการดังนี้

$$J_p^S = -\gamma_p^{-1} \exp(-\psi) \frac{d\phi}{dy} = \text{const} \quad (\text{ข-3})$$

จากสมการที่ (ข-3) เป็นการพิจารณาความหนาแน่นกระแสที่จุด $y_j \leq y \leq y_{j+1}, x = k$ และเมื่อจัดรูปสมการใหม่โดยเปลี่ยนสัญลักษณ์ จาก dy เป็น ds เขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$J_p^S (\gamma_p(s)) \exp(\psi(s)) ds = -d\phi \quad (\text{ข-4})$$

เมื่อสมมติให้ทิศทางการไหลของกระแส J_p^S ไหลจาก y_j ไป y_{j+1} ($y_j > y_{j+1}$) โดยใช้สัญลักษณ์แทนเป็น $J^{j,j+1}$ ซึ่งสามารถแก้สมการที่ (ข-4) ได้จากการอินทิเกรตจาก y_j ไป y_{j+1} ดังนี้

$$\int_{y_j}^{y_{j+1}} J_p^{j,j+1} (\gamma_p(s)) \exp(\psi(s)) ds = - \int_{y_j}^{y_{j+1}} d\phi \quad (\text{ข-5})$$

ได้

$$J_p^{j,j+1} \int_{y_j}^{y_{j+1}} (\gamma_p(s)) \exp(\psi(s)) ds = -[\phi_{j+1} - \phi_j] \quad (\text{ข-6})$$

ได้

$$J_p^{j,j+1} = \frac{-[\phi_{j+1} - \phi_j]}{\int_{y_j}^{y_{j+1}} (\gamma_p(s)) \exp(\psi(s)) ds} \quad (\text{ข-7})$$

เอา $\frac{\exp(-\psi_j)}{\exp(-\psi_j)}$ คูณด้านขวาของสมการที่ (ข-7) จะได้

$$J_p^{j,j+1} = \frac{-[\phi_{j+1} - \phi_j] \exp(-\psi_j)}{\int_{y_j}^{y_{j+1}} (-\gamma_p(s)) \exp\{\psi(s) - \psi_j\} ds} \quad (\text{ข-8})$$

เมื่อให้
$$a_{j,j+1} = \frac{1}{\int_{\psi_j}^{\psi_{j+1}} (\gamma_p(s)) \exp\{\psi(s) - \psi_j\} ds} \quad (\text{ข-9})$$

เมื่อให้สนามไฟฟ้าระหว่าง 2 จุด เป็นค่าคงที่ ประมาณค่า $a_{j,j+1}$ ได้

$$a_{j,j+1} = \frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1} \exp\left\{\frac{\psi_{j+1} - \psi_j}{2}\right\} sh(\Delta_{j+1})} \quad (\text{ข-10})$$

โดยที่ $sh(x) = \sinh(x) / x$

$$\Delta_{j+1} = (1/2)(\psi_{j+1} - \psi_j)$$

$\gamma_p^{j,j+1}$ คือ ค่าส่วนกลับของค่าโมบิลิตีที่อยู่กึ่งกลางระหว่าง จุด j และ $j+1$

$h_{j,j+1}$ คือ ระยะทางระหว่าง จุด j และ $j+1$

และจากการจัดรูปทางคณิตศาสตร์ สามารถเขียนค่า $a_{j,j+1}$ ได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังนี้

$$a_{j,j+1} = \frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1} \exp\left\{\frac{\psi_{j+1} - \psi_j}{2}\right\} sh(\Delta_{j+1})} = \frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) \quad (\text{ข-11})$$

โดยที่ $B(x)$ คือ Bernoulli function

มีค่าเป็น

$$B(x) = \frac{x}{\exp(x) - 1} \quad (\text{ข-12})$$

จึงได้สมการความหนาแน่นกระแสของโฮลที่ไหลจากจุด j ไป จุด $j+1$ คือ

$$J_p^{j,j+1} = -\frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} - \phi_j] \exp(-\psi_j) \quad (\text{ข-13})$$

และ ได้สมการความหนาแน่นกระแสของโฮลที่ไหลจากจุด $j+1$ ไป จุด j คือ

$$J_p^{j+1,j} = -J_p^{j,j+1} = \frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} - \phi_j] \exp(-\psi_j) \quad (\text{ข-14})$$

จัดรูปสมการที่ (13) ให้สะดวกเพื่อนำไปใช้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 J_p^{j,j+1} &= -\frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} - \phi_j] \exp(-\psi_j) \\
 &= -\frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} \exp(-\psi_j) - \phi_j \exp(-\psi_j)] \\
 &= -\frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} \exp(\psi_{j+1} - \psi_{j+1} - \psi_j) - \phi_j \exp(-\psi_j)] \\
 &= -\frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} \exp(-\psi_{j+1}) \exp(\psi_{j+1} - \psi_j) - \phi_j \exp(-\psi_j)]
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.10 ในบทที่ 3 $p = \phi \exp(-\psi)$ จะได้

$$J_p^{j,j+1} = -\frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [P_{j+1} \exp(\psi_{j+1} - \psi_j) - P_j] \quad (\text{ข-15})$$

สมการที่ (ข-15) เป็นสมการความหนาแน่นกระแสของโวลท์ไพลจากจุด j ไป จุด $j+1$ ที่จะนำไปใช้งาน
 ในทำนองเดียวกัน สมการความหนาแน่นกระแสของโวลท์ไพลจากจุด $j+1$ ไป จุด j จะได้

$$J_p^{j+1,j} = -J_p^{j,j+1} = \frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [P_{j+1} \exp(\psi_{j+1} - \psi_j) - P_j] \quad (\text{ข-16})$$

และสามารถเขียนสมการในรูปทั่วไปของสมการความหนาแน่นกระแสของโวลท์ไพลจากจุด K ซึ่งเป็นจุดที่
 พิจารณาหาผลเฉลี่ย ไปจุด L โดยที่ L คือ N, E, S, W ซึ่งเป็นจุดเพื่อนบ้านที่อยู่รอบจุด K ดังนี้

$$J_p^{K,L} = -\frac{1}{\gamma_p^{K,L} h_{K,L}} B(\psi_L - \psi_K) [P_L \exp(\psi_L - \psi_K) - P_K] \quad (\text{ข-17})$$

ในทำนองเดียวกัน สมการรูปทั่วไปของสมการความหนาแน่นกระแสของโวลท์ไพลจากจุด L ไป จุด K คือ

$$J_p^{L,K} = -J_p^{K,L} \quad (\text{ข-18})$$

2) โดยจะพิจารณาการดิสครีไทซ์สมการความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนตามการแนะนำของ Tantraporn ดังนี้

จากสมการที่ (ข-2) คือ

$$\vec{J}_n = \gamma_n^{-1} \exp(\psi) \vec{\nabla} \phi_n$$

เพื่อความเข้าใจจะพิจารณาความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนระหว่างจุด K และ จุด S โดยใช้สัญลักษณ์เป็น

J_p^S หรือ $J_p^{j,j+1}$ และ ให้มีค่าคงที่ในระหว่างจุดทั้ง 2 เขียนสมการดังนี้

$$J_n^{j,j+1} = \gamma_n^{-1} \exp(\psi) \frac{d\phi}{dx} = \text{const} \quad (\text{ข-19})$$

จากสมการที่ (ข-6) เป็นการพิจารณาความหนาแน่นกระแสที่จุด $y_j \leq y \leq y_{j+1}, x = k$ และเมื่อจัดรูปสมการใหม่โดยเปลี่ยนสัญลักษณ์ จาก dy เป็น ds เขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$J_n^{j,j+1} (\gamma_n(s)) \exp(-\Psi(s)) ds = d\phi \quad (\text{ข-20})$$

ซึ่งสามารถแก้สมการที่ (ข-20) ได้จากการอินทิเกรตจาก y_j ไป y_{j+1} ดังนี้

$$\int_{y_j}^{y_{j+1}} J_n^{j,j+1} (\gamma_n(s)) \exp(-\psi(s)) ds = \int_{y_j}^{y_{j+1}} d\phi \quad (\text{ข-21})$$

ได้

$$J_n^{j,j+1} \int_{y_j}^{y_{j+1}} (\gamma_n(s)) \exp(-\psi(s)) ds = [\phi_{j+1} - \phi_j] \quad (\text{ข-22})$$

ได้

$$J_n^{j,j+1} = \frac{[\phi_{j+1} - \phi_j]}{\int_{y_j}^{y_{j+1}} (\gamma_n(s)) \exp(-\psi(s)) ds} \quad (\text{ข-23})$$

เอา $\frac{\exp(\psi_j)}{\exp(\psi_j)}$ คูณด้านขวาของสมการที่ (ข-23) จะได้

$$J_n^{j,j+1} = \frac{[\phi_{j+1} - \phi_j] \exp(\psi_j)}{\int_{y_j}^{y_{j+1}} (\gamma_n(s)) \exp\{-\psi(s) + \psi_j\} ds} \quad (\text{ข-24})$$

เมื่อให้
$$a_{j,j+1} = \frac{1}{\int_j^{j+1} (\gamma_n(s)) \exp \{-\psi(s) + \psi_j\} ds} \quad (\text{ข-25})$$

เมื่อให้สนามไฟฟ้าระหว่าง 2 จุด เป็นค่าคงที่ จะประมาณได้ว่า

$$a_{j,j+1} = [\gamma_n^{j,j+1} h_{j,j+1} \exp(\frac{\psi_{j+1} - \psi_j}{2}) \frac{\sinh(\frac{\psi_{j+1} - \psi_j}{2})}{\frac{\psi_{j+1} - \psi_j}{2}}]^{-1} \quad (\text{ข-26})$$

$$= [\gamma_n^{j,j+1} h_{j,j+1} \exp(\frac{\beta}{2}) \frac{\sinh(\frac{\beta}{2})}{\frac{\beta}{2}}]^{-1} \quad (\text{ข-27})$$

โดยที่ $\gamma_p^{j,j+1}$ คือค่าที่อยู่กึ่งกลางระหว่าง จุด j และ j+1
 $h_{j,j+1}$ คือระยะทางระหว่าง จุด j และ j+1
 $\beta = (\psi_{j+1} - \psi_j)$

และจากการจัดรูปทางคณิตศาสตร์ สามารถเขียนค่า $a_{j,j+1}$ ได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังนี้

$$a_{j,j+1} = [\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1} \exp(\frac{\beta}{2}) \frac{\sinh(\frac{\beta}{2})}{\frac{\beta}{2}}]^{-1} = \frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) \quad (\text{ข-28})$$

เมื่อ $B(x)$ คือ Bernoulli function

มีค่าเป็น

$$B(x) = \frac{x}{\exp(x) - 1} \quad (\text{ข-29})$$

จึงได้สมการความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนที่ไหลจากจุด j ไป จุด j+1 คือ

$$J_n^{j,j+1} = \frac{1}{\gamma_{np}^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\Psi_{j+1} - \Psi_j) [\phi_{j+1} - \phi_j] \exp(\Psi_j) \quad (\text{ข-30})$$

และ จึงได้สมการความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนที่ไหลจากจุด j+1 ไป จุด j คือ

$$J_n^{j+1,j} = -J_n^{j,j+1} = -\frac{1}{\gamma_{np}^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\Psi_{j+1} - \Psi_j) [\phi_{j+1} - \phi_j] \exp(\Psi_j) \quad (\text{ข-31})$$

จัดรูปสมการที่ (ข-30) ให้สะดวกเพื่อนำไปใช้ดังนี้

$$\begin{aligned} J_n^{j,j+1} &= \frac{1}{\gamma_{np}^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} - \phi_j] \exp(\psi_j) \\ &= \frac{1}{\gamma_n^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} \exp(\psi_j) - \phi_j \exp(\psi_j)] \\ &= \frac{1}{\gamma_n^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} \exp(\psi_j - \psi_{j+1} + \psi_{j+1}) - \phi_j \exp(\psi_j)] \\ &= \frac{1}{\gamma_n^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [\phi_{j+1} \exp(\psi_{j+1}) \exp(\psi_j - \psi_{j+1}) - \phi_j \exp(\psi_j)] \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.10 ในบทที่ 3 $n = \phi \exp(\psi)$ จะได้

$$J_n^{j,j+1} = \frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\psi_{j+1} - \psi_j) [n_{j+1} \exp(\psi_j - \psi_{j+1}) - n_j] \quad (\text{ข-32})$$

สมการที่ (ข-32) เป็นสมการความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนที่ไหลจากจุด j ไป จุด j+1 ที่จะนำไปใช้งานในทำนองเดียวกัน สมการความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนที่ไหลจากจุด j+1 ไป จุด j คือ

$$J_n^{j+1,j} = -J_n^{j,j+1} = -\frac{1}{\gamma_p^{j,j+1} h_{j,j+1}} B(\Psi_{j+1} - \Psi_j) [n_{j+1} \exp(\psi_j - \psi_{j+1}) - n_j] \quad (\text{ข-33})$$

และสามารถเขียนสมการในรูปทั่วไปของสมการความหนาแน่นกระแสสำหรับอิเล็กตรอนที่ไหลจากจุด K ซึ่งเป็นจุดที่พิจารณาหาผลเฉลี่ย ไปจุด L โดยที่ L คือ N, E, S, W ซึ่งเป็นจุดเพื่อนบ้านที่อยู่รอบจุด K ดังนี้

$$J_n^{K,L} = \frac{1}{\gamma_p^{K,L} h_{K,L}} B(\psi_L - \psi_K) [n_L \exp(\psi_K - \psi_L) - n_K] \quad (\text{ข-34})$$

ในทำนองเดียวกัน สมการรูปทั่วไปของสมการความหนาแน่นกระแสสำหรับอิเล็กตรอนที่ไหลจากจุด L ไป จุด K คือ

$$J_n^{L,K} = -J_n^{K,L} \quad (\text{ข-35})$$

ภาคผนวก ค
การดีสคริปต์ใช้สมการความต่อเนื่อง

การดิสครีไทซ์สมการความต่อเนื่อง

การดิสครีไทซ์สมการความต่อเนื่องโดยใช้เทคนิคของ Slotboom [10] มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ โดยจะแยกขั้นตอนการดิสครีไทซ์ออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ดิสครีไทซ์สมการความต่อเนื่องสำหรับโหนดที่ไม่ขึ้นกับเวลา ใช้วิธีการที่เสนอโดย Slotboom 2) ดิสครีไทซ์สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนที่ไม่ขึ้นกับเวลา ใช้วิธีการที่เสนอโดย Tantraporn [11] 3) ดิสครีไทซ์สมการความต่อเนื่องที่ขึ้นกับเวลา ใช้วิธีการที่เสนอโดย Slotboom ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

พิจารณาสมการความต่อเนื่องที่ผ่านการนอร์มาไลซ์ ดังที่แสดงในสมการ (3.15)และ(3.16) ในบทที่ 3 ดังนี้

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{J}_p + \frac{\partial p}{\partial t} = -R \quad (\text{ค-1})$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{J}_n - \frac{\partial n}{\partial t} = R \quad (\text{ค-2})$$

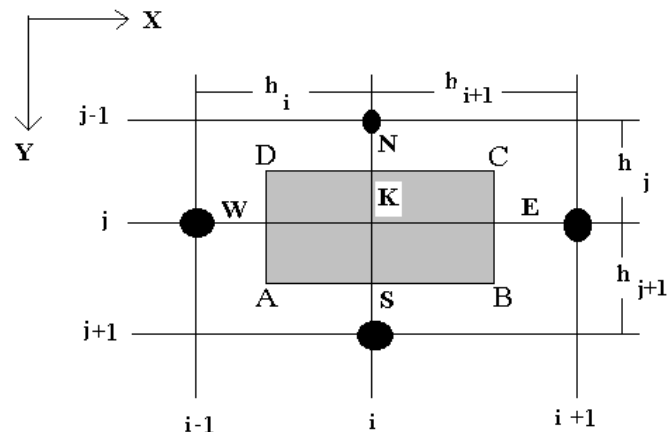
โดยที่ R คือ Recombination rate และ Generation rate

1) พิจารณาสมการความต่อเนื่องสำหรับ โหนด ที่ไม่ขึ้นกับเวลา ตามวิธีการที่เสนอโดย Slotboom ดังนี้

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{J}_p = -R \quad (\text{ค-3})$$

ในสมการที่ (ค-3) จะดิสครีไทซ์ ตามเทคนิคของ Slotboom

โดยใช้วิธี Box integration จะได้ดังนี้



รูปที่ ค-1 แสดงองค์ประกอบของความหนาแน่นกระแสที่ไหลเข้าหรือออกจากจุด K

$$\iint_{ABCD} \nabla \cdot \bar{J} dx dy = - \iint_{ABCD} R dx dy \quad (\text{ค-4})$$

เมื่อใช้ Gaussian theorem จะได้

$$\oint J_{normal} ds = - \iint_{ABCD} R dx dy \quad (\text{ค-5})$$

ประมาณการอินทิเกรต โดยวิธี Box integration จะได้

$$(J_S - J_N) \left(\frac{h_k + h_{k-1}}{2} \right) + (J_E - J_W) \left(\frac{h_l + h_{l-1}}{2} \right) = -R_K \left(\frac{h_k + h_{k-1}}{2} \right) \left(\frac{h_l + h_{l-1}}{2} \right) \quad (\text{ค-6})$$

เมื่อองค์ประกอบของสมการความหนาแน่นกระแส ซึ่งได้จากภาคผนวก ข มีสมการดังนี้

$$J_S = -a_S \exp(-\psi_K) (\phi_S - \phi_K) \quad \text{คือความหนาแน่นกระแสที่ไหลจุด K ไป จุด S} \quad (\text{ค-7})$$

$$J_N = a_N \exp(-\psi_K) (\phi_N - \phi_K) \quad \text{คือความหนาแน่นกระแสที่ไหลจุด N ไป จุด K} \quad (\text{ค-8})$$

$$J_E = -a_E \exp(-\psi_K) (\phi_E - \phi_K) \quad \text{คือความหนาแน่นกระแสที่ไหลจุด K ไป จุด E} \quad (\text{ค-9})$$

$$J_W = a_W \exp(-\psi_K) (\phi_W - \phi_K) \quad \text{คือความหนาแน่นกระแสที่ไหลจุด W ไป จุด K} \quad (\text{ค-10})$$

เมื่อ

$$a_L = \frac{1}{\gamma_p^{KL} h_{KL}} B(\psi_L - \psi_K) \quad (\text{ค-11})$$

เมื่อ B(x) คือ Bernoulli function

มีค่าเป็น

$$B(x) = \frac{x}{\exp(x) - 1} \quad (\text{ค-12})$$

เมื่อ γ_{KL} เป็นค่าส่วนกลับของโมบิลิตีที่อยู่กึ่งกลางระหว่าง จุด K และจุด L

h_{KL} เป็นระยะทางระหว่าง จุด K และ จุด L

จากสมการที่ (6) จัดรูปใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2}(h_k + h_{k-1})\{[-a_S \exp(-\psi_K)(\phi_S - \phi_K)] - [a_N \exp(-\psi_K)(\phi_N - \phi_K)]\} \\
 & + \frac{1}{2}(h_l + h_{l-1})\{[-a_E \exp(-\psi_K)(\phi_E - \phi_K)] - [a_W \exp(-\psi_K)(\phi_W - \phi_K)]\} \\
 & = -R_K \left(\frac{h_k + h_{k-1}}{2} \right) \left(\frac{h_l + h_{l-1}}{2} \right) \quad (\text{ค-13})
 \end{aligned}$$

เพื่อความสะดวกให้ $r = (h_k + h_{k-1}) / (h_l + h_{l-1})$ ได้สมการ(ค-13) ใหม่เป็น

$$\begin{aligned}
 & [-a_S \exp(-\psi_K)(\phi_S - \phi_K)] - [a_N \exp(-\psi_K)(\phi_N - \phi_K)] \\
 & + [-ra_E \exp(-\psi_K)(\phi_E - \phi_K)] - [ra_W \exp(-\psi_K)(\phi_W - \phi_K)] \\
 & = -R_K \left(\frac{h_l + h_{l-1}}{2} \right) \quad (\text{ค-15})
 \end{aligned}$$

จัดรูปสมการ(ค-15) ใหม่จะได้เป็น

$$\begin{aligned}
 & a_S \exp(-\psi_K)\phi_K - a_S \exp(-\psi_K)\phi_S + a_N \exp(-\psi_K)\phi_K - a_N \exp(-\psi_K)\phi_N \\
 & + ra_E \exp(-\psi_K)\phi_K - ra_E \exp(-\psi_K)\phi_E + ra_W \exp(-\psi_K)\phi_K - ra_W \exp(-\psi_K)\phi_W \\
 & = -R_K \left(\frac{h_l + h_{l-1}}{2} \right) \quad (\text{ค-16})
 \end{aligned}$$

จัดรูปสมการ(ค-16) ใหม่จะได้เป็น

$$\begin{aligned}
 & (a_S + a_N + a_E + a_W) \exp(-\psi_K)\phi_K \\
 & - a_S \exp(-\psi_K)\phi_S - a_N \exp(-\psi_K)\phi_N \\
 & - ra_E \exp(-\psi_K)\phi_E - ra_W \exp(-\psi_K)\phi_W \\
 & = -R_K \left(\frac{h_l + h_{l-1}}{2} \right) \quad (\text{ค-17})
 \end{aligned}$$

ซึ่งได้สมการ(ค-17) เหมือนกับที่ Slotboom ได้เสนอไว้ใน [10]

จากสมการ (ค-17) เมื่อ $p = \phi \exp(-\psi)$ จะได้สมการใหม่เป็น

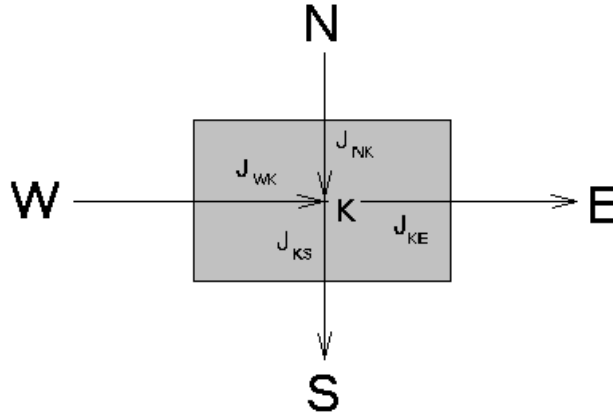
$$\begin{aligned}
 & (a_S + a_N + a_E + a_W)p_K \\
 & - a_S \exp(\psi_S - \psi_K)p_S - a_N \exp(\psi_N - \psi_K)p_N \\
 & - ra_E \exp(\psi_E - \psi_K)p_E - ra_W \exp(\psi_W - \psi_K)p_W \\
 & = -R_K \left(\frac{h_l + h_{l-1}}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{ค-18}$$

ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมในการใช้งาน

จาก สมการ (17) เขียนให้อยู่อย่างง่ายได้ดังนี้

$$A\phi = -r \tag{ค-19}$$

2) พิจารณาสมการความต่อเนื่องสำหรับ อิเล็กตรอน ที่ไม่ขึ้นกับเวลา ตามวิธีการที่เสนอโดย Tatraporn ดังนี้



รูปที่ ค-2 แสดงการไหลเข้าและออกของความหนาแน่นกระแส ณ จุด K

พิจารณาสมการความต่อเนื่องที่ไม่ขึ้นเวลา และ ไม่มี Recombination rate และ Generation rate ดังนี้

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{J}_n = 0 \tag{ค-20}$$

เมื่อใช้วิธี Box integration และใช้ Gaussian theorem จะได้สมการของเทอมไดเวอร์เจนซ์ดังนี้

$$(J_S - J_N)\left(\frac{h_k + h_{k-1}}{2}\right) + (J_E - J_W)\left(\frac{h_l + h_{l-1}}{2}\right) = 0 \quad (\text{ค-21})$$

จากภาคผนวก ข สูตรทั่วไปของสมการความหนาแน่นกระแสสำหรับอิเล็กตรอนมีทิศไหลจาก K ไป L คือ

$$J_{KL} = A_{KL}(\phi_L - \phi_K) \exp(\psi_K) \quad (\text{ค-22})$$

เมื่อแทน $A_{KL} = a_{KL}$

เมื่อองค์ประกอบของสมการความหนาแน่นกระแส มีสมการดังนี้

$$J_{KE} = A_{KE}(\phi_E - \phi_K) \exp(\psi_K) \quad (\text{ค-23})$$

$$J_{WK} = -J_{KW} = -A_{KW}(\phi_W - \phi_K) \exp(\psi_K) \quad (\text{ค-24})$$

$$J_{KS} = A_{KS}(\phi_S - \phi_K) \exp(\psi_K) \quad (\text{ค-25})$$

$$J_{NK} = -J_{KN} = -A_{KN}(\phi_N - \phi_K) \exp(\psi_K) \quad (\text{ค-26})$$

เอา สมการ(ค-23) – (ค-26) แทนค่าลงใน (ค-20)จะได้

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(h_N + h_S) \{ [A_{KE}(\phi_E - \phi_K) \exp(\psi_K)] + [A_{KW}(\phi_W - \phi_K) \exp(\psi_K)] \} \\ & + \frac{1}{2}(h_E + h_W) \{ [A_{KS}(\phi_S - \phi_K) \exp(\psi_K)] + [A_{KN}(\phi_N - \phi_K) \exp(\psi_K)] \} = 0 \quad (\text{ค-27}) \end{aligned}$$

จัดรูปสมการ(27)ใหม่จะได้เป็น

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(h_N + h_S) \{ [A_{KE}\phi_E \exp(\psi_K)] + [A_{KE}(-\phi_K) \exp(\psi_K)] \} \\ & + \frac{1}{2}(h_N + h_S) \{ [A_{KW}\phi_W \exp(\psi_K)] + [A_{KW}(-\phi_K) \exp(\psi_K)] \} \\ & + \frac{1}{2}(h_E + h_W) \{ [A_{KS}\phi_S \exp(\psi_K)] + [A_{KS}(-\phi_K) \exp(\psi_K)] \} \\ & + \frac{1}{2}(h_E + h_W) \{ [A_{KN}\phi_K \exp(\psi_K)] + [A_{KN}(-\phi_K) \exp(\psi_K)] \} = 0 \quad (\text{ค-29}) \end{aligned}$$

จัดรูปสมการ(ค-29)ใหม่จะได้

$$\begin{aligned}
 & (-\phi_K) \exp(\psi_K) \left[\frac{1}{2}(h_N + h_S)(A_{KE} + A_{KW}) + \frac{1}{2}(h_E + h_W)(A_{KN} + A_{KS}) \right] \\
 & + \frac{1}{2}(h_N + h_S)[A_{KE}\phi_E \exp(\psi_K) + A_{KW}\phi_W \exp(\psi_K)] \} \\
 & + \frac{1}{2}(h_E + h_W)[A_{KS}\phi_S \exp(\psi_K) + A_{KN}\phi_N \exp(\psi_K)] \} = 0
 \end{aligned} \tag{ค-30}$$

เมื่อ $n = (-\Phi)\exp(\Psi)$ และให้ $\beta_{KL} = (\phi_K - \phi_L)$

แทนลงในสมการ(ค-30) จะสมการใหม่เป็น

$$\begin{aligned}
 & n_K \left[\frac{1}{2}(h_N + h_S)(A_{KE} + A_{KW}) + \frac{1}{2}(h_E + h_W)(A_{KN} + A_{KS}) \right] \\
 & - \frac{1}{2}(h_N + h_S)[A_{KE}n_E \exp(\beta_{KE}) + A_{KW}n_W \exp(\beta_{KE})] \} \\
 & - \frac{1}{2}(h_E + h_W)[A_{KN}n_N \exp(\beta_{KN}) + A_{KS}n_S \exp(\beta_{KS})] \} = 0
 \end{aligned} \tag{ค-32}$$

ซึ่งสมการ(ค-32)จะเหมือนกับ ที่ Tantraporn เสนอไว้ใน [10]

3) ดิฟเฟอเรนเชียลสมการความความต่อเนื่องที่ขึ้นกับเวลา ใช้วิธีการที่เสนอโดย Slotboom

โดยจะพิจารณาสมการความความต่อเนื่องสำหรับโหนดที่ขึ้นกับเวลา จากสมการ (1) และ ผ่านการนอร์มาไลซ์ แล้วคือ

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{J}_p + \frac{\partial p}{\partial t} = -R$$

จากสมการที่ (ค-6) จัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$\bar{\nabla} \bullet \bar{J}_p = \frac{(J_{KE} - J_{WK})}{\left(\frac{h_E + h_W}{2}\right)} + \frac{(J_{KS} - J_{NK})}{\left(\frac{h_N + h_S}{2}\right)} \quad (\text{ค-33})$$

เมื่อองค์ประกอบของสมการความหนาแน่นกระแสสำหรับโพล โดยจัดสมการตามสัญลักษณ์ในรูปที่ ค-2 มีสมการดังนี้

$$J_{KS} = -A_{KS}(\phi_S - \phi_K) \exp(-\psi_K) \quad (\text{ค-34})$$

$$J_{NK} = -J_{KN} = A_{KN}(\phi_N - \phi_K) \exp(-\psi_K) \quad (\text{ค-35})$$

$$J_{KE} = -A_{KE}(\phi_E - \phi_K) \exp(-\psi_K) \quad (\text{ค-36})$$

$$J_{WK} = -J_{KW} = A_{KW}(\phi_W - \phi_K) \exp(-\psi_K) \quad (\text{ค-37})$$

เมื่อแทนจากสมการ(ค-34) - (ค-37) ลงในสมการ(ค-33) จะได้

$$\begin{aligned} \bar{\nabla} \bullet \bar{J}_p &= \\ &= \frac{1}{2(h_E + h_W)} [-A_{KE}(\phi_E - \phi_K) \exp(-\psi_K) - A_{KW}(\phi_W - \phi_K) \exp(-\psi_K)] \\ &+ \frac{1}{2(h_N + h_S)} [-A_{KS}(\phi_S - \phi_K) \exp(-\psi_K) - A_{KN}(\phi_N - \phi_K) \exp(-\psi_K)] \\ &= \frac{1}{2(h_E + h_W)} [A_{KE}(-\phi_K) \exp(-\psi_K) - A_{KE}(\phi_E) \exp(-\psi_K)] \\ &+ \frac{1}{2(h_E + h_W)} [A_{KW}(-\phi_K) \exp(-\psi_K) - A_{KW}(\phi_W) \exp(-\psi_K)] \\ &+ \frac{1}{2(h_N + h_S)} [A_{KS}(-\phi_K) \exp(-\psi_K) - A_{KS}(\phi_S) \exp(-\psi_K)] \\ &+ \frac{1}{2(h_N + h_S)} [A_{KN}(-\phi_K) \exp(-\psi_K) - A_{KN}(\phi_N) \exp(-\psi_K)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= p_K \left\{ \frac{1}{2(h_E + h_W)} (A_{KE} + A_{KW}) + \frac{1}{2(h_N + h_S)} (A_{KN} + A_{KS}) \right\} \\
&+ \frac{1}{2(h_E + h_W)} [-A_{KE} \phi_E \exp(-\psi_K) - A_{KW} \phi_W \exp(-\psi_K)] \\
&+ \frac{1}{2(h_N + h_S)} [-A_{KS} \phi_S \exp(-\psi_K) - A_{KN} \phi_N \exp(-\psi_K)] \\
&= p_K \left\{ \frac{1}{2(h_E + h_W)} (A_{KE} + A_{KW}) + \frac{1}{2(h_N + h_S)} (A_{KN} + A_{KS}) \right\} \\
&+ \frac{1}{2(h_E + h_W)} [-A_{KE} P_E \exp(\psi_E - \psi_K) - A_{KW} P_W \exp(\psi_W - \psi_K)] \\
&+ \frac{1}{2(h_N + h_S)} [-A_{KS} P_S \exp(\psi_S - \psi_K) - A_{KN} P_N \exp(\psi_N - \psi_K)] \\
&= \left\{ \frac{1}{2(h_E + h_W)} (A_{KE} + A_{KW}) + \frac{1}{2(h_N + h_S)} (A_{KN} + A_{KS}) \right\} p_K \\
&+ \frac{1}{2(h_E + h_W)} [-A_{KE} \exp(\psi_E - \psi_K)] P_E \\
&+ \frac{1}{2(h_E + h_W)} [-A_{KW} \exp(\psi_W - \psi_K)] P_W \\
&+ \frac{1}{2(h_N + h_S)} [-A_{KS} \exp(\psi_S - \psi_K)] P_S \\
&+ \frac{1}{2(h_N + h_S)} [-A_{KN} \exp(\psi_N - \psi_K)] P_N \tag{ค-38}
\end{aligned}$$

เขียน สมการ(ค-38) ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะได้

$$\overline{\nabla} \bullet \overline{J_p} = AP \tag{ค-39}$$

จะได้สมการความต่อเนื่องสำหรับโพลที่ขึ้นต่อเวลาเป็น

$$AP + \frac{\partial p}{\partial t} = -R \quad (\text{ค-40})$$

เมื่อใช้วิธีของ Crank-Nicolson [10] จะได้

$$\frac{1}{2} [A^{(m+1)} P^{(m+1)} + A^{(m)} P^{(m)}] + \frac{1}{\Delta t} [P^{(m+1)} - P^{(m)}] = -R \quad (\text{ค-41})$$

และสมการ (ค.32) สามารถเขียนสมการ(ค-41) ได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{(J_{KE}^p - J_{WK}^p)}{(\frac{h_E + h_W}{2})} + \frac{(J_{KS}^p - J_{NK}^p)}{(\frac{h_N + h_S}{2})} \right]^{(m+1)} + \left[\frac{(J_{KE}^p - J_{WK}^p)}{(\frac{h_E + h_W}{2})} + \frac{(J_{KS}^p - J_{NK}^p)}{(\frac{h_N + h_S}{2})} \right]^{(m)} \right\} \\ & + \frac{1}{\Delta t} [P^{(m+1)} - P^{(m)}] = -R \end{aligned} \quad (\text{ค-42})$$

จากสมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนที่ขึ้นกับเวลา ในสมการ (2) ที่ผ่านการนอร์มาไลซ์แล้วคือ

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{J}_n - \frac{\partial n}{\partial t} = R$$

ในทำนองเดียวกัน สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนที่ขึ้นต่อเวลาสามารถเขียนได้

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{(J_{KE}^n - J_{WK}^n)}{(\frac{h_E + h_W}{2})} + \frac{(J_{KS}^n - J_{NK}^n)}{(\frac{h_N + h_S}{2})} \right]^{(m+1)} + \left[\frac{(J_{KE}^n - J_{WK}^n)}{(\frac{h_E + h_W}{2})} + \frac{(J_{KS}^n - J_{NK}^n)}{(\frac{h_N + h_S}{2})} \right]^{(m)} \right\} \\ & - \frac{1}{\Delta t} [n^{(m+1)} - n^{(m)}] = R \end{aligned} \quad (\text{ค-43})$$

โดยที่ $m+1$ คือ รอบการทำซ้ำในรอบปัจจุบัน

m คือ รอบการทำซ้ำในรอบก่อน

ภาคผนวก ง
ค่าของตัวแปรในการจำลองแบบสำหรับ Si

ค่าของตัวแปรในการจำลองแบบสำหรับ Si

q	$1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$
ϵ_0	$8.854187817 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$
ϵ_r	11.7
k	$1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
T	300 K
n_i	$1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
τ	$1 \times 10^{-4} \text{ s}$

ภาคผนวก จ
ประเภทของกริด

ประเภทของกริด



Type 0



Type 1



Type 12



Type 121



Type 122



Type 123



Type 124



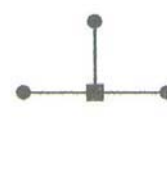
Type 2



Type 23



Type 3



Type 34



Type 4



Type 41



Type 341



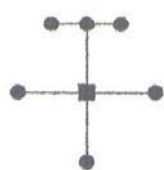
Type 342



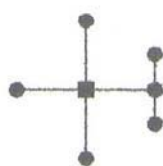
Type 343



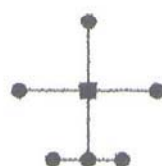
Type 344



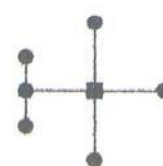
Type -11



Type -12



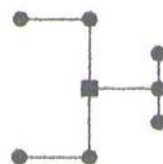
Type -13



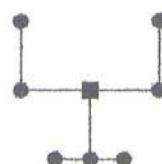
Type -14



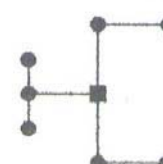
Type -21



Type -22



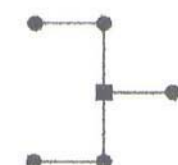
Type -23



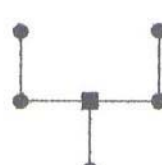
Type -24



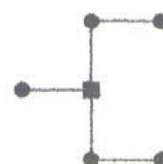
Type -31



Type -32



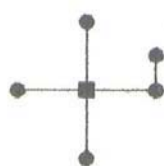
Type -33



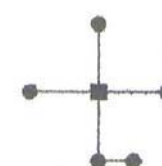
Type -34



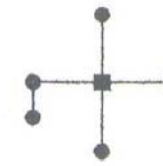
Type -41



Type -42



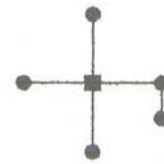
Type -43



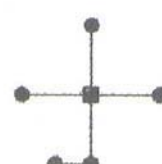
Type -44



Type -51



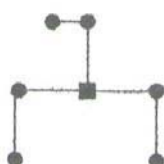
Type -52



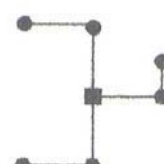
Type -53



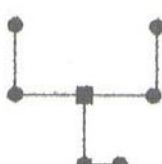
Type -54



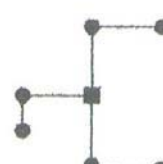
Type -61



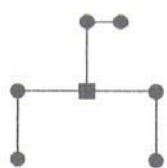
Type -62



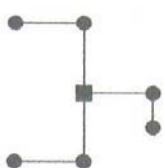
Type -63



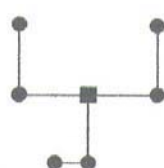
Type -64



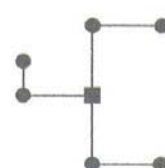
Type -71



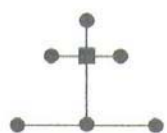
Type -72



Type -73



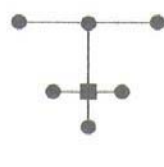
Type -74



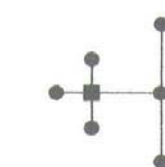
Type -81



Type -82



Type -83



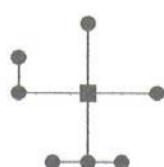
Type -84



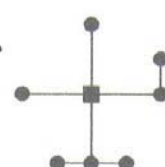
Type -101



Type -102



Type -103



Type -104



Type -801



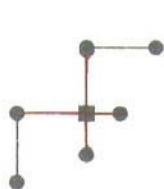
Type -802



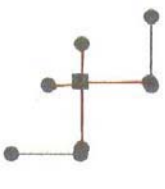
Type -803



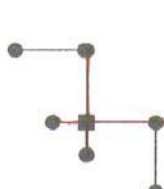
Type -804



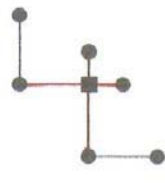
Type -901



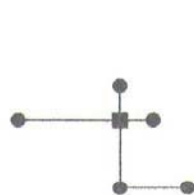
Type -902



Type -903



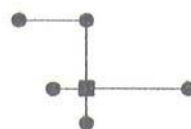
Type -904



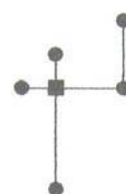
type - 711



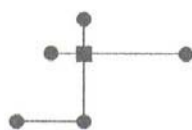
Type -712



Type -713



Type -714



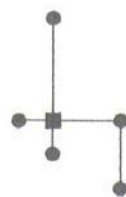
Type -721



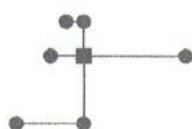
Type -722



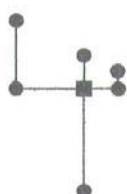
Type -723



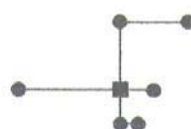
Type -724



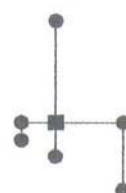
Type -741



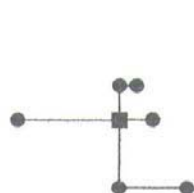
Type -742



Type -743



Type -744



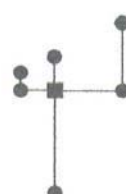
Type -751



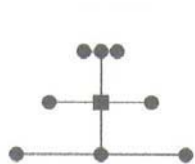
Type -752



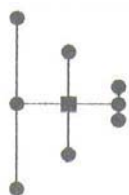
Type -753



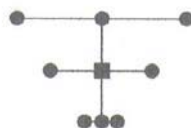
Type -754



Type -881



Type -882



Type -883



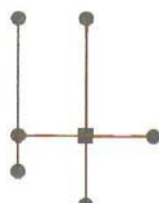
Type -884



Type -8801



Type -8802



Type -8803



Type -8804



Type -911



Type -912



Type -913



Type -914



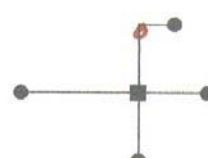
Type -921



Type -922



Type -923



Type -924

ประวัติผู้เขียน

นายเชษฐา รัตนพันธ์ เกิดเมื่อ 11 มิถุนายน 2519

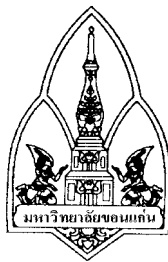
สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนบ้านโคกตาล ต.โคกตาล อ.กุฉินท จ.ศรีสะเกษ ในปี 2532

สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนปรีอใหญ่วิทยาลักษณ์ ต.ปรีอใหญ่ อ.ขุนศรี จ.ศรีสะเกษ ในปี 2535

สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย อ.เมือง จ.ศรีสะเกษ ในปี 2538

สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์) ในปี 2542

เข้าศึกษาในระดับปริญญาโท ในมหาวิทยาลัยขอนแก่น (สาขาฟิสิกส์ คณะบัณฑิตวิทยาลัย) ในปี 2542 และในระหว่างศึกษา เป็นผู้ช่วยวิจัย (ทำงานนอกเวลา) ในโครงการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบกลับแสงตัวใน 2 มิติ ซึ่งเป็นโครงการที่สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้ให้การสนับสนุนและให้ทุนวิจัยแก่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น มี ผศ.บำรุง สมสวัสดิ์ เป็นหัวหน้าโครงการ โดยโครงการดังกล่าวเป็นโครงการย่อยใน ชุดโครงการพัฒนาเซลล์แสงแดดไทย ของ สกว.



**การศึกษาและสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่า Generation rate(G) และ
Recombination rate(R) สำหรับเซลล์สุริยะที่ทำจากซิลิกอน
STUDY AND MODELING OF GENERATION RATE(G) AND
RECOMBINATION RATE(R) FOR Si SOLAR CELLS**

นายอนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์

**วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น**

พ.ศ.2545

ISBN 974-668-760-3

**การศึกษาและสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่า Generation rate(G) และ
Recombination rate(R) สำหรับเซลล์สุริยะที่ทำจากซิลิกอน**

นายอนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ.2545
ISBN 974-668-760-3

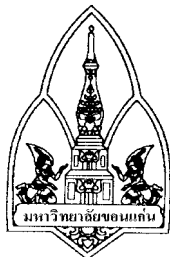
**STUDY AND MODELING OF GENERATION RATE(G) AND
RECOMBINATION RATE(R) FOR Si SOLAR CELLS**

MR. ANUSORN SRITHEERAVIROCH

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLAMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN PHYSICS
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY**

2002

ISBN 974-668-760-3



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่า Generation rate(G)
และ Recombination rate(R) สำหรับเซลล์สุริยะที่ทำจากซิลิกอน
ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์ นายอนุสรณ์ ศรีธีระวีโรจน์
คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บำรุง สมสวัสดิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สยาม ชูถิ่น)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมหมาย ปรีเปรม)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันชัย สุ่มเล็ก)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สำเร็จการศึกษาเมื่อวันที่
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์. 2545. การศึกษาและสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่า Generation rate(G)
และ Recombination rate(R) สำหรับเซลล์สุริยะที่ทำจากซิลิกอน.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. [ISBN 974-668-760-3]
คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง,
ผศ. บำรุง สมสวัสดิ์,
ผศ. สยาม ชูถิ่น

บทคัดย่อ

ได้สร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Light Generation Rate)และอัตรา
การรวมตัวของพาหะ(Recombination Rate)ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญส่วนหนึ่งสำหรับการทำงานของเซลล์
แสงอาทิตย์(Solar Cell) เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบคลับแซนวิช
(Club Sandwich Solar Cell)ต่อไป อัตราการเกิดของพาหะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Absorption
Coefficient)ของสารกึ่งตัวนำ จำนวนโฟตอนที่มาตกกระทบ(Photon Flux) อัตราการสะท้อนกลับที่ผิว
(Reflectivity) และความลึกจากผิวของสารกึ่งตัวนำ อัตราการรวมตัวของพาหะขึ้นอยู่กับ 2 กระบวนการหลัก
ได้แก่ กระบวนการแบบ SRH (Shockley-Read-Hall Recombination) และกระบวนการแบบอเจอร์(Auger
Recombination) และผลของความหนาแน่นและชนิดของสารเจือปนในวัสดุนั้น

จากผลการจำลองแบบ พบว่า สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน(Silicon) ที่มวล
อากาศ(Air Mass) AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงที่ผิวของสารกึ่งตัว
นำมีค่า 1.04912×10^{22} , 4.17650×10^{21} , 2.56377×10^{21} และ $2.27795 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ ที่
ความลึกจากผิว $100 \text{ }\mu\text{m}$ อัตราการเกิดของพาหะมีค่าลดลงแบบฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล(Exponential
Function)ตามระยะทางจากผิวของสารกึ่งตัวนำ โดยลดลงเหลือ 1.76688×10^{18} , 1.18109×10^{18} ,
 1.12686×10^{18} และ $1.04482 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 ตามลำดับ และที่ความลึก
มากกว่า $100 \text{ }\mu\text{m}$ อัตราการเกิดของพาหะจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางตามความลึก สำหรับอัตราการเกิดของ
พาหะรวม(Total Generation Rate) เมื่อความลึกจากผิว $0.01 \text{ }\mu\text{m}$ ที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 อัตรา
การเกิดของพาหะรวมมีค่า 1.161×10^{16} , 4.665×10^{15} , 3.599×10^{15} และ $3.229 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ
และที่ความลึกมากกว่า $20 \text{ }\mu\text{m}$ อัตราการเกิดของพาหะรวมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยมีค่า
 2.59111×10^{17} , 1.87270×10^{17} , 1.80312×10^{17} และ $1.60127 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ที่ AM0, AM1, AM1.5
และ AM2 ตามลำดับ

กระบวนการรวมตัวกันของพาหะแบบ SRH จะเกิดขึ้นมากเมื่อมีความหนาแน่นของการโด๊ปพาหะข้างมาก
น้อยกว่า 10^{17} cm^{-3} หรือเมื่อมีระดับการฉีดพาหะ(injection level)มีค่าน้อยกว่า 0.001 สำหรับกระบวนการ
แบบอเจอร์จะเกิดขึ้นมากเมื่อมีการโด๊ปพาหะมากกว่า 10^{17} cm^{-3} หรือมีระดับการฉีดพาหะมากกว่า 100
สำหรับอัตราการรวมตัวของพาหะจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ(carrier density)และเวลาอายุของพาหะ
(carrier lifetime) เมื่อมีระดับการฉีดพาหะน้อยๆและระดับพลังงานเฟอร์มิ(Fermi level)อยู่บริเวณกึ่งกลาง
ช่องว่างพลังงาน(0.56 eV)เวลาอายุของพาหะมีค่ามากที่สุด เมื่อมีระดับการฉีดพาหะสูงๆและระดับพลังงาน
เฟอร์มิ(Fermi level)อยู่ระหว่าง 0.3-1.0 eV เวลาอายุของพาหะในสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด(τ_n และ τ_p)มีค่า
เท่ากัน

ระดับพลังงานของสารเจือปน(impurity energy level)มีผลต่อเวลาอายุของพาหะคือ สำหรับกระบวนการรวมตัวแบบ SRH เมื่อมีระดับการฉีดพาหะน้อย ๆ เวลาอายุของพาหะจะมีค่าน้อยที่สุดสำหรับสารเจือปนที่มีระดับพลังงานอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน เมื่อมีระดับการฉีดพาหะมาก ๆ เวลาอายุของพาหะจะมีค่าเท่ากันสำหรับสารเจือปนทุกชนิด สำหรับกระบวนการรวมตัวแบบอเจอร์ เมื่อมีระดับการฉีดพาหะมากขึ้น เวลาอายุของพาหะจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว

ความหนาแน่นของสารเจือปน(impurity density)มีผลต่อเวลาอายุของพาหะเฉพาะในกระบวนการรวมตัวแบบ SRH เท่านั้น คือ เมื่อความหนาแน่นของสารเจือปน ความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน(excess carrier density) และความหนาแน่นของการโด๊ป(doping density) มีค่ามากขึ้น เวลาอายุของพาหะจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ

Anusorn Sritheeraviroch. 2002. **Study and Modeling of Generation Rate(G) and Recombination Rate(R) for Si Solar Cells**. Master of Science Thesis in Physics, Graduate School, Khon Kaen University. [ISBN 974-668-760-3]

Thesis Advisory Committee : Asst.Prof.Dr. Vitthaya Amornkitbamrung,
Asst.Prof. Bamrung Somsawaddi,
Asst.Prof. Siam Chootin

Abstract

A model for calculating the light generation (G) and recombination (R) rates of charge carrier have been constructed. Generation and recombination rates are two important parameters to be used in the simulation of “Club Sandwich Solar Cell”. Generation rates depend on the absorption coefficient of the materials, the photon flux, the reflectivity and the depth from the semiconductor surface. Recombination rates depend on the two major processes, namely Shockley-Read-Hall (SRH) and Auger, and the density and types of the impurity in the materials.

From the model, generation rates at the surface of Si solar cells under the condition of AM0, AM1, AM1.5 and AM2 are 1.04912×10^{22} , 4.17650×10^{21} , 2.56377×10^{21} and $2.27795 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$, respectively. As a function of depth, the generation rate decreases as an exponential function of distance from the semiconductor surface such that at 100 μm its value are 1.76688×10^{18} , 1.18109×10^{18} , 1.12686×10^{18} and $1.04482 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ at AM0, AM1, AM1.5 and AM2, respectively. Beyond 100 μm depth, generation rates become almost constant. The total generation rates, at a depth from the surface of 0.01 μm are 1.161×10^{16} , 4.665×10^{15} , 3.599×10^{15} and $3.229 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ at AM0, AM1, AM1.5 and AM2, respectively. Beyond 20 μm depth, the total generation rates change very little and the rates are 2.59111×10^{17} , 1.87270×10^{17} , 1.80312×10^{17} and $1.60127 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ at AM0, AM1, AM1.5 and AM2, respectively.

The SRH process dominates when the doping concentration is less than 10^{17} cm^{-3} or when the injection level (η) is less than 0.001. The Auger process dominates when the doping concentration is greater than 10^{17} cm^{-3} or when the injection level is

greater than 100. The recombination rates depend on the majority carrier density and the carrier lifetime (τ). The carrier lifetime is highest at low levels of injection level and when the Fermi level is near the middle of the energy gap (0.56 eV). The carrier lifetimes (τ_n and τ_p) are equal in high injection levels and when the Fermi level is between 0.3-1.0 eV.

The carrier lifetime depends on the impurity energy level. With the SRH process the carrier lifetime is smallest when the injection level is low and when the impurity energy level is around the middle of energy gap and the carrier lifetime is constant when the injection level is high, whatever the impurity energy level. With the Auger process the carrier lifetime decays rapidly with increasing injection level.

The carrier lifetime is thus affected only by the SRH process, decreasing when any of the impurity density, the excess carrier density, or the doping density increases.

งานวิทยานิพนธ์นี้มอบส่วนดีให้บุพการีและคณาจารย์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “แบบจำลองการทำงานเซลล์สุริยะแบบคลับแซนวิชใน 2 มิติ” ซึ่งได้รับความสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(ส.ก.ว.)

ขอขอบคุณ ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ และ รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของ พะทะในเซลล์แสงอาทิตย์ และคำแนะนำในการปรับปรุงการคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะในแบบจำลองที่สร้างขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์, การค้นคว้าข้อมูล, คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ผศ. บำรุง สมสวัสดิ์ ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์, คำแนะนำและคำปรึกษาการใช้โปรแกรม Fortran90 ที่ทำงานบน Linux เพื่อสร้างแบบจำลองขึ้นมา

ขอขอบคุณ ผศ. สยาม ชูถิ่น ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
คำอุทิศ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 แบบจำลองอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงและอัตราการรวมตัวของพาหะ ในเซลล์แสงอาทิตย์	3
1.3 ส่วนประกอบของรายงาน	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 อัตราการเกิดของพาหะ	5
2.2 อัตราการรวมตัวของพาหะ	6
บทที่ 3 การเกิดของพาหะ	8
3.1 โฟตอนฟลักซ์(Photon flux)	8
3.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Light absorption coefficient)	10
3.3 การสะท้อนกลับ(Reflection)	17
3.4 อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Generation rate)	19
3.5 อัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้นและอัตราการเกิดของพาหะรวม	22
3.6 สรุป	23
บทที่ 4 การรวมตัวของพาหะ	24
4.1 กระบวนการรวมตัวกันของพาหะในสารกึ่งตัวนำ	24
4.2 อัตราการรวมตัวของพาหะ(Recombination rate)	47
4.3 สารเจือปน(Impurities)	48
4.4 สรุป	52
บทที่ 5 การสร้างแบบจำลอง	53
5.1 การสร้างแบบจำลองของอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง	53
5.2 การสร้างแบบจำลองของอัตราการรวมตัวของพาหะ	59
5.3 สรุป	63
บทที่ 6 ผลการจำลองแบบและวิเคราะห์ผล	64
6.1 การเกิดพาหะเนื่องจากแสง(Light generation of charge carriers)	64
6.2 การรวมตัวของพาหะ(Recombination of charge carriers)	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการจำลองแบบและข้อเสนอแนะ	113
7.1 การจำลองแบบของอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง	113
7.2 การจำลองแบบของอัตราการรวมตัวของพาหะ	114
7.3 ข้อเสนอแนะ	115
เอกสารอ้างอิง	117
ภาคผนวก	119
ภาคผนวก ก. การหาชุดสมการด้วยวิธีแบบ Cubic Spline Interpolation	120
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิกอนที่ 300 °K และโฟตอนฟลักซ์	124
ประวัติผู้เขียน	129

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ออร์เจอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	45
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าผลต่างต่ำสุดที่กำหนดขึ้นมาจากเลขนัยสำคัญ	56
ตารางที่ 6.1 แสดงปริมาณโฟตอนฟลักซ์ที่ AM ต่างๆ	67
ตารางที่ 6.2 แสดงผลการคำนวณค่า idevided จากการกำหนดเลขนัยสำคัญต่างๆ	69
ตารางที่ 6.3 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวบน	73
ตารางที่ 6.4 แสดงผลการคำนวณค่า idevided จากการกำหนดเลขนัยสำคัญต่างๆ	77
ตารางที่ 6.5 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมทั้งระดับความลึกต่างๆจากผิวบน	81
ตารางที่ 6.6 แสดงค่าระยะความลึกที่ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมเริ่มไม่เปลี่ยนแปลง ที่ AM ต่างๆ	82
ตารางที่ 6.7 แสดงค่าของตัวแปรต่างๆในชุดสมการ(3.77)สำหรับ $\tau_n(N_d)$	98
ตารางที่ 6.8 แสดงค่าของตัวแปรต่างๆในชุดสมการ(3.77)สำหรับ $\tau_p(N_d)$	98
ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิกอนที่ 300 °K และปริมาณโฟตอนฟลักซ์ที่ AM ต่างๆ	125

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	2
รูปที่ 2.1 แสดงสัญญาณของพาหะข้างน้อยที่วัดได้ในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี	6
รูปที่ 2.2 แสดงการรวมตัวของพาหะมากกว่าหนึ่งครั้ง	7
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพตัวแปรการคำนวณค่า Air Mass ในบรรยากาศของโลก	9
รูปที่ 3.2 แสดงการกระจายของพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ AM ต่าง ๆ	9
รูปที่ 3.3 แสดงการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ	10
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำกับสเปกตรัมแสง	11
รูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการเปลี่ยนสถานะชนิดต่าง ๆ ของอิเล็กตรอนในช่องแข็ง	12
รูปที่ 3.6 แสดงการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	12
รูปที่ 3.7 แสดงสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ	14
รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพพลังงาน-โมเมนตัมของสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบตรง	15
รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพพลังงาน-โมเมนตัมของสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบไม่ตรง	16
รูปที่ 3.10 แสดงการสะท้อนกลับที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ	17
รูปที่ 3.11 แสดงทางเดินแสงผ่านสารกึ่งตัวนำที่มีการเคลือบผิว	17
รูปที่ 3.12 แสดงอัตราการสะท้อนกลับที่ผิวต่าง ๆ	18
รูปที่ 3.13 แสดงผิวหน้าที่ถูกกัดเป็นรูปปิรามิดและทางเดินแสงที่มากตกกระทบ	19
รูปที่ 3.14 แสดงการผ่านเข้าไปในสารของความยาวคลื่นที่ต่างกัน	20
รูปที่ 3.15 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะตามระดับความลึก	21
รูปที่ 3.16 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการเก็บรวบรวมพาหะของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่ออันเดียวและหลายอัน	22
รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล	24
รูปที่ 4.2 แสดงกระบวนการรวมตัวกับแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงาน	25
รูปที่ 4.3 แสดงกระบวนการเกิดของพาหะและกระบวนการรวมตัวของพาหะ	28
รูปที่ 4.4 แสดงกระบวนการรวมตัวกันแบบบอเอเจอร์ของอิเล็กตรอนส่วนเกิน	29
รูปที่ 4.5 แสดงกระบวนการรวมตัวกันแบบผ่านแทรีปและสาเหตุการเกิดระดับพลังงานแทรีป	31
รูปที่ 4.6 แสดงกระบวนการรวมตัวแบบผ่านแทรีป	32
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาของพาหะกับระดับพลังงานเฟอร์มิในกระบวนการ SRH	37
รูปที่ 4.8 แสดงกระบวนการเกิดพาหะเนื่องจากแสงและการรวมตัวของพาหะ	38
รูปที่ 4.9 แสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นในช่องว่างพลังงานที่มีระดับพลังงานแทรีป	40
รูปที่ 4.10 แสดงค่าเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH	40
รูปที่ 4.11 แสดงค่าเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH กับพื้นที่ตัดขวางของศูนย์กลางจับพาหะ(η)	41
รูปที่ 4.12 แสดงเวลาอายุการรวมตัวของพาหะกับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก	42
รูปที่ 4.13 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีการโด๊ปสูง ๆ	43
รูปที่ 4.14 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีการโด๊ปสูง ๆ	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีการโด๊ปสูง ๆ	44
รูปที่ 4.16 แสดงกราฟสัมประสิทธิ์อรรถุณที่อุณหภูมิต่างๆ	46
รูปที่ 4.17 แสดงระดับพลังงานเฟอร์มิเมื่อมีการโด๊ปสูง ๆ ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	47
รูปที่ 4.18 แสดงระดับพลังงานสารเจือปนในซิลิกอน	48
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อยและระดับพลังงานสารเจือปน	48
รูปที่ 4.20 แสดงเวลาอายุการรวมตัวของพาหะข้างน้อยที่มีสารเจือปนหลักในซิลิกอน	49
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อยกับความเข้มข้นของสารเจือปนทอง	50
รูปที่ 4.22 แสดงการรวมตัวของพาหะที่ระดับพลังงานลึก	51
รูปที่ 4.23 แสดงค่าเวลาอายุการรวมตัวยังผลที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารเจือปน	51
รูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลอง “Club Sandwich Solar Cell”	54
รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนการหาค่า $\Delta\lambda$ ที่เหมาะสม	55
รูปที่ 5.3 แสดงขั้นตอนการหาค่าอัตราการเกิดของพาหะในแบบจำลองที่ตำแหน่งต่างๆ	56
รูปที่ 5.4 แสดงขั้นตอนการหาค่า ΔG_{sum} และ G_{sum} ในแบบจำลองที่ตำแหน่งต่างๆ	58
รูปที่ 5.5 แสดงขั้นตอนการหาค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะและอัตราการรวมตัวของพาหะจากทฤษฎี	60
รูปที่ 5.6 แสดงขั้นตอนการหาค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะและอัตราการรวมตัวของพาหะจากการทดลอง	62
รูปที่ 6.1 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM0	64
รูปที่ 6.2 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM1	65
รูปที่ 6.3 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM1.5	65
รูปที่ 6.4 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM2	66
รูปที่ 6.5 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM ต่างๆ	67
รูปที่ 6.6 แสดงสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของซิลิกอน ที่ AM0	68
รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_y กับจำนวนเลขนัยสำคัญ	69
รูปที่ 6.8 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในแต่ละความยาวคลื่น ที่ AM0	70
รูปที่ 6.9 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในแต่ละความยาวคลื่น ที่ AM0, AM1, AM1.5, และ AM2	70
รูปที่ 6.10 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้น ที่ AM0	71
รูปที่ 6.11 แสดงการเปรียบเทียบผลต่างของค่าอัตราการเกิดของพาหะในระดับความลึกต่างๆ ที่ AM0	72
รูปที่ 6.12 แสดงการเปรียบเทียบการลดลงของค่าอัตราการเกิดของพาหะที่ระดับความลึกต่างๆ	72
รูปที่ 6.13 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM0	74
รูปที่ 6.14 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะตามระดับความลึก	74
รูปที่ 6.15 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM1	75
รูปที่ 6.16 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM1.5	76
รูปที่ 6.17 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM2	76

รูปที่ 6.18 แสดงค่า ΔG_{sum} และ nofprecision	77
--	----

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.19 แสดงค่า ΔG_{sum} และ idevided	78
รูปที่ 6.20 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม ที่ AM0	79
รูปที่ 6.21 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม	80
รูปที่ 6.22 แสดงค่า ΔG_{sum} ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่ AM0	82
รูปที่ 6.23 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยในกระบวนการ SRH ที่ระดับพลังงานเฟอร์มีต่างๆ	84
รูปที่ 6.24 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยในกระบวนการ SRH ที่ระดับพลังงานของ สารเจือปนต่างๆ	85
รูปที่ 6.25 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มีต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t=0.56$ eV	86
รูปที่ 6.26 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มีต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t=0.84$ eV	87
รูปที่ 6.27 แสดงผลของการโด๊ปพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t=0.56$ eV	88
รูปที่ 6.28 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มีต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์	89
รูปที่ 6.29 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์	90
รูปที่ 6.30 แสดงผลของความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะใน กระบวนการออเจอร์	91
รูปที่ 6.31 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มีต่อเวลาอายุของพาหะรวม ที่ $E_t=0.56$ eV	92
รูปที่ 6.32 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มีต่อเวลาอายุของพาหะรวม ที่ $E_t=0.84$ eV	93
รูปที่ 6.33 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่อเวลาอายุของพาหะรวม	93
รูปที่ 6.34 แสดงผลของความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะรวม	94
รูปที่ 6.35 แสดงเวลาอายุการรวมตัวของพาหะกับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก	95
รูปที่ 6.36 แสดงความน่าจะเป็นที่จะเกิดการรวมตัวกันของพาหะที่บริเวณต่างๆ ของ ช่องว่างพลังงาน	96
รูปที่ 6.37 แสดงผลของพลังงานแตรัปที่มีต่อเวลาอายุการรวมตัวของพาหะเมื่อมีการโด๊ปน้อยๆ	96
รูปที่ 6.38 แสดง Fundamental-limit ของเวลาอายุของพาหะข้างน้อยใน nondegenerate silicon	97
รูปที่ 6.39 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $E_t=0.56$ eV	99
รูปที่ 6.40 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $p_0=10^{16}$ cm ⁻³	100
รูปที่ 6.41 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $N_t=10^{12}$ cm ⁻³	101
รูปที่ 6.42 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $E_t=0.56$ eV	102
รูปที่ 6.43 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์	103
รูปที่ 6.44 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์	103
รูปที่ 6.45 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์ ที่ $E_t=0.56$ eV	103

รูปที่ 6.46 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะรวม มี $E_t=0.56$ eV	104
รูปที่ 6.47 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะรวม มี $E_t=0.84$ eV	105

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.48 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่ออัตราการรวมตัวของพาหะรวม ที่ $p_0=10^{16}$ cm ⁻³	106
รูปที่ 6.49 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่ออัตราการรวมตัวของพาหะรวม ที่ $N_t=10^{12}$ cm ⁻³	107
รูปที่ 6.50 แสดงผลของความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่ออัตราการรวมตัวของพาหะรวม ที่ $E_t=0.56$ eV	108
รูปที่ 6.51 แสดงค่าอัตราการรวมตัวรวมของพาหะจากทฤษฎี มี $E_t=0.56$ eV	109
รูปที่ 6.52 แสดงค่าอัตราการรวมตัวรวมของพาหะจากทฤษฎี $E_t=0.84$ eV	109
รูปที่ 6.53 แสดงค่าอัตราการรวมตัวรวมของพาหะจากข้อมูลที่สืบค้น	110
รูปที่ 6.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อยและความหนาแน่นของ พาหะข้างมาก	111

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานที่มีใช้กันอยู่ทุกวันนี้ส่วนมากมาจากน้ำมัน ปริมาณการใช้พลังงานนั้นมีมากและมีราคาแพง นับวันแหล่งพลังงานดังกล่าวเริ่มจะลดน้อยลงไปทุกวันจนไม่เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นทุกขณะ จึงเกิดการขาดแคลนพลังงานขึ้น ซึ่งจะต้องมีการแสวงหาแหล่งพลังงานชนิดใหม่ขึ้นมาทดแทน เนื่องจากพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่มีมากตามธรรมชาติที่ได้มาฟรีๆและมีใช้ไปอีกนานแสนนาน พลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาด ไม่สร้างมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ไม่สร้างเสียงรบกวน จึงเป็นแหล่งพลังงานที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก จึงได้มีการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก(photovoltaic effect) สิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์(solar cell) หรือ เซลล์สุริยะ หรือ เซลล์แสงแดด ซึ่งทำมาจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน(silicon), เจอร์มาเนียม(germanium), แกลเลียมอาร์เซไนด์(gallium arsenide) เป็นต้น โดยสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อพีเอ็น(p-n junction semiconductor)เป็นโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ส่วนวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกและมีมากในเปลือกโลกคือ ซิลิกอน ซึ่งถลุงได้จากแร่ควอตไซต์หรือทราย ผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์จนเป็นผลึก แต่เนื่องจากในปัจจุบันต้นทุนการผลิตยังสูง ปริมาณการใช้โดยทั่วไปยังไม่แพร่หลาย ต่อไปในอนาคตจะมีความต้องการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ในปัจจุบันยังมีราคาแพงมาก

การศึกษาการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการสร้างแบบจำลองขึ้นมามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เมื่อมีแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว เราสามารถที่จะหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด ก่อนที่จะผลิตจริงต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านการลดต้นทุนการผลิตจริงและลดความเสี่ยงวัสดุในการผลิตอีกด้วย สำหรับแบบจำลองที่ใช้จะเป็นแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพีเอ็นสลับกันหลายๆชั้น เรียกว่า “แบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบคลับแซนวิช” (Club Sandwich Solar Cell) [1]

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีสมการที่อธิบายพฤติกรรมของพาหะในสารกึ่งตัวนำอยู่ 3 ชุด คือ

1. Poisson's equation

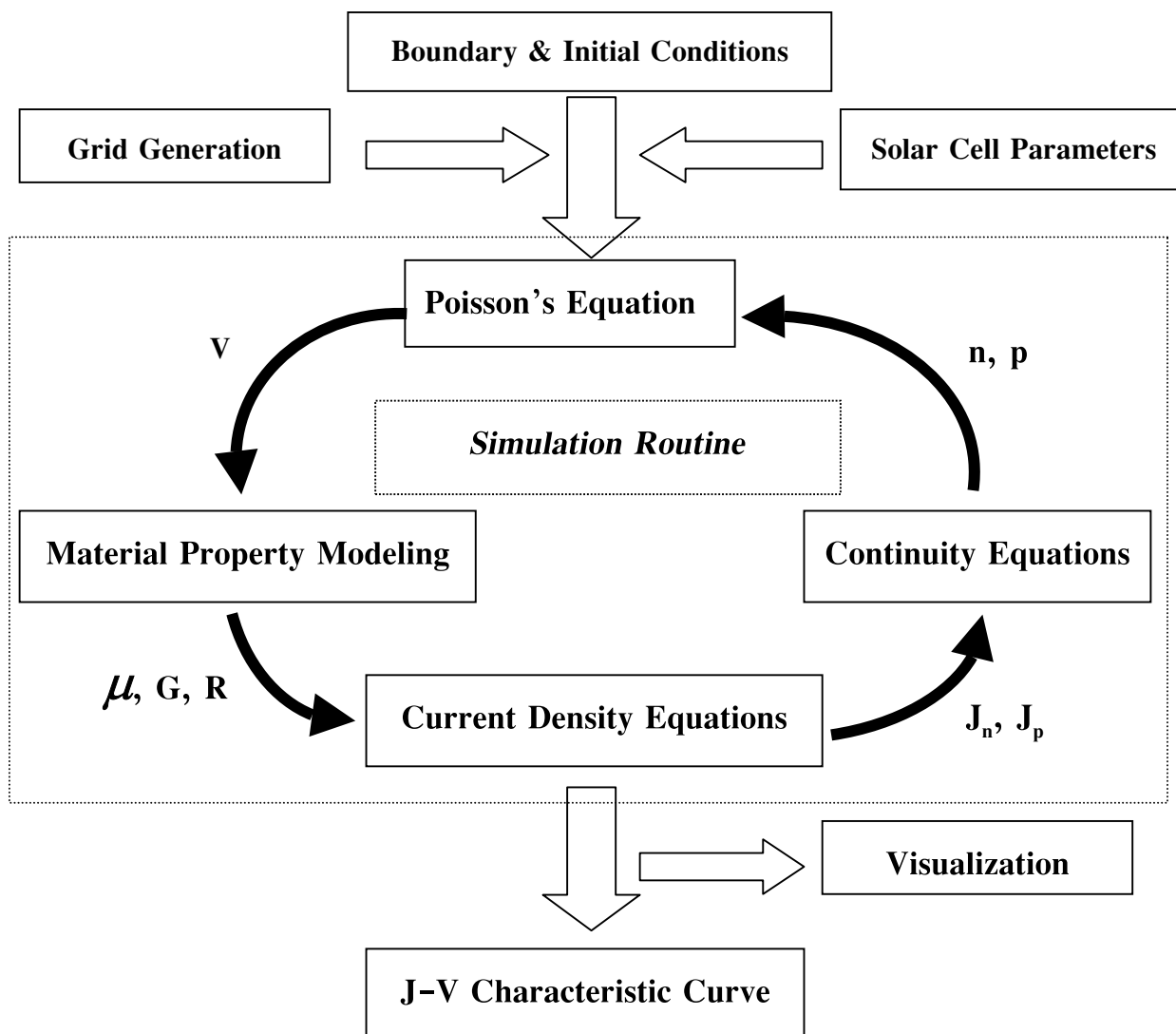
$$\nabla^2 \psi = -\frac{q}{\epsilon} (p - n + n_0 - p_0)$$

2. Current density equations

$$\begin{aligned} J_n &= -q (\mu_n n \nabla \psi - D_n \nabla n) \\ J_p &= -q (\mu_p p \nabla \psi + D_p \nabla p) \end{aligned}$$

3. Continuity equations

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n}{q} + G_n - R_n \\ \frac{dp}{dt} &= -\frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p}{q} + G_p - R_p \end{aligned}$$



รูปที่ 1.1 แสดงแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

สมการทั้ง 3 ชุดจะทำงานร่วมกันเพื่อหาผลเฉลยโดยวิธีการทางตัวเลข(numerical solution) ทั้งนี้จะต้องใส่พารามิเตอร์ต่างๆเช่น bias voltage(V), mobility(μ), diffusivity(D), doping profile(n_0 , p_0), generation rate(G) และ recombination rate(R) เป็นต้น เข้าไปในแบบจำลอง การทำงานร่วมกันของส่วนต่างๆนี้ แสดงไว้ดังรูปที่ 1.1 จะต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขต(boundary conditions)และเงื่อนไขเริ่มต้น(initial conditions)ให้กับสมการทั้ง 3 ชุดที่จะทำงานร่วมกัน

Poisson's equation จะอธิบายพฤติกรรมของความแตกต่างของความหนาแน่นของพาหะระหว่างบริเวณใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างตำแหน่งนั้น Current density equations จะอธิบายการไหลของพาหะจากที่ที่มีความหนาแน่นของพาหะสูงไปยังที่ที่มีความหนาแน่นของพาหะต่ำ เนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่าง 2 บริเวณนั้น Continuity equations จะอธิบายการจัดการให้สภาวะในแต่ละแห่งเข้าสู่สมดุล กล่าวคือความหนาแน่นของกระแสที่ไหลเข้าและไหลออกจุดหนึ่งจะต้องเท่ากันและความหนาแน่นของพาหะที่จุดหนึ่งจะ

ต้องคงที่ เมื่อยังมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะอยู่ก็จะทำให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ วนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาพคงที่ (steady state) ซึ่งหมายความว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะต่อหนึ่งหน่วยเวลา (dn/dt , dp/dt) มีค่าน้อย ๆ เพื่อจะได้ข้อมูลของความหนาแน่นของกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ใช้ออกมาเป็นกราฟของ J-V characteristic ต่อไป

สำหรับพารามิเตอร์ G เรียกว่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง (Light generation rate) หรืออาจเรียกว่าอัตราการเกิดของพาหะ (Generation rate) และพารามิเตอร์ R เรียกว่าอัตราการรวมตัวของพาหะ (Recombination rate) เข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งค่า G และ R นี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญส่วนหนึ่งในแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาการเกิดของพาหะและการรวมตัวของพาหะตามกระบวนการพื้นฐานที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้ทราบพฤติกรรมของพาหะและสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น

1.2 แบบจำลองอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงและอัตราการรวมตัวของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์

แบบจำลองอัตราการเกิดของพาหะจะคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นในบริเวณต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ตั้งแต่บริเวณผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ไปถึงบริเวณที่อยู่ลึกลงไปภายในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคำนวณจากข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการสืบค้น เช่น สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient หรือ α), จำนวนโฟตอนที่มาตกกระทบ (photon flux หรือ F), อัตราการสะท้อนกลับที่ผิว (reflectivity หรือ r) เป็นต้น แล้วเก็บข้อมูลของบริเวณต่าง ๆ ไว้เพื่อใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป ส่วนแบบจำลองอัตราการรวมตัวของพาหะจะคำนวณค่าอัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์ดังกล่าวจะเป็นข้อมูลที่สำคัญส่วนหนึ่งที่จะใส่เข้าไปในแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกัน การสร้างแบบจำลองทั้งสองนี้ขึ้นมาจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นต่อไป

เมื่อมีการค้นพบสารกึ่งตัวนำตัวใหม่ที่มีคุณสมบัติใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ก็จะใช้แบบจำลองนี้เตรียมข้อมูลและคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะและค่าอัตราการรวมตัวของพาหะป้อนเข้าสู่แบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพก่อนที่จะลงมือผลิตออกมา

เนื่องจากที่ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น นอกบรรยากาศโลก หรือบนพื้นโลกที่ดวงอาทิตย์ทำมุมต่าง ๆ กัน เป็นต้น จะมีความเข้มแสงแตกต่างกันออกไป จึงต้องเตรียมข้อมูลค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงในแบบจำลองที่ค่ามวลอากาศ (Air Mass) ต่าง ๆ เช่น AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 เป็นต้น

1.3 ส่วนประกอบของรายงาน

ในรายงาน จะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

บทที่ 2 จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าอัตราการเกิดของพาหะและค่าอัตราการรวมตัวของพาหะที่ได้ตีพิมพ์ลงในวารสารต่าง ๆ และในหนังสือต่าง ๆ

บทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีของอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนโฟตอนที่มาตกกระทบที่ความเข้มแสงต่าง ๆ, สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในที่นี้คือซิลิกอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง, อัตราการสะท้อนกลับที่ผิวด้านหน้าของสาร, และความลึกจากผิวบนลงไปในสาร

บทที่ 4 จะกล่าวถึงทฤษฎีของอัตราการรวมตัวของพาหะและเวลาอายุของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรงและแบบไม่ตรง สำหรับซิลิกอนจะมีกระบวนการรวมตัวของพาหะที่สำคัญคือกระบวนการแบบ SRH และกระบวนการรวมตัวของพาหะแบบออเจอร์

บทที่ 5 จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะและค่าอัตราการรวมตัวของพาหะ โดยจะใช้สมการโพลีโนเมียลที่ได้จากการเตรียมข้อมูลโดยวิธี Spline Interpolation มาคำนวณ

บทที่ 6 จะกล่าวถึงผลการจำลองแบบและวิเคราะห์ผล จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์

บทที่ 7 จะกล่าวถึงบทสรุปของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาและข้อเสนอแนะที่ได้จากการสร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อเป็นการเตรียมข้อมูลสำหรับการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ใน “แบบจำลองคลับแซนวิช” ต่อไป

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้ จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ส่วนคือ

2.1 อัตราการเกิดของพาหะ

2.2 อัตราการรวมตัวของพาหะ

2.1 อัตราการเกิดของพาหะ

อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Generation rate)ที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำมาจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือ โฟตอนฟลักซ์(Photon flux), สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Light absorption coefficient), อัตราการสะท้อนกลับ(Reflectivity) และความลึก(depth)จากผิวบนลงไปใต้อันฐาน

Jerry G. Fossum ได้คำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงสำหรับซิลิกอนที่ AM0 อุณหภูมิ 300 °K เป็นตารางข้อมูลไว้ด้วย [5] โดยที่ผิวจะมีค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง $2.12 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่ความลึกจากผิว 100 μm มีค่า $1.63 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงมีค่าลดลงประมาณ 10,000 เท่า

Kasturi Lal Chopra, และ Suhit Ranjan Das ได้รวบรวมค่าโฟตอนฟลักซ์ในแต่ละความยาวคลื่นไว้ในหนังสือ Thin Film Solar Cells [2] ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่จะใช้ในรูปแบบจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงที่จะกล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป จะประกอบไปด้วยค่าโฟตอนฟลักซ์ที่ค่ามวลอากาศ(Air Mass) ต่าง ๆ คือ AM0, AM1, AM1.5, และ AM2 เป็นต้น

Ahmed S. Bouazzi, Mohamed Abaab, และ Bahri Rezig [3] ได้ใช้ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเพื่อคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบจำลอง Buried Emitter Solar Cell (BESC) ซึ่งมีโครงสร้างแบบรอยต่อพีเอ็นหลาย ๆ ชั้น ได้ความหนาแน่นของกระแส(photo current)มากกว่ารอยต่อแบบพีเอ็นธรรมดา(classical pn junction) 34.52%

การลดอัตราการสะท้อนกลับที่ผิวเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดของพาหะ โดยการเคลือบสารป้องกันการสะท้อนกลับ SnO_2 ลงบนผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกกัด(textured)ออกเป็นรูปปิรามิด(pyramid) สามารถลดอัตราการสะท้อนกลับให้เหลือน้อยกว่า 2 % เมื่อเทียบกับการกัดผิวแต่ไม่เคลือบสาร SnO_2 , การขัดผิวและเคลือบสาร SnO_2 , และการขัดผิวแต่ไม่เคลือบสาร SnO_2 ปรากฏว่า มีอัตราการสะท้อนกลับ 10-15, 2-50, และ 30-60 % ตามลำดับ [4]

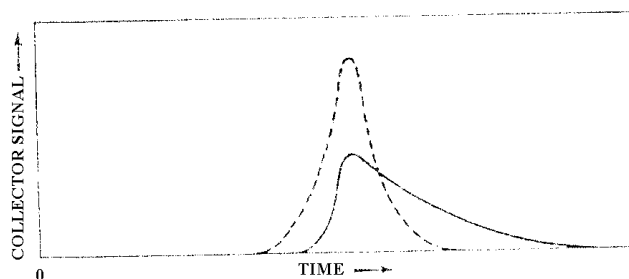
Jerry G. Fossum ได้คำนวณประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมพาหะ(collection efficiency)เนื่องจากค่าอัตราการเกิดของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนา L พบว่า สำหรับซิลิกอนที่ AM0 อุณหภูมิ 300 °K เมื่อเซลล์มีความหนา 300 μm ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมพาหะจะมากกว่า 98% ถ้าไม่คิดอัตราการสะท้อนกลับที่ผิวและอัตราการรวมตัวของพาหะ

2.2 อัตราการรวมตัวของพาหะ

R.N. Hall [6], W.Shockley, และ W.T. Read [7] ได้เสนอทฤษฎีพื้นฐานของกระบวนการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอนและโฮล(electron-hole pair recombination)แบบผ่านระดับพลังงานของสารเจือปนที่เกิดขึ้นในช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการรวมตัวแบบผ่านแตรป(Recombination through traps) หรือเรียกว่า กระบวนการ SRH (Shockley-Read-Hall recombination) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง(indirect semiconductor) พารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการนี้คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี(Fermi level), ระดับพลังงานของสารเจือปน(impurity energy level), ความหนาแน่นของสารเจือปน(impurity density), ความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน(excess carrier density) และความหนาแน่นของการโด๊ป(doping density)

G. Bemki ได้ทำการทดลองวัดค่าเวลาอายุของพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอน(minority carrier lifetime)ในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี(P-type Silicon) พบว่า สำหรับการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH ที่มีระดับของศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะ(recombination center)อยู่ห่างจากแถบวาเลนซ์(valence band) 0.2 eV จะมีเวลาอายุของพาหะข้างน้อยเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย(minority carrier density)และอุณหภูมิ(Temperature) [8]

นอกจากนี้ยังมีการพบว่า พาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่ถูกทำให้เป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพีนั้น จะถูกดักจับไว้ในระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะถูกปล่อยออกมา โดยพาหะข้างน้อยจะถูกดักจับไว้ในระดับพลังงานชั่วคราวที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารเจือปน(impurities) ประมาณ 10 วินาที ซึ่งอยู่ในช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และสัญญาณที่วัดได้ดังรูปที่ 2.1 แสดงว่าสัญญาณของพาหะข้างน้อยมีการถูกหน่วง(delay)ไว้ ก่อนถูกปล่อยออกมา [9]

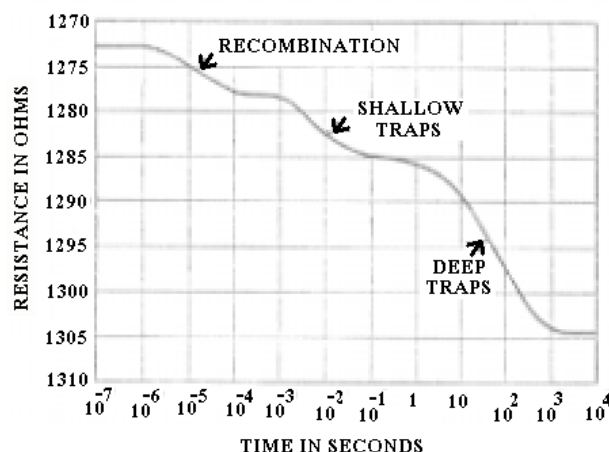


รูปที่ 2.1 แสดงสัญญาณของพาหะข้างน้อยที่วัดได้ในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี

เส้นประ แสดง สัญญาณที่ได้จากซิลิกอน

เส้นทึบ แสดง สัญญาณที่ได้จากซิลิกอนชนิดพี

ได้มีการทดลองที่เป็นหลักฐานยืนยันว่ามีการถูกดักจับของพาหะมากกว่า 1 ครั้งโดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง(photoconductivity) ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาหลังจากปิดแสงที่จากภายนอกที่ฉายลงมาบนแท่งซิลิกอน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการรวมตัวของพาหะมากกว่าหนึ่งครั้ง

การโด๊ปด้วยพาหะข้างมากที่ระดับสูง ๆ (มากกว่า 10^{17} – 10^{18} cm^{-3}) จะทำให้กระบวนการรวมตัวแบบออเจอร์ (Auger recombination) เด่นขึ้นมา [10] เวลาอายุการรวมตัวของพาหะข้างน้อยจะลดลงอย่างรวดเร็วเป็นส่วนผกผันกับความหนาแน่นของพาหะข้างมากยกกำลังสอง [11], [12] นั่นคือจะเกิดอัตราการรวมตัวของพาหะมากขึ้น การลดปัญหานี้คือ ไมโดปสารกึ่งตัวนำให้สูงจนเกินไป, J. Dziewior และ W. Schmid ได้ทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ออเจอร์สำหรับซิลิกอนที่มีการโด๊ปสูง ๆ ปรากฏว่า ที่อุณหภูมิ 300 °K จะมี สัมประสิทธิ์การรวมตัวกันแบบออเจอร์ (Auger recombination coefficient) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี $C_p = 9.9 \times 10^{-32} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ และชนิดเอ็น $C_n = 2.8 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$

J.G. Fossum และ D.S. Lee [13] ได้เสนอแบบจำลองในการคำนวณค่าเวลาอายุของพาหะข้างน้อยโฮลและอิเล็กตรอนที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของโดเนอร์และเอกเซ็ปเตอร์ ($\tau_p(N_d)$ และ $\tau_n(N_a)$) ตามลำดับ โดย τ_n จะมีค่าสูงสุดประมาณ 1 ms ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ N_a มากกว่า 10^{17} cm^{-3}

การเกิดระดับพลังงานแตรป (trapping energy) เนื่องจากสารเจือปนต่าง ๆ ขึ้นในช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ อาจจะมีการรวมตัวของพาหะขึ้นที่ระดับพลังงานนี้โดยเฉพาะที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานจะมีโอกาสเกิดการรวมตัวของพาหะมากที่สุด และปริมาณของสารเจือปนเหล่านี้จะดักจับทั้งอิเล็กตรอนและโฮลไว้ เมื่อสารเจือปนเหล่านี้มีปริมาณมาก เวลาอายุของพาหะข้างน้อยก็จะลดลง เกิดการรวมตัวกันมากขึ้น จำเป็นต้องลดปริมาณของสารเจือปนให้เหลือน้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากที่จะขจัดสารเจือปนเหล่านี้ออกให้หมด การเกิดระดับพลังงานแตรปจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการสูญเสียพาหะเนื่องจากการรวมตัวเช่นเดียวกัน สำหรับเวลาอายุของพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาแน่นของโฮลยกกำลังสองเมื่อระดับพลังงานแตรปอยู่ลึก (deep trap) จากแถบคอนดักชัน 0.79 eV [9] ทำนองเดียวกันกับเวลาอายุของพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนยกกำลังสองเมื่อระดับพลังงานแตรปอยู่ห่างจากแถบคอนดักชัน 0.32 eV [14] ซึ่งตำแหน่งของระดับพลังงานแตรป (trap location) จะมีผลต่อเวลาอายุของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนโดยที่ระดับพลังงานแตรปที่อยู่ลึก (deep trap) หรือบริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงานจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าระดับพลังงานแตรปที่อยู่ตื้น (shallow trap) เนื่องจากมีเวลาอายุของพาหะสูงกว่า [15]

บทที่ 3

การเกิดของพาหะ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของการเกิดพาหะเนื่องจากแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน(Energy gap) ของซิลิกอน(Silicon)มาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน(Silicon solar cells) จะทำให้เกิดพาหะ(charge carriers)เป็นคู่อิเล็กตรอนและโฮล(electron-hole pairs)ขึ้น โดยอัตราการเกิดของพาหะ(Generation rate)จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ โดยจะแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

- 3.1 ปริมาณของโฟตอนที่ตกกระทบ(Photon Flux)
- 3.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Absorption Coefficient)
- 3.3 อัตราการสะท้อนกลับ(Reflectance)ที่ผิว
- 3.4 อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Light Generation Rate)
- 3.5 อัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้นที่ความลึกลงไปในส่วนและอัตราการเกิดของพาหะรวมที่เกิดขึ้นในหนึ่งหน่วยพื้นที่

3.1 โฟตอนฟลักซ์(Photon Flux)

จำนวนของโฟตอนที่มาตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่า โฟตอนฟลักซ์ (photon flux) แทนสัญลักษณ์ด้วย F มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$

ความเข้มของแสงที่ส่องสว่าง(radiation intensity)มาจากดวงอาทิตย์ เรียกว่า ค่าคงที่แสงอาทิตย์(Solar Constant) หรือ ค่ามวลอากาศ(Air Mass) แทนสัญลักษณ์ด้วย AM ถ้าพิจารณาในบริเวณที่อยู่นอกบรรยากาศของโลกจะมีค่ามวลอากาศเป็นศูนย์(Air Mass Zero) และเมื่อแสงผ่านเข้ามาในบรรยากาศของโลก ความเข้มของแสงจะลดลงประมาณ 30% เนื่องจาก

1. การกระเจิง(scatter)เนื่องจากโมเลกุลในบรรยากาศ(Rayleigh scattering)
2. การกระเจิงเนื่องจากอนุภาคของฝุ่นในบรรยากาศ
3. การถูกดูดกลืน(absorbed)เนื่องจากก๊าซออกซิเจน(O_2), ก๊าซโอโซน(O_3), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) และไอน้ำ ในบรรยากาศ โดยที่ ก๊าซ O_3 จะดูดกลืนแสงในช่วงอุลตราไวโอเลต(ultraviolet) ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง $0.01-0.390 \mu\text{m}$ ไอน้ำจะดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรด(infrared) ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง $0.770-1000 \mu\text{m}$

เมื่อแสงเดินทางเข้ามาในบรรยากาศของโลกแล้ว จะสามารถหาค่ามวลอากาศ ได้ดังรูปที่ 3.1
ค่ามวลอากาศ หาได้จากสมการ

$$\text{Air Mass} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.1)$$

หรือ

$$\text{Air Mass} = \sqrt{1 + \frac{s}{h}} \quad (3.2)$$

เมื่อ s เป็นความยาวเงาของผู้สังเกต

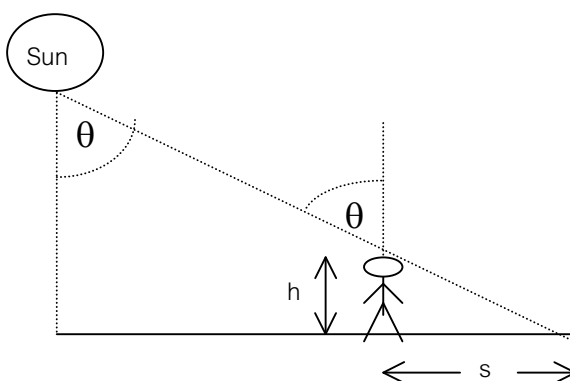
h เป็นความสูงของผู้สังเกต

θ เป็นมุมระหว่างแสงในแนวตั้งและแสงที่ส่องมายังผู้สังเกต

เช่น เมื่อแสงทำมุมกับผู้สังเกตในแนวตั้ง 0° จะได้ค่า $AM = \frac{1}{\cos 0^\circ} = 1$, เมื่อแสงทำมุมกับผู้สังเกตใน

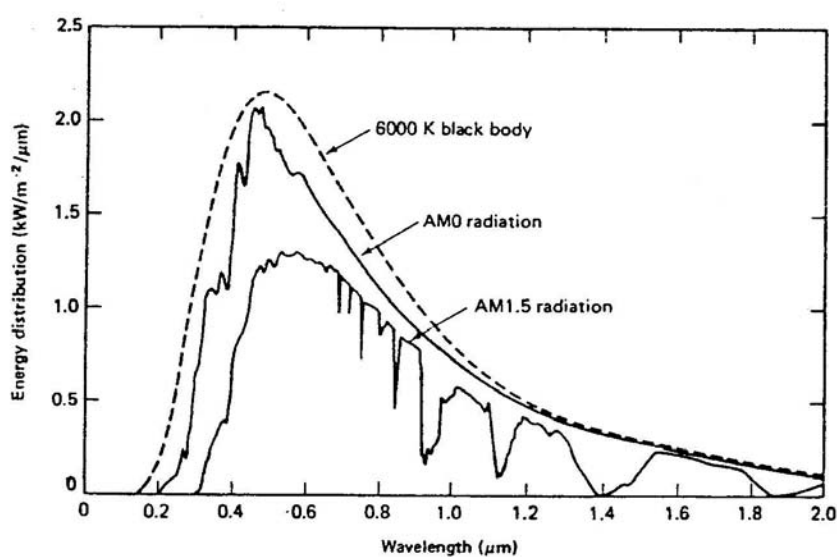
แนวตั้ง 48° จะได้ค่า $AM = \frac{1}{\cos 48^\circ} = 1.5$ และเมื่อแสงทำมุมกับผู้สังเกตในแนวตั้ง 60° จะได้ค่า AM

$$= \frac{1}{\cos 60^\circ} = 2$$



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพตัวแปรการคำนวณค่า Air Mass ในบรรยากาศของโลก

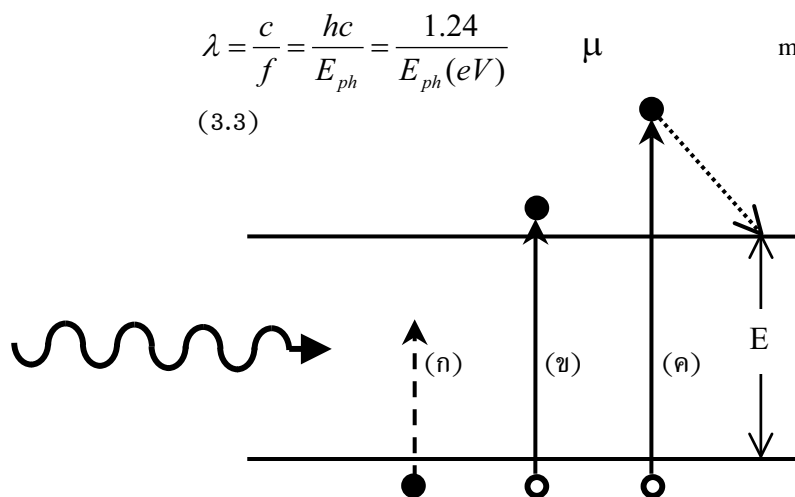
พลังงานในการแผ่รังสี (หน่วย W/m^2) จากดวงอาทิตย์ของแต่ละ AM หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงไว้ดังรูปที่ 3.2 โดยที่ AM0, AM1, AM1.5, และ AM2 จะมีพลังงานในการแผ่รังสีเท่ากับ 1353, 925, 844, และ $691 W/m^2$ ตามลำดับ [16]



รูปที่ 3.2 แสดงการกระจายของพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ AM ต่าง ๆ

3.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Light absorption coefficient)

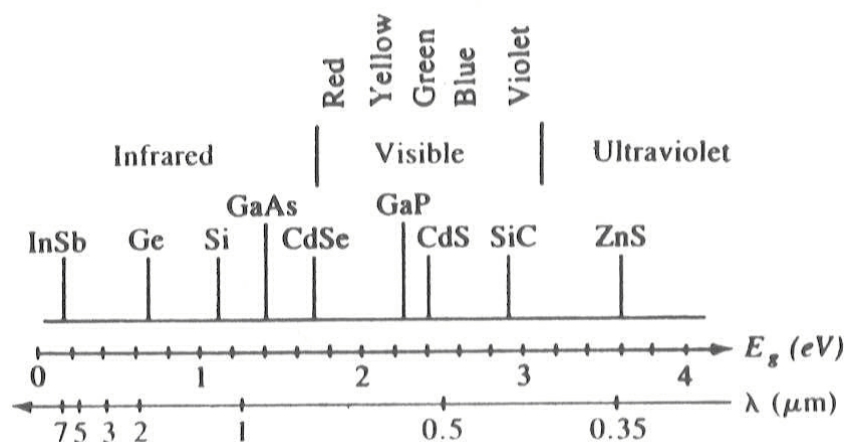
เมื่อโฟตอนที่มีพลังงาน E_{ph} ในหน่วย eV ซึ่งมีความยาวคลื่น(λ) ตามสมการ(3.3)มาตกกระทบสารกึ่งตัวนำ สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะไม่ถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 3.3(ก)



รูปที่ 3.3 แสดงการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ

สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะถูกดูดกลืน เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นมา ดังรูปที่ 3.3 (ข) สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะถูกดูดกลืนเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นมาเช่นกัน แต่จะมีระดับพลังงานสูงกว่าขอบของแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์มาก จะมีพลังงานส่วนเกิน(excess energy)ซึ่งมีค่าเท่ากับ $E_{ph} - E_g$ โดยอิเล็กตรอนและโฮลจะผ่อนคลายพลังงานให้โฟนอน(phonon)ในรูปของความร้อนและอิเล็กตรอนจะตกลงมาอยู่ที่ขอบของแถบพลังงาน ดังรูปที่ 3.3 (ค) ซึ่งปรากฏการณ์การผ่อนคลายโฟนอนนี้ ไม่ได้มีส่วนร่วมในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งที่มีส่วนทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย

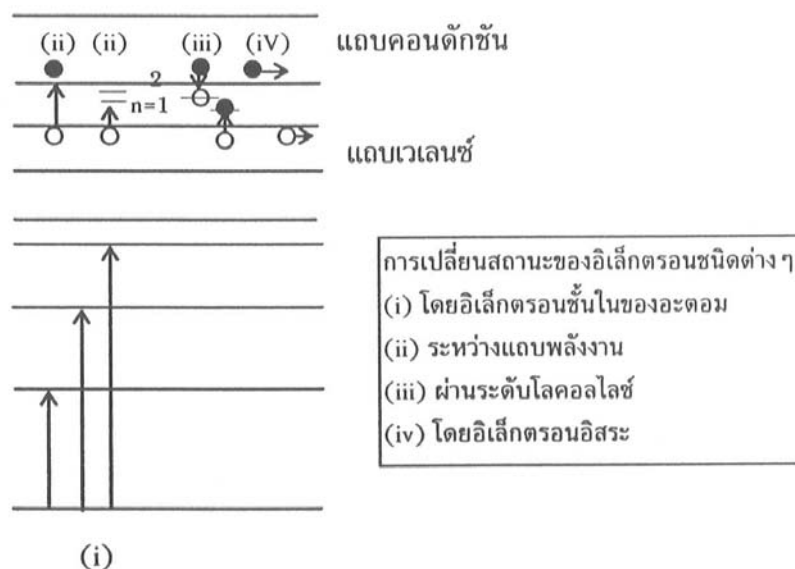
สำหรับซิลิกอนซึ่งมีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.12 eV เมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ 1.12 eV มาตกกระทบ หรือพิจารณาตามสมการ(3.3)แล้วจะได้ค่าความยาวคลื่นที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ $1.109 \mu m$ จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าซิลิกอนจะดูดกลืนสเปกตรัมแสง(optical spectrum)ในช่วงของแสงอินฟราเรด(infrared), แสงที่ตามองเห็น(visible) และแสงอุลตราไวโอเลต(ultraviolet) เช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่ดูดกลืนสเปกตรัมแสงในช่วงนี้ เช่น GaAs, Ge, InSb เป็นต้น



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำกับสเปกตรัมแสง

สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำคือ แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อผ่านเข้าไปในสารที่มีอนุภาคอิเล็กตรอน หรือไอออน หรือนิวเคลียส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุนั้นมีประจุไฟฟ้าและมีโมเมนต์แม่เหล็ก จึงมีอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคเหล่านี้และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างเช่น

- 1) การเปลี่ยนสถานะพลังงานของอะตอมเดี่ยว ๆ
 - 2) การเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ
 - 3) การเปลี่ยนสถานะซึ่งเกิดจากการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบคอนดักชันและทิ้งโฮลไว้ในแถบวาเลนซ์ แต่การกระตุ้นมีพลังงานไม่เพียงพอ อาจทำให้อิเล็กตรอนและโฮลนั้นยังคงมีแรงคูมมบ์ดึงดูดซึ่งกันและกันให้เป็นคู่อยู่ โดยยังไม่เป็นอิสระต่อกัน เรียกว่า เอกซิตอน(exciton)
 - 4) การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนและโฮลระหว่างพลังงานของสารเจือปนหรือแก๊สแตกที่เกิดจากจุดบกพร่อง
 - 5) การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอิสระภายในแถบพลังงานเดียวกันในสารกึ่งตัวนำ
 - 6) การเปลี่ยนสถานะของระดับพลังงานของอะตอมเมื่ออะตอมสั้นหรือหมุนรอบตัวเอง
 - 7) การกระตุ้นให้เกิดโพลาไรเซชันชนิดต่างๆ ได้แก่ โพลาไรเซชันชนิดอิเล็กตรอนิกส์(electronic polarization) โพลาไรเซชันชนิดโอเรียนเทชัน(orientation polarization)
 - 8) การกระตุ้นให้โครงผลึกชนิดไอออนเกิดการสั่น
 - 9) การดูดกลืนแสงอันเนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียสหรือโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน
- กลไกทั้งหมดนี้ 1)-5) มีอิเล็กตรอนเป็นตัวการสำคัญ 6)-8) มีอะตอมและไอออนเป็นตัวการสำคัญ และ 9) มีสนามแม่เหล็กแสดงอิทธิพลสำคัญ

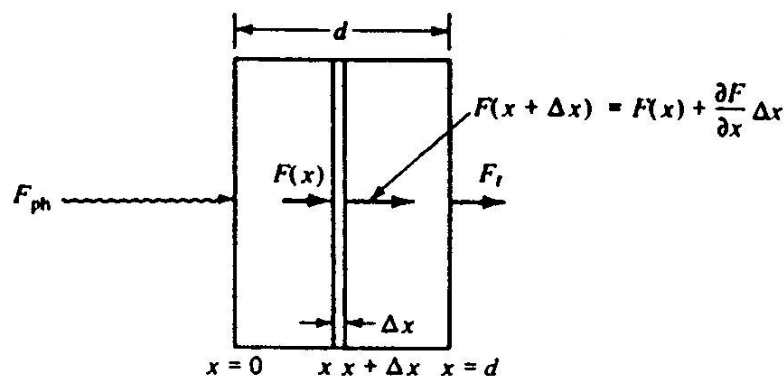


รูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการเปลี่ยนสถานะชนิดต่างๆของอิเล็กตรอนในของแข็ง

กลไกการดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนเป็นตัวอย่างสำคัญดังรูปที่ 3.5 อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นในๆใกล้นิวเคลียสจะมีคุณสมบัติเหมือนอะตอมที่อยู่อย่างเดี่ยวๆ คือจะมีระดับพลังงานแบบกระโดดเป็นเส้นๆ ไม่ต่อเนื่อง ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรรอบนอกจะมีระดับพลังงานแบบแถบ ดังนั้นกลไกการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนจึงแบ่งออกได้เป็นลักษณะต่างๆดังนี้

- (i) การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในๆ
- (ii) การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์สู่แถบคอนดักชัน
- (iii) การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนหรือโฮลที่อยู่ในแก๊สเสถียร
- (iv) การดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนอิสระหรือโฮลอิสระ

การดูดกลืนแสงแบบ (i) เกิดขึ้นในย่านรังสีเอ็กซ์หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต ส่วนแบบ (ii)-(iv) เป็นการดูดกลืนแสงหลักที่เกิดขึ้นในวัสดุฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ



รูปที่ 3.6 แสดงการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

เมื่อโฟตอนฟลักซ์(F_{ph})ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 3.6 อัตราส่วนของโฟตอนฟลักซ์ที่ถูกดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของโฟตอนฟลักซ์ที่ระยะ Δx ดังนี้

$$\alpha F(x) \Delta x$$

โดยที่ α เรียกว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(light absorption coefficient) มีหน่วยเป็น cm^{-1} ดังนั้น

$$\begin{aligned} F(x+\Delta x) - F(x) &= \frac{dF(x)}{dx} \Delta x = -\alpha F(x) dx & (3.4) \\ \frac{dF(x)}{dx} &= -\alpha F(x) \\ \frac{dF(x)}{F(x)} &= -\alpha dx \end{aligned}$$

$$F(x) = A e^{-\alpha x} \quad (3.5)$$

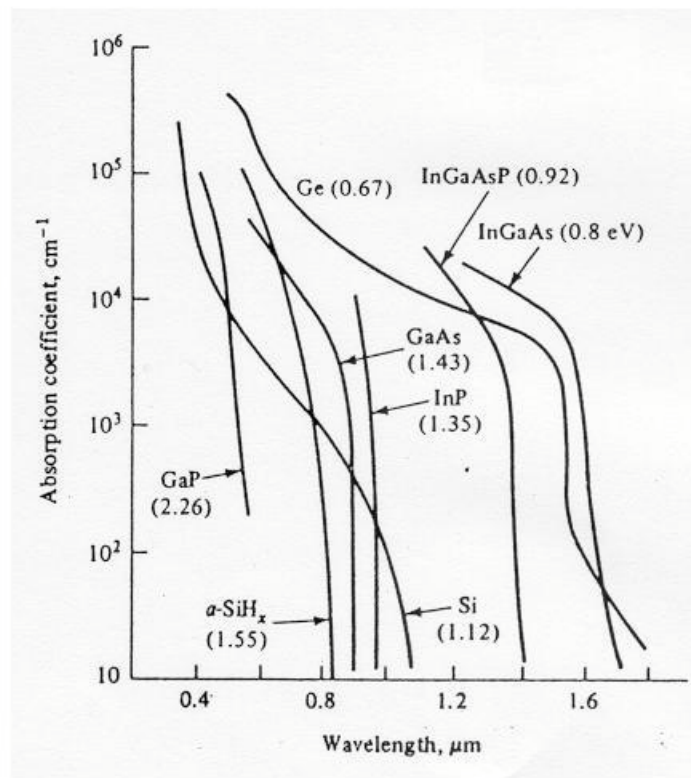
มีเงื่อนไขขอบเขตที่ $x=0$ คือ $F(x)=F_{ph}$ ดังนั้น

$$A = F_{ph} \quad (3.6)$$

คำตอบคือ

$$F(x) = F_{ph} e^{-\alpha x} \quad (3.7)$$

สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆในแต่ละความยาวคลื่นแสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณที่มีค่าเท่ากับช่องว่างพลังงาน เช่น ซิลิกอนจะดูดกลืนโฟตอนที่ความยาวคลื่น $\lambda \leq 1.1 \mu\text{m}$ หรือ $E_{ph} \geq 1.12 \text{ eV}$

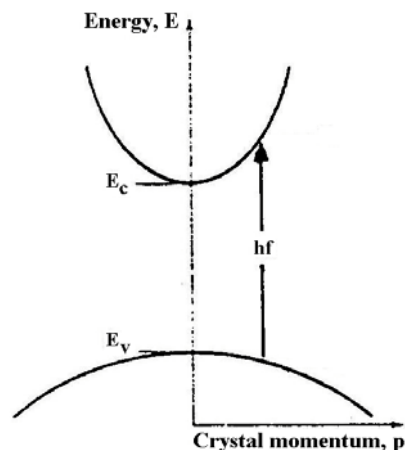


รูปที่ 3.7 แสดงสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

จากคุณสมบัติของการดูดกลืนแสง จะแบ่งสารกึ่งตัวนำออกเป็น 2 ชนิด คือ

3.2.1 สารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบตรง (Direct-band-gap semiconductor)

จะพิจารณาลักษณะของแถบพลังงานเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number) แทนสัญลักษณ์ด้วย $\vec{k}$ ให้อยู่ในแนวแกนนอน ส่วนระดับพลังงานให้อยู่ในแนวแกนตั้ง ฟังก์ชันของเลขคลื่นมีความสัมพันธ์กับค่าโมเมนตัมตามสมการ $\vec{P} = \hbar\vec{k}$ ดังนั้นในแนวแกนนอนก็คือค่าโมเมนตัมนั่นเอง เมื่อเขียนรูปแล้ว จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันตรงกันในแนวตั้งที่ตำแหน่ง $k=0$ พอดี ดังรูปที่ 3.8 เรียกสารกึ่งตัวนำแบบนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบตรง เช่น GaAs, InP และ InGaAs เป็นต้น ส่วนมากจะใช้งานด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากเปล่งแสงได้ดี



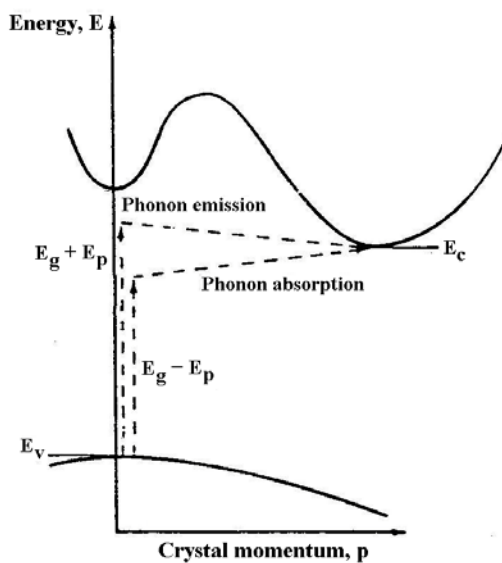
รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพพลังงาน-โมเมนตัมของสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบตรง

เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานมากพอ ($E_{ph} = hf \geq E_g$) มาตกกระทบสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะไปทำลายพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ของอิเล็กตรอนในผลึก จะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระขึ้นและจะเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ (valence band) ไปยังแถบคอนดักชัน (conduction band) โดยตรง เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์

3.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect-band-gap semiconductor)

สารกึ่งตัวนำที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันไม่ตรงกันในแนวตั้งที่ตำแหน่ง $k=0$ ดังรูปที่ 3.9 เรียกสารกึ่งตัวนำแบบนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบไม่ตรง เช่น Si, Ge และ GaP เป็นต้น จะมีคุณสมบัติด้านแสงไม่ค่อยดีเนื่องจากเปล่งแสงได้น้อย ส่วนมากจะใช้งานด้านโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์กันมาก โดยเฉพาะซิลิกอนเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีมากและราคาถูก

ในการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจะต้องเป็นไปตามกฎของการเลือก (selection rule) หรือบางครั้งเรียกว่ากฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservative rule) มีใจความว่า “ในการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนั้น จะต้องไม่มีการเปลี่ยนค่าโมเมนตัม” ดังนั้นการดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบตรงจึงอยู่ในแนวตั้ง และเป็นการรักษาโมเมนตัมโดยปริยาย แต่การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรงนั้น เนื่องจากจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันไม่ได้อยู่ในแนวตั้งตรงกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จึงไม่มีสถานะพลังงานใดๆ ที่จะรองรับอิเล็กตรอนข้างบนในแนวตั้ง ดังนั้นอิเล็กตรอนจะกระโดดขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปแล้วเปลี่ยนค่าโมเมนตัมโดยการมีอันตรกิริยากับโครงผลึก (lattice) ซึ่งได้แก่การรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมกับโครงผลึกที่กำลังสั่นอยู่นั่นเอง จึงทำให้ค่าโมเมนตัมของระบบจะยังคงถูกรักษาให้คงที่ไว้ได้



รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพพลังงาน-โมเมนตัมของสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบไม่ตรง

อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์จะไปยังแถบคอนดักชันได้ จะต้องมีการรับหรือคายพลังงานในรูปของโฟนอน(phonon)ให้กับโครงผลึก ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนสถานะเป็นไปตามกฎของการอนุรักษ์พลังงานและกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม ตามสมการ (3.8) และ (3.9) ตามลำดับ

$$\text{กฎของการอนุรักษ์พลังงาน} \quad E_f - E_i = \hbar\omega \pm E_p \quad (3.8)$$

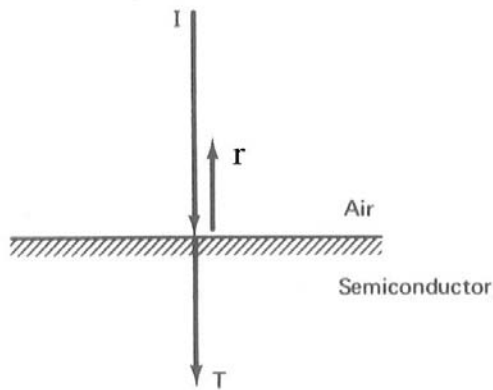
$$\text{กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad k_2 = k_1 \pm k_p \quad (3.9)$$

โดยที่ E_p คือ พลังงานโฟนอน
 E_i คือ พลังงานของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
 E_f คือ พลังงานของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ
 k_1 คือ โมเมนตัมของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
 k_2 คือ โมเมนตัมของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ
 k_p คือ โมเมนตัมของโฟนอน

เครื่องหมาย + ในพจน์ด้านขวาของทั้งสองสมการ แสดงว่าอิเล็กตรอนต้องรับพลังงานหรือรับโมเมนตัมจากโฟนอน และเครื่องหมาย - ในพจน์ด้านขวาของทั้งสองสมการ แสดงว่าอิเล็กตรอนต้องคายพลังงานหรือคายโมเมนตัมให้แก่โฟนอน

3.3 การสะท้อนกลับ(Reflection)

จำนวนโฟตอนที่ผ่านเข้าไปยังเนื้อสารจะมีปริมาณน้อยกว่าจำนวนโฟตอนที่มาตกกระทบ(incident) แทนสัญลักษณ์ด้วย I เนื่องจากการสะท้อนกลับ(reflection)ของโฟตอนบางส่วนที่ผิวด้านหน้า แทนสัญลักษณ์ด้วย r และจะมีบางส่วนสามารถทะลุผ่าน(transmission)เข้าไปยังสารถึงตัวนำได้ แทนสัญลักษณ์ด้วย T ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการสะท้อนกลับที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

อัตราการสะท้อนกลับ(reflectance) หาได้จากสมการ

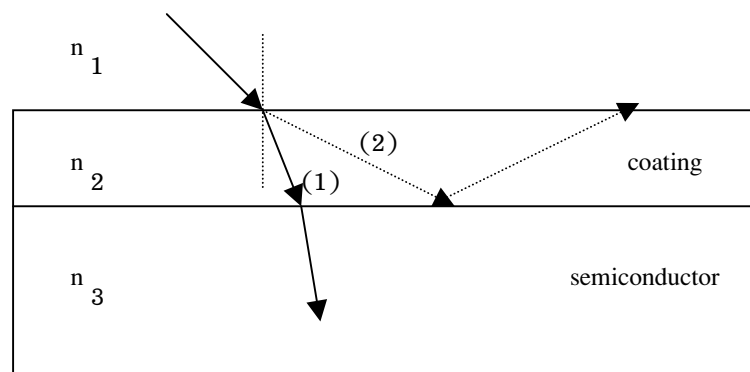
$$r = \frac{(n-1)^2 + (\lambda\alpha/4\pi)^2}{(n+1)^2 + (\lambda\alpha/4\pi)^2} \quad (3.10)$$

โดยที่ n_1 คือค่าดัชนีการหักเหแสงในอากาศ

n_2 คือค่าดัชนีการหักเหแสงในสารกึ่งตัวนำ

$$n = n_2/n_1$$

$\alpha(\lambda)$ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแต่ละความยาวคลื่น(λ)



รูปที่ 3.11 แสดงทางเดินแสงผ่านสารกึ่งตัวนำที่มีการเคลือบผิว

การเคลือบสารที่ผิวดังรูปที่ 3.11 เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสง(antireflective coating)จะต้องใช้สารที่มีค่าดัชนีการหักเห(n_3)ตามความสัมพันธ์

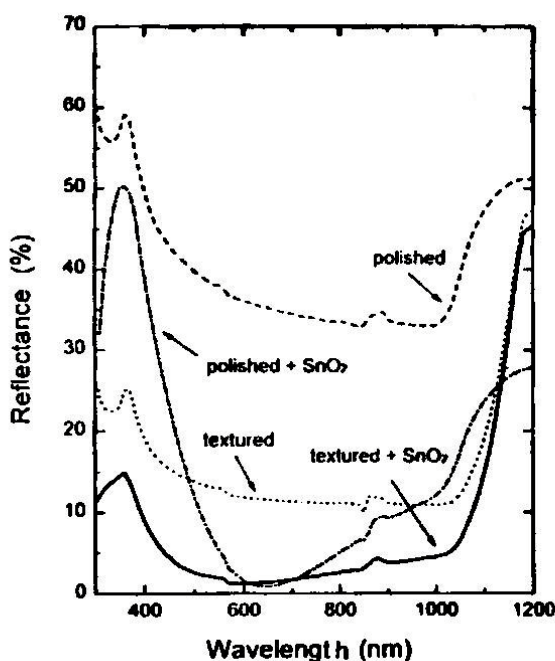
$$n_3 = \sqrt{n_1 n_2} \quad (3.11)$$

เนื่องจากซิลิกอนมีค่าดัชนีการหักเหเท่ากับ 3.5 ดังนั้นจะต้องใช้สารที่มีค่าดัชนีการหักเหตามสมการ(3.11) เท่ากับ $n_3 = 1.87$ เช่น SnO_2 เป็นต้น จากกฎของสเนลล์(Snell's law)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.12)$$

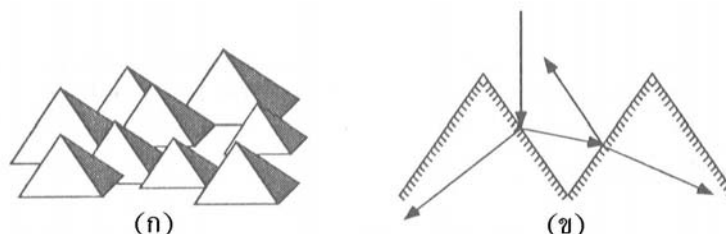
เมื่อตัวกลางที่ 2 มีค่าดัชนีหักเห n_2 มากกว่าตัวกลางที่ 1 ที่มีค่าดัชนีหักเห n_1 แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติ ดังนั้นโอกาสที่แสงจะเดินทางเข้าไปสู่สารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นตัวกลางที่ 3 ที่มีค่าดัชนีหักเห n_3 จึงมีมากขึ้นตามทางเดินแสง(1) นั่นคือปริมาณโฟตอนจะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำมากขึ้น การผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลจึงมีมากขึ้นด้วย แต่ถ้าตัวกลางที่ 2 มีค่าดัชนีหักเห n_2 น้อยกว่าตัวกลางที่ 1 ที่มีค่าดัชนีหักเห n_1 แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ โอกาสที่แสงจะไปตกกระทบบนรอยต่อระหว่างตัวกลางที่ 2 และตัวกลางที่ 3 มีมุมตกกระทบบากกว่ามุมวิกฤติทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด ดังนั้นปริมาณโฟตอนที่เข้าสู่สารกึ่งตัวนำจึงลดลง

การลดค่าอัตราการสะท้อนกลับที่ผิวนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การขัดผิว(Polished), การกัดผิว(Textured), การขัดผิวแล้วเคลือบด้วย SnO_2 และการกัดผิวแล้วเคลือบด้วย SnO_2 ได้ผลดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงอัตราการสะท้อนกลับที่ผิวต่างๆ [4]

การลดค่าอัตราการสะท้อนกลับที่ผิวด้วยการกัดผิวนั้น จะทำให้ผิวของสารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างคล้ายปิรามิด (pyramid) เมื่อแสงมาตกกระทบด้วยมุมต่างๆ ดังรูปที่ 3.13 จะเกิดการสะท้อนไปยังอีกผิวปิรามิดที่อยู่ข้างๆ และเกิดการหักเหเข้าไปในเนื้อสาร ดังนั้นปริมาณของแสงที่ถูกสะท้อนกลับจะลดลงเมื่อเทียบกับผิวที่เรียบ แสงที่ถูกหักเหเข้าสู่สารกึ่งตัวนำจะมีระยะทางเดินทางมากขึ้น



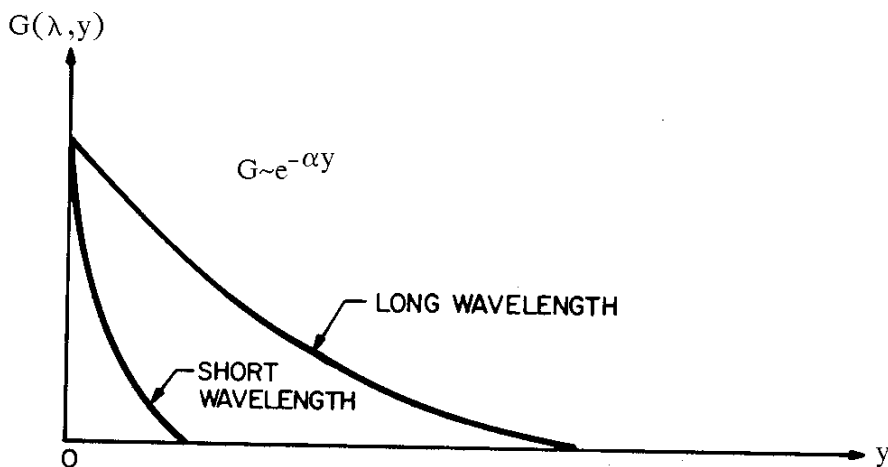
รูปที่ 3.13 แสดงผิวน้ำที่ถูกกัดเป็นรูปปิรามิดและทางเดินแสงที่มากกระทบ

3.4 อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Light Generation Rate)

เมื่อมีโฟตอน(photon)ที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนสภาพของพาหะจากเบาวด์สเตต(bound state)ไปเป็นสเตตอิสระ(free state) ซึ่งพาหะอิสระที่เกิดขึ้นนี้ จะต้องหนีข้ามพรมแดนหรือรอยต่อ(junction)ไปสู่บริเวณที่มีพาหะประเภทเดียวกันอยู่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(n-type)และพี(p-type)มาจรดกันเป็นรอยต่อแบบพีเอ็น(p-n junction) จะมีพาหะชนิดพีที่เกิดขึ้นในบริเวณเอ็น จะต้องหนีไปอยู่บริเวณพี และจะมีพาหะชนิดเอ็นที่เกิดขึ้นในบริเวณพี จะต้องหนีไปอยู่บริเวณเอ็น จึงจะทำให้เกิดเป็นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ได้ แต่ระยะทางที่พาหะข้างน้อยต้องเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ จะต้องน้อยกว่าระยะทางแพร่ซึม(diffusion length) ไม่งั้นพาหะข้างน้อยจะถูกรวมตัวกับ พาหะข้างมาก ก่อนจะไปถึงรอยต่อ จำนวนพาหะข้างน้อยที่เกิดจากโฟตอนจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง x จะมีจำนวน $N_0 e^{-x/L}$ ที่ไม่ถูกรวมตัว เมื่อ N_0 คือจำนวนพาหะข้างน้อยทั้งหมดที่ถูกผลิตจากโฟตอน และถ้าระยะทางที่พาหะข้างน้อยเคลื่อนที่ได้เท่ากับระยะทางแพร่ซึม จะมีจำนวนพาหะข้างน้อยที่ไม่ถูกรวมตัวเท่ากับ $0.37N_0$ ดังนั้นการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องให้ชั้นของสารกึ่งตัวนำบางมาก (ในระดับไมครอน)

การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากการดูดกลืนแสงที่มากกระทบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่า อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Light generation rate) แทนสัญลักษณ์ด้วย G_{rate} มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ [16] สามารถหาได้จากสมการ

$$G_{rate}(x, y, \lambda) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1 - r(\lambda)]\exp[-\alpha(\lambda)y] \quad (3.13)$$



รูปที่ 3.14 แสดงการผ่านเข้าไปในสารของความยาวคลื่นที่ต่างกัน

อัตราการเกิดของพาหะนี้ จะขึ้นอยู่กับปริมาณของโฟตอนที่ตกกระทบ, สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง, อัตราการสะท้อนกลับที่ผิว, และความลึก(depth)จากผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ตามสมการ(3.13) สำหรับระดับความลึกจากผิวจะทำให้ค่าอัตราการเกิดของพาหะลดลงแบบฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล(exponential function decay) สำหรับสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นสั้นจะสามารถผ่านเข้าไปในสารได้ไกลกว่าสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นยาว เนื่องจากสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นสั้น(พลังงานสูง)จะถูกดูดกลืนไว้มากที่บริเวณใกล้ผิวที่แสงมาตกกระทบ ส่วนสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นยาว(พลังงานต่ำ)จะถูกดูดกลืนไว้น้อยที่บริเวณใกล้ผิวที่แสงมาตกกระทบ โฟตอนจึงสามารถทะลุเข้าไปยังเนื้อสารได้มากกว่า ดังรูปที่ 3.14

เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงได้จะต้องผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลจากแสงให้ได้ปริมาณมากที่สุด และจะต้องกวาดอิเล็กตรอนและโฮลเหล่านั้นให้ไหลออกไปสู่วงจรภายนอกให้ได้มากที่สุดโดยการใช้ปรากฏการณ์แพร่กระจายของพาหะ

กลไกที่จะผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลจากแสงให้ได้ปริมาณมากที่สุดจะต้อง

1. เลือกสารกึ่งตัวนำที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงและมีสภาพนำไฟฟ้าสูงด้วย
2. ปรับปรุงคุณภาพของสารกึ่งตัวนำโดยพยายามเพิ่มผลคูณของอายุของพาหะ(carrier lifetime)และความคล่องตัว(mobility)
3. ลดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกผลิตด้วยแสง โดยลดการรวมตัวที่รอยต่อ p-n, p-i และ i-n

ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน(thermal equilibrium) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล(n_0 และ p_0)จะสัมพันธ์กันตามสมการ

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (3.14)$$

โดยที่ n_i คือ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์(intrinsic semiconductor)

เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกรบกวนโดยสิ่งเร้าจากภายนอก เช่น แสง เป็นต้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจะเปลี่ยนไปมีค่าเป็น n และ p ตามลำดับ ดังนี้

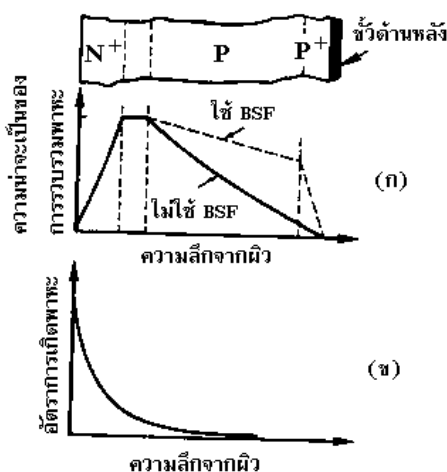
$$n = n_0 + n_e \quad (3.15)$$

และ $p = p_0 + p_e \quad (3.16)$

เมื่อ n_e และ p_e คือ ความเข้มข้นของพาหะส่วนเกิน(excess electron และ excess hole concentrations)

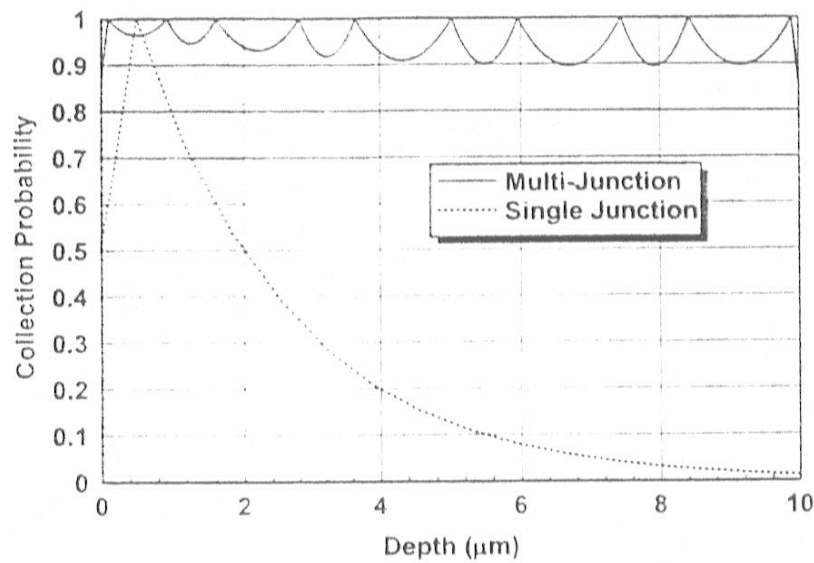
เมื่อไม่มีสิ่งเร้านี้มารบกวนระบบอีก ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจะเป็นไปตามสมการ(3.14)อีกครั้ง

การออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ จะให้ด้านบนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและด้านล่างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เนื่องจากอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสงนั้นมีค่ามากที่สุดที่ผิวและจะลดลงแบบฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลเมื่อระยะทางลึกลงไปในเนื้อสารดังรูปที่ 3.15 ข) แต่ความน่าจะเป็นของการเก็บรวบรวมพาหะ(carrier collection probability)ที่เกิดจากแสงในเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดที่บริเวณปลอดพาหะ(depletion region)ซึ่งอยู่ตรงกลางรอยต่อพีเอ็น เนื่องจากบริเวณปลอดพาหะนี้จะมีสนามไฟฟ้าสูงมาก เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น จะถูกพัดพาออกไปจากบริเวณนี้อย่างรวดเร็วจึงสามารถเก็บรวบรวมพาหะได้มาก และความน่าจะเป็นในการเก็บรวบรวมพาหะจะมีค่าลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล เมื่อห่างออกไปจากรอยต่อดังรูปที่ 3.15 ก) นอกจากนี้ความน่าจะเป็นในการเก็บรวบรวมพาหะที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย และที่ด้านพีก็มีค่าน้อย ด้วยแต่เราสามารถปรับปรุงให้ความน่าจะเป็นในการเก็บรวบรวมพาหะด้านพีมีค่าสูงขึ้นด้วยการโด๊ปด้านหลังสุดให้ความหนาแน่นของเอกเซ็ปเตอร์มีค่ามาก ๆ(p^+)ดังรูปที่ 3.15 ก) ดังนั้นจะต้องทำให้บริเวณรอยต่ออยู่ในตำแหน่งที่ใกล้ผิวมากที่สุด เพราะจะได้เก็บรวบรวมพาหะที่เกิดจากแสงอาทิตย์ที่มีมากใกล้ผิวให้ได้มากที่สุดด้วย



รูปที่ 3.15 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะตามระดับความลึก

ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีรอยต่อเพียงที่เดียว ลักษณะความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะก็จะเป็นดังรูปที่ 3.16 (เส้นประ) แต่ถ้าสารมีรอยต่อมากกว่าหนึ่งที ก็จะมีลักษณะความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะก็จะเป็นดังรูปที่ 3.16 (เส้นทึบ) จะเห็นได้ว่า ถ้าสารมีรอยต่อมาก ๆ ความน่าจะเป็นของการรวบรวมพาหะก็จะสูงเกือบเข้าใกล้ 1.0 ทุก ๆ บริเวณตลอดความลึกจากผิว นั่นก็คือโอกาสที่พาหะข้างน้อยจะข้ามไปยังอีกด้านหนึ่งมีมากขึ้น



รูปที่ 3.16 แสดงค่าความน่าจะเป็นของการเก็บรวบรวมพาหะของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่ออันเดียวและหลายอัน

3.5 อัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้นและอัตราการเกิดของพาหะรวม

อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากโฟตอนที่มาตกกระทบในแต่ละชั้นของทุกความยาวคลื่น เรียกว่า อัตราการเกิดของพาหะของทุกความยาวคลื่น เป็นอัตราการเกิดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในเวลาหนึ่งวินาที มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ แทนสัญลักษณ์ด้วย G_y สามารถหาได้จากสมการ

$$G_y(x, y) = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} G_{\text{rate}} d\lambda \quad (3.17)$$

เมื่อ G_{rate} คืออัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลของแต่ละความยาวคลื่น ตามสมการ(3.13)

λ_0 คือความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้

อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่า อัตราการเกิดของพาหะรวม (Total generation rate หรือ G_{sum}) คำนวณจากผลรวมของผลคูณของอัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้น กับผลต่างความลึกในแต่ละชั้น มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ สามารถหาได้จากสมการ

$$G_{\text{sum}} = \int_{y=0}^y G_y dy \quad (3.18)$$

เนื่องจากการเกิด 1 คู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นจะได้อิเล็กตรอน 1 ตัวและโฮล 1 ตัว ดังนั้นอัตราการเกิดอิเล็กตรอนและอัตราการเกิดโฮลจะมีค่าเท่ากันตามสมการ(3.19)

$$G_n = G_p \quad (3.19)$$

3.6 สรุป

จากทฤษฎีในหัวข้อที่ผ่านมา จะนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป โดยใช้สมการ(3.13)เพื่อคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะของแต่ละความยาวคลื่น สมการ(3.17)เพื่อคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะของทุกความยาวคลื่น และสมการ(3.18) เพื่อคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม

บทที่ 4

การรวมตัวของพาหะ

เมื่อสภาวะสมดุลเชิงความร้อน(thermal equilibrium)ถูกรบกวน($pn \neq n_i^2$) ระบบจะพยายามปรับตัวกลับไปยังสมดุลเชิงความร้อน($pn = n_i^2$) โดยกระบวนการที่จะรักษาสมดุลนี้จะเกิดขึ้นโดยพาหะข้างน้อยส่วนเกิน (excess minority carrier) จะรวมตัวกับพาหะข้างมาก ขณะที่เกิดการรวมตัวกัน จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน เรียกกระบวนการนี้ว่า การรวมตัวกันแบบเปล่งแสง(radiative recombination) หรือปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปพลังงานความร้อนให้แก่ผลึก เรียกกระบวนการนี้ว่า การรวมตัวกันแบบไม่เปล่งแสง(nonradiative recombination) และเรียกอัตราที่อิเล็กตรอนและโฮลมารวมตัวกันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลาว่า อัตราการรวมตัวของพาหะ(Recombination rate)

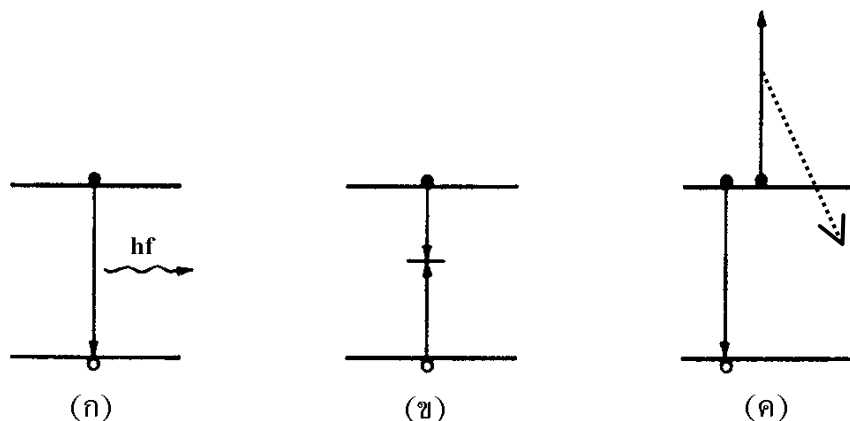
ในบทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

- 4.1 กระบวนการรวมตัวกันของพาหะในสารกึ่งตัวนำ
- 4.2 อัตราการรวมตัวของพาหะ
- 4.3 สารเจือปน

4.1 กระบวนการรวมตัวกันของพาหะในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการรวมตัวกันของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่สำคัญมี 3 กระบวนการคือ

- 4.1.1 การรวมตัวกันแบบเปล่งแสง ดังรูปที่ 4.1 (ก)
- 4.1.2 การรวมตัวกันแบบผ่านแทรีป ดังรูปที่ 4.1 (ข)
- 4.1.3 การรวมตัวกันแบบออเจอร์ ดังรูปที่ 4.1 (ค)



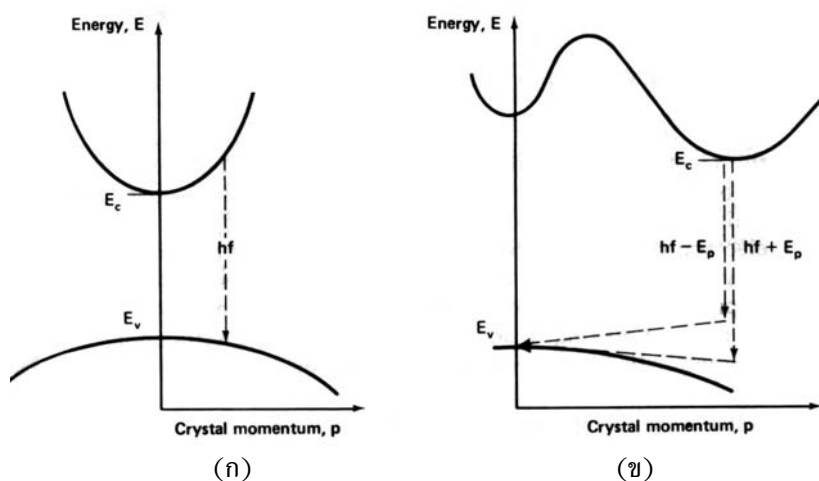
รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล

- ก) แบบเปล่งแสง,
- ข) แบบผ่านแทรีป,
- ค) แบบออเจอร์

มีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 การรวมตัวกันแบบเปล่งแสง(Radiative recombination)

หรือเรียกอีกอย่างว่า band-to-band recombination จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง(direct bandgap semiconductors) ดังรูปที่ 4.2 (ก) เช่น GaAs เป็นต้น และในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง(indirect bandgap semiconductors) ดังรูปที่ 4.2 (ข) เช่น Si และ Ge เป็นต้น โดยที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบคอนดักชันจะกลับมารวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์โดยมีการเปล่งแสงออกมา กระบวนการเปล่งแสงจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง แต่จะเกิดขึ้นอย่างช้าในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรงเนื่องจากมีขั้นตอนที่ต้องถ่ายเทโมเมนตัมให้กับโฟนอนด้วย



รูปที่ 4.2 แสดงกระบวนการรวมตัวกับแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงาน
ก) แบบตรง, ข) แบบไม่ตรง

การรวมตัวกันของพาหะแบบเปล่งแสงจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่มีจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ตรงกันในแนวตั้งที่ค่า $k=0$ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรงโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม และจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีพลังงาน(hf) เท่ากับความกว้างของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน(Energy conservative rule)ตามสมการ(4.1)และกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม(Momentum conservative rule)ตามสมการ(4.2)

$$hf = \mathcal{E}_n - \mathcal{E}_p = \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_v \quad (4.1)$$

$$k_n + k_p = 0 \quad (4.2)$$

เมื่อ k_n, k_p คือโมเมนตัมของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

จากสมการ(4.2)จะเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเลยเนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีโมเมนตัมเท่ากัน

อัตราการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสง(R_R) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันและความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ ตามสมการ

$$R_R = \beta np \quad (4.3)$$

เมื่อ β คือค่าคงที่

ภายใต้สมดุลเชิงความร้อน(thermal equilibrium) จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงเป็น

$$R_R = \beta n_0 p_0 \quad (4.4)$$

เมื่อ n_0 และ p_0 คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่สมดุลเชิงความร้อน ตามลำดับ

และความเข้มข้นของพาหะ(carrier concentration)ยังคงเป็นไปตามสมการ $p_0 n_0 = n_i^2$ สมการ(4.4) กลายเป็น

$$R_R = \beta n_i^2 \quad (4.5)$$

เมื่อมีสิ่งรบกวนจากภายนอกที่จะทำให้เกิดการผลิตคู่พาหะขึ้นมา จะทำให้มีอัตราการรวมตัวแบบเปล่งแสงสุทธิ(net radiative recombination rate หรือ U_R)เท่ากับสมการ(4.3)ลบด้วยสมการ(4.5) เป็นดังนี้

$$U_R = \beta(np - n_i^2) \quad (4.6)$$

เวลาที่ใช้ในกระบวนการนี้แทนด้วย τ_{rad} ตามสมการ

$$\tau_{rad} = \frac{1}{B(p_0 + n_0 + \Delta n)} \quad (4.7)$$

เมื่อ B คือสัมประสิทธิ์ของการรวมตัวแบบเปล่งแสง(Radiative recombination coefficient)

สำหรับซิลิกอน จะมี $B = B_{rad} + B_T$ โดยที่ B_{rad} เป็นสัมประสิทธิ์ของการรวมตัวแบบเปล่งแสง มีค่า $2 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และ B_T เป็นสัมประสิทธิ์ของการรวมตัวแบบเปล่งแสงในกระบวนการออเจอร์ที่มีแท็ปร่วมช่วย (Trap-assisted Auger radiative recombination coefficient) มีค่า $1 \times 10^{-15} - 9 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ โดยที่ค่าเวลาอายุแบบเปล่งแสง(radiative lifetime) จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของพาหะ หรืออาจจะคำนวณหาเวลาอายุของกระบวนการเปล่งแสงนี้จากสมการ

$$\tau_n = \Delta n / U_R \quad (4.8)$$

$$\tau_p = \Delta p / U_R \quad (4.9)$$

เมื่อ τ_n และ τ_p คือเวลาอายุของพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนในชนิดพีและเวลาอายุของพาหะข้างน้อยโฮลในชนิดเอ็น ตามลำดับ

เวลาอายุของกระบวนการเปล่งแสงนี้ สำหรับในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรงจะให้โฟตอนออกมาในช่วงเวลาสั้นมาก(น้อยกว่า 10^{-9} s) เหมาะที่จะใช้ทำไดโอดเปล่งแสง(Light-Emitting Diode หรือ LED) เพราะจะให้โฟตอนออกมาเป็นจำนวนมาก(แสงมาก) สำหรับในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรงจะให้โฟตอนออกมาน้อย(แสงน้อย)แต่จะทำให้อะตอมสั้นมาก ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นในผลึกและใช้เวลานาน(ระหว่าง 10^{-6} – 10^{-3} s) เหมาะที่จะใช้ทำทรานซิสเตอร์(transistors) และวงจรรวมอินทิเกรต(integrate circuits)

ขณะที่อยู่ในสมดุลเชิงความร้อน อุณหภูมิจะไปทำให้ผลึกสั้น จนกระทั่งไปทำลายพันธะที่เกิดขึ้นกับอะตอมข้างเคียง ก็จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น หรือจะกล่าวไว้ในแผนภาพแถบพลังงาน(energy band diagram) อุณหภูมิจะทำให้คู่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์สามารถกระโดดไปยังแถบคอนดักชันได้ และจะเกิดโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ เรียกกระบวนการนี้ว่า การเกิดพาหะเนื่องจากอุณหภูมิ(thermal carrier generation) แทนด้วย G_{th} สำหรับซิลิกอนที่มีช่องว่างพลังงาน 1.12 eV จะต้องใช้อุณหภูมิถึง $T = E_g / k = 12,985.5$ °K จึงจะทำให้คู่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์สามารถกระโดดไปยังแถบคอนดักชันได้ แต่ที่อุณหภูมิห้อง(ประมาณ 300 °K)จะให้พลังงานเพียง 0.025 eV เท่านั้น n_0 และ p_0 จึงมีน้อย

ในทางกลับกัน เมื่ออิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันตกลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์เรียกกระบวนการนี้ว่า การรวมตัวของพาหะ(recombination) แทนด้วย R_{th} ดังรูปที่ 4.3 (ก) ดังนั้น ภายใต้สมดุลเชิงความร้อน อัตราการเกิดของพาหะจะเท่ากับอัตราการรวมตัวของพาหะ

$$G_{th} = R_{th} \quad (4.10)$$

เมื่อไรก็ตามที่มีพาหะส่วนเกินเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง จะมีความน่าจะเป็นอย่างสูงที่คู่อิเล็กตรอนและโฮลจะมีการรวมตัวของพาหะโดยตรงเพราะว่าจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันอยู่ตรงกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จึงไม่ต้องการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของผลึก

เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสงขึ้นด้วยอัตรา G_L ดังรูปที่ 4.3 (ข) ความหนาแน่นของพาหะจะมีมากกว่าสมดุล จึงทำให้อัตราการเกิดของพาหะกลายเป็น

$$G = G_L + G_{th} \quad (4.11)$$

และเมื่อพิจารณาในชนิดเอ็น อัตราการรวมตัวของพาหะจากสมการ(4.3)กลายเป็น

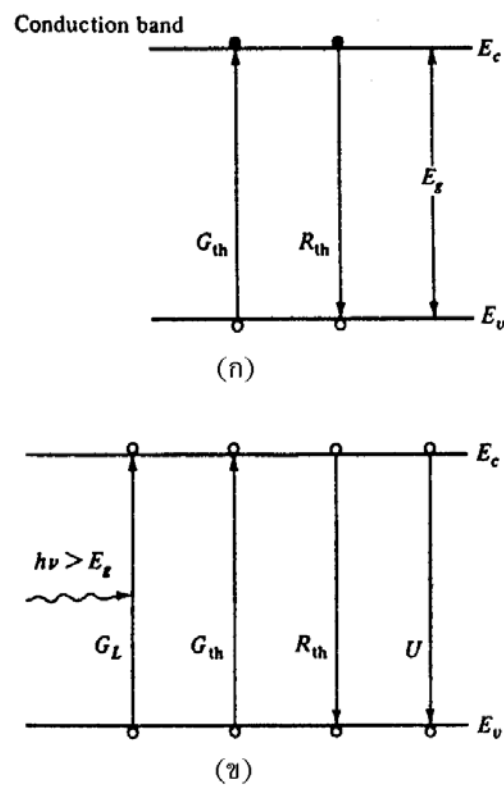
$$R_R = \beta n_n p_n = \beta (n_{n0} + \Delta n)(p_{n0} + \Delta p) \quad (4.12)$$

เมื่อ Δn และ Δp คือความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกิน(excess carrier concentration) ตามลำดับหาได้จากสมการ

$$\Delta n = n_n - n_{n0} \quad (4.13)$$

$$\Delta p = p_n - p_{n0} \quad (4.14)$$

และ $\Delta n = \Delta p$ เนื่องจากพาหะส่วนเกินที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงที่มากตกกระทบ ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลในอัตราส่วนที่เท่ากันคืออิเล็กตรอน 1 ตัวต่อโฮล 1 ตัว



รูปที่ 4.3 แสดงกระบวนการเกิดของพาหะและกระบวนการรวมตัวของพาหะ

ก) สมดุลเชิงความร้อน, ข) เมื่อมีแสงมาตกกระทบ

ดังนั้น อัตราสุทธิของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโฮล(the net rate of change of hole concentration) คือ

$$\frac{dp_n}{dt} = G - R_R = (G_L + G_{th}) - R_R \quad (4.15)$$

ที่สภาวะคงตัว(steady state), $\frac{dp_n}{dt} = 0$ จากสมการ(4.15) จะเป็น

$$G_L + G_{th} = R_R \quad (4.16)$$

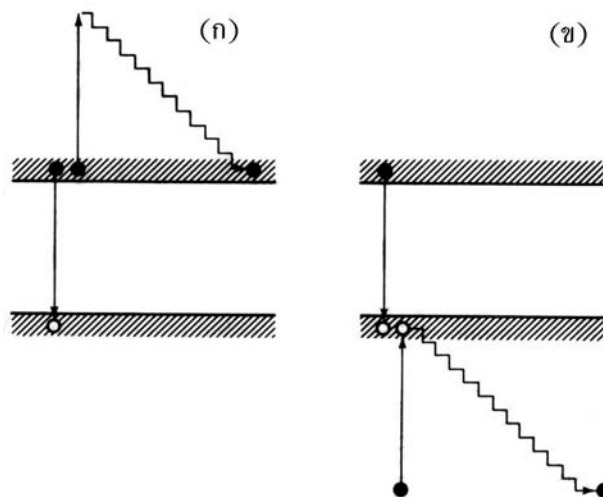
หมายความว่า ที่สภาวะคงตัว อัตราของอิเล็กตรอนที่เข้าสู่แถบคอนดักชันจะเท่ากับอัตราของอิเล็กตรอนที่ออกจากแถบคอนดักชันนั่นเอง

4.1.2 การรวมตัวกันแบบออเจอร์(Auger recombination)

กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นได้ทั้งในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรงและสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรงที่มีความหนาแน่นของการโด๊ปสูงๆ(high doping density)ประมาณ 10^{17} cm^{-3} เป็นต้นไป หรือที่มีความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินสูงๆ(high excess carrier density)ซึ่งจะทำให้เกิดมีการฉีดพาหะมาก(high injection) เนื่องจากระดับพลังงานของเฟอร์มิ(Fermi energy level หรือ E_f)อยู่ลึกเข้าไปในแถบคอนดักชันของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือระดับพลังงานของเฟอร์มิอยู่ลึกเข้าไปในแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้มีพาหะส่วนเกินเกิดขึ้นมากมาย มีโอกาสสูงที่จะเกิดการรวมตัวกับพาหะข้างมากได้ เมื่อพิจารณาระดับพลังงานของเฟอร์มิตามสมการ(4.17)และ(4.18)

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น $E_f = E_c - kT \ln(N_c/N_d) \quad (4.17)$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี $E_f = E_v + kT \ln(N_v/N_a) \quad (4.18)$



รูปที่ 4.4 แสดงกระบวนการรวมตัวกันแบบออเจอร์ของอิเล็กตรอนส่วนเกิน
ก) ในแถบคอนดักชัน, ข) ในแถบวาเลนซ์

จะเห็นว่า สมการ(4.17) เมื่อ N_d มีค่ามากกว่า N_c จะทำให้เทอมหลังด้านขวาของสมการมีค่าเป็นบวก จะได้ค่า E_f สูงกว่า E_c ในทำนองเดียวกันสมการ(4.18) เมื่อ N_a มีค่ามากกว่า N_v จะทำให้เทอมหลังด้าน

ขวาของสมการมีค่าเป็นลบ จะได้ค่า E_i ต่ำกว่า E_v จึงเป็นสาเหตุให้ระดับพลังงานของเฟอร์มิไม่ได้้อยู่ภายในช่องว่างพลังงาน จึงมีพาหะส่วนเกินในแถบคอนดักชันของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากนั่นเอง

นอกจากนี้การรวมตัวกันแบบออเจอร์ จะเกิดในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแคบ ๆ (narrow bandgap semiconductor) อีกด้วย เช่น HgCdTe ซึ่งใช้สำหรับทำหัววัดอินฟราเรด (infrared detector) เนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันอยู่ใกล้กับโฮลในแถบวาเลนซ์จึงเกิดการรวมตัวกันง่ายขึ้น

จะมีการส่งผ่านพลังงานส่วนเกินนี้อยู่ 2 กระบวนการคือ อิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชันจะไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกิน (excess energy) ออกมาให้กับอิเล็กตรอนอีกตัว (second electron) ที่อยู่ในแถบคอนดักชัน หลังจากนั้นอิเล็กตรอนตัวที่สองก็จะผ่อนคลายกลับไปสู่ระดับพลังงานเดิมในแถบคอนดักชันโดยการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟนอน ดังรูปที่ 4.4 (ก) หรืออิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชันจะไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาให้กับโฮลอีกตัว (second hole) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ ดังรูปที่ 4.4 (ข) แทนการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของแสง

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปสูง ๆ จะมีเพียงกระบวนการเดียวเท่านั้นที่โดดเด่นขึ้นมา

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปไม่สูงแต่มีการฉีดพาหะออกมาสูง ๆ จะเกิดได้ทั้งสองกระบวนการ

เวลาที่ใช้ในกระบวนการนี้แทนด้วย τ_{Auger} ตามสมการ (4.19) และ (4.20) สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ตามลำดับ

$$\tau_{\text{Auger}} = \frac{1}{C_p (p_0^2 + 2p_0 \Delta n + (\Delta n)^2)} \quad (4.19)$$

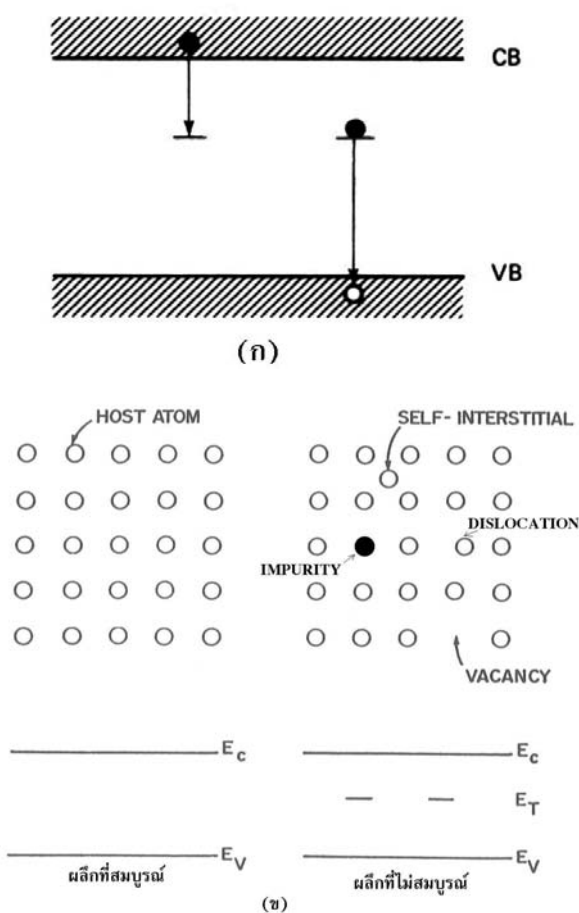
$$\tau_{\text{Auger}} = \frac{1}{C_n (n_0^2 + 2n_0 \Delta p + (\Delta p)^2)} \quad (4.20)$$

เมื่อ C_p, C_n คือสัมประสิทธิ์การรวมตัวกันแบบออเจอร์ (Auger recombination coefficient) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ตามลำดับ สำหรับซิลิกอน C_p มีค่าเท่ากับ $1.1 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ และ C_n มีค่าเท่ากับ $9 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ โดยที่เวลาอายุของการรวมตัวกันของพาหะแบบออเจอร์ (Auger lifetime) จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของพาหะข้างมากยกกำลังสอง

4.1.3 การรวมตัวกันแบบผ่านแตรป์ (Recombination through traps)

หรือเรียกอีกอย่างว่า การรวมตัวกันแบบ SRH (Shockley-Read-Hall recombination) จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (indirect bandgap) เช่น Si เป็นต้น เมื่อเวลาผ่านไป อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบคอนดักชันจะกลับมารวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์โดยตรงหรืออาจจะลงมาอยู่ในระดับพลังงานที่อยู่ในระดับพลังงานแถบต้องห้าม (forbidden band หรือ energy band gap) แล้วค่อยกลับมารวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ ดังรูปที่ 4.5 (ก) การรวมตัวกันจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปพลังงานแสงหรือพลังงานความร้อน การคายพลังงานส่วนเกินออกมาแล้วทำให้ผลึกสั่นในรูปของโฟนอน (phonon) อาจเรียกระบวนการนี้ว่า multiphonon recombination

สาเหตุทำให้เกิดระดับพลังงานแตร็ปคือ สารกึ่งตัวนำมีสารอื่นเข้ามาเจือปน(impurities)และสารกึ่งตัวนำที่มีความบกพร่อง(defects)ในผลึกอาจเนื่องมาจากการแทรกตัวของอะตอมชนิดเดียวกันอยู่ระหว่างอะตอมที่อยู่กันอย่างเป็นระเบียบ(self interstitial), การเกิดช่องว่างที่ไม่มีอะตอมอยู่(vacancy) หรือ การบิดเบี้ยวไปของผลึก(dislocation) เป็นต้น ดังรูปที่ 4.5 (ข) ซึ่งระดับพลังงานแตร็ปสามารถจับ(capture)หรือปล่อย(emission)พาหะ และจะมีผลต่อการรวมตัวกันของพาหะโดยที่อิเล็กตรอนจะถูกดักไว้ที่ระดับพลังงานของสารเจือปนในช่วงเวลาหนึ่งก่อนที่จะไปรวมตัวกับโฮล ถ้ามีการรวมตัวกันของพาหะที่ระดับพลังงานแตร็ป จะไม่มีการเปล่งแสงออกมา



รูปที่ 4.5 แสดงกระบวนการรวมตัวกันแบบผ่านแตร็ปและสาเหตุการเกิดระดับพลังงานแตร็ป

กลไกพื้นฐานของการรวมตัวของพาหะที่อาศัยแตร็ปซึ่งเสนอขึ้นโดย Shockley และ Read [7] มีอยู่ 4 ขั้นตอนคือ

- ขั้นตอนที่ 1. การจับอิเล็กตรอน(electron capture)
- ขั้นตอนที่ 2. การปล่อยอิเล็กตรอน(electron emission)
- ขั้นตอนที่ 3. การจับโฮล(hole capture)
- ขั้นตอนที่ 4. การปล่อยโฮล(hole emission)

ขั้นตอนที่ 1. การจับอิเล็กตรอน(electron capture) โดยที่อิเล็กตรอนจะตกลงมาจากแถบคอนดักชันไปยังระดับพลังงานแตริป(E_t)ที่ยังว่างและมีความหนาแน่นของแตริปเป็น N_t ดังรูปที่ 4.6(ก) จะได้อัตราการจับอิเล็กตรอน(electron capture rate หรือ R_{cn})โดยแตริป เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชัน(n)และจำนวนของแตริปที่ยังว่างที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้(N_t) ตามสมการ

$$R_{cn} = c_n N_t [1 - f(E_t)] n \quad (4.21)$$

โดยที่ c_n คือ สัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอน(capture coefficient of electrons) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของความเร็วเชิงความร้อน(thermal velocity หรือ v_{th})และพื้นที่หน้าตัดการจับอิเล็กตรอน(electron capture cross section หรือ σ_{cn}) ตามสมการ $c_n = v_{th} \sigma_{cn}$

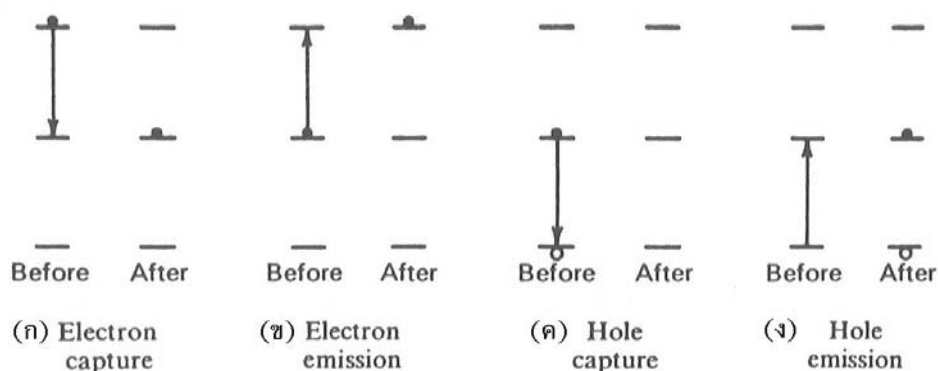
N_t คือ ความหนาแน่นของแตริปทั้งหมดในผลึก(total concentration of trapping centers)

$f(E_t)$ คือ ความน่าจะเป็นของระดับแตริปสแตตที่ถูกครอบครอง(occupied)โดยอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระดับพลังงานแตริป(E_t)ของควอนตัมสแตต(quantum state)และระดับพลังงานเฟอร์มี ตามสมการ

$$f(E_t) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_t - E_f}{kT}\right)} \quad (4.22)$$

กำหนดให้ f_p คือ ความน่าจะเป็นที่ระดับแตริปสแตตจะว่าง(unoccupied)หรือถูกครอบครองโดยโฮล ตามสมการ

$$f_p = 1 - f(E_t) = f(E_t) \exp[(E_t - E_f)/kT] \quad (4.23)$$



รูปที่ 4.6 แสดงกระบวนการรวมตัวแบบผ่านแตริป

ขั้นตอนที่ 2. การปล่อยอิเล็กตรอน(electron emission) โดยที่อิเล็กตรอนจะถูกปล่อย(emitted)ออกจากระดับพลังงานแตริปไปยังแถบคอนดักชัน ดังรูปที่ 4.6(ข) จะได้อัตราการปล่อยอิเล็กตรอน(electron emission rate)เป็นสัดส่วนกับจำนวนของแตริปที่ถูกครอบครองด้วยอิเล็กตรอน ตามสมการ

$$R_{en} = e_n N_t f(E_t) \quad (4.24)$$

โดยที่ e_n คือ สัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอน(emission coefficient of electrons)

ที่สภาพสมดุลเชิงความร้อน(thermal equilibrium) อัตราการจับอิเล็กตรอนจะเท่ากับอัตราการปล่อยอิเล็กตรอน (แทน n ด้วย n_0) ดังนั้น สมการ(4.21)จะเท่ากับสมการ(4.24)

$$R_{cn} = R_{en} \quad (4.25)$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การจับอิเล็กตรอนในเทอมของสัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอน ตามสมการ

$$e_n = n_0 c_n \left[\frac{1 - f(E_t)}{f(E_t)} \right] \quad (4.26)$$

และจากสมการ(4.22)หารด้วยสมการ(4.21) จะได้

$$\left[\frac{1 - f(E_t)}{f(E_t)} \right] = e^{(E_t - E_f)/kT} \quad (4.27)$$

แทนลงในสมการ(4.26) จะได้

$$e_n = n_0 c_n e^{(E_t - E_f)/kT} \quad (4.28)$$

เมื่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสภาพสมดุลเชิงความร้อนมีค่าเป็น

$$n_0 = U_c e^{-(E_c - E_f)/kT} \quad (4.29)$$

สมการ(4.28) จะกลายเป็น

$$e_n = U_c c_n e^{-(E_c - E_t)/kT} \quad (4.30)$$

ให้

$$n_1 = U_c e^{-(E_c - E_t)/kT} \quad (4.31)$$

เมื่อ U_c คือ ความหนาแน่นยังผลของสเตตในแถบคอนดักชัน(effective density of state in conduction band)

บางที่เขียนแทนด้วย N_c ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$U_c = N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (4.32)$$

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอน(effective mass of electrons)
จะได้สมการ(4.30)

$$e_n = n_1 c_n \quad (4.33)$$

เมื่อแทนค่า e_n ในสมการ(4.33)ลงในสมการ(4.24) จะได้อัตราการปล่อยอิเล็กตรอน จะกลายเป็น

$$R_{en} = c_n n_1 N_t f(E_t) \quad (4.34)$$

ดังนั้นอิเล็กตรอนที่มาจากแถบคอนดักชันจะถูกจับไว้ในระดับพลังงานแตริปสุทิตเป็น

$$R_n = R_{cn} - R_{en} = c_n N_t [1 - f(E_t)] n - c_n n_1 N_t f(E_t) \quad (4.35)$$

$$R_n = c_n N_t [n(1 - f(E_t)) - n_1 f(E_t)] \quad (4.36)$$

ถ้าระดับพลังงานแตริปอยู่เข้าใกล้แถบคอนดักชันมากขึ้น เทอม $E_t - E_f$ จะมีค่ามาก ทำให้ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยมีมากขึ้นด้วย และสัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเนนเชียลตามค่า $E_t - E_f$

ขั้นตอนที่ 3. การจับโฮล(hole capture) โดยที่อิเล็กตรอนจะออกจากระดับพลังงานแตริปมีความหนาแน่นเป็น N_t ไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังรูปที่ 4.6(ค) จะได้อัตราการจับโฮล(hole capture rate) ตามสมการ

$$R_{cp} = c_p N_t f(E_t) p \quad (4.37)$$

เมื่อ p คือ ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์

c_p คือ สัมประสิทธิ์การจับโฮล(capture coefficient of holes) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของความเร็วเชิงความร้อน(v_{th})และพื้นที่หน้าตัดการจับโฮล(σ_p) ตามสมการ $c_p = v_{th} \sigma_p$

ขั้นตอนที่ 4. การปล่อยโฮล(hole emission) โดยที่อิเล็กตรอนจะออกจากระดับแถบวาเลนซ์ไปยังพลังงานแตริป ดังรูปที่ 4.6(ง) จะได้อัตราการปล่อยโฮล(electron emission rate)ตามสมการ

$$R_{ep} = e_p N_t [1 - f(E_t)] \quad (4.38)$$

เมื่อ e_p คือ สัมประสิทธิ์การปล่อยโฮล(emission coefficient of holes)

ที่สภาพสมดุลเชิงความร้อน อัตราการจับโฮลจะเท่ากับอัตราการปล่อยโฮล (แทนค่า p ด้วย p_0) ดังนั้น สมการ(4.37)จะเท่ากับสมการ(4.38)

$$R_{cp} = R_{ep} \quad (4.39)$$

จะได้สัมประสิทธิ์การปล่อยโฮลในเทอมของสัมประสิทธิ์การจับโฮลดังนี้

$$e_p = p_0 c_p \left[\frac{f(E_i)}{1 - f(E_i)} \right] \quad (4.40)$$

เมื่อแทนค่าในสมการ(4.27)ลงไปจะได้

$$e_p = p_0 c_p e^{-(E_i - E_f)/kT} \quad (4.41)$$

เมื่อความหนาแน่นของโฮลในสภาพสมดุลเชิงความร้อนมีค่าเป็น

$$p_0 = U_v e^{-(E_f - E_v)/kT} \quad (4.42)$$

สมการ(4.41) จะกลายเป็น

$$e_p = U_v c_p e^{-(E_i - E_v)/kT} \quad (4.43)$$

ให้

$$p_1 = U_v e^{-(E_i - E_v)/kT} \quad (4.44)$$

เมื่อ U_v คือ ความหนาแน่นยังผลของสเตตในแถบวาเลนซ์(effective density of state in valence band)บางที่เขียนแทนด้วย N_v ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$U_v = N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (4.45)$$

เมื่อ m_h^* คือ มวลยังผลของโฮล(effective mass of holes)

จะได้สมการ(4.43)

$$e_p = p_1 c_p \quad (4.46)$$

เมื่อแทนค่า e_p ในสมการ(4.46)ลงในสมการ(4.38) จะได้อัตราการปล่อยโฮล จะกลายเป็น

$$R_{ep} = c_p p_1 N_v [1 - f(E_i)] \quad (4.47)$$

ดังนั้นอัตราการเข้าสู่แถบวาเลนซ์ของโฮลและถูกจับไว้สุทธิเป็น

$$R_p = R_{cp} - R_{ep} = c_p N_t f(E_t) p - c_p p_1 N_t [1 - f(E_t)] \quad (4.48)$$

$$R_p = c_p N_t [p f(E_t) - p_1 [1 - f(E_t)]] \quad (4.49)$$

เมื่อมีระดับพลังงานแตรัปเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำและมีพาหะส่วนเกินเกิดขึ้น ในเวลาไม่นานจะมีจำนวนของพาหะส่วนเกินเท่า ๆ กัน ($\delta n \cong \delta p$) แม้ว่าจะมีปริมาณ N_t มากหรือน้อยก็ตาม ดังนั้นอัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอนจะเท่ากับอัตราการรวมตัวของโฮลในอัตราส่วนอิเล็กตรอน 1 ตัวต่อโฮล 1 ตัว นั่นคือ

$$R_n = R_p = \frac{\delta p}{\tau} \quad (4.50)$$

เมื่อแทนค่าในสมการ(4.36)และ(4.49)ลงไปในสมการ(4.50) เพื่อหาค่า $f(E_t)$ อีกครั้งจะได้

$$f(E_t) = \frac{p c_p + n c_n}{c_n (n + n_1) + c_p (p + p_1)} \quad (4.51)$$

เมื่อแทนค่า $f(E_t)$ ลงในสมการ(4.36)หรือ(4.49)จะได้คำตอบเดียวกันคือ

$$R_n = R_p = \frac{\delta p}{\tau} = \frac{N_t c_p c_n (pn - n_i^2)}{c_n (n_0 + n_1) + c_p (p_0 + p_1)} \quad (4.52)$$

เมื่อแทน $n = n_0 + \delta p$ และ $p = p_0 + \delta p$ จะได้

$$\frac{1}{\tau} = \frac{N_t (p_0 + n_0 + \delta p)}{\frac{1}{c_p} (n_0 + n_1 + \delta p) + \frac{1}{c_n} (p_0 + p_1 + \delta p)} \quad (4.53)$$

เมื่อ $n_0 \gg \delta p$, p_0 , n_1 , p_1 สมการ(4.53) จะกลายเป็น

$$\tau = \frac{1}{c_p N_t} = \tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_t} \quad (4.54)$$

เมื่อ $p_0 \gg \delta p$, n_0 , n_1 , p_1 สมการ(4.53) จะกลายเป็น

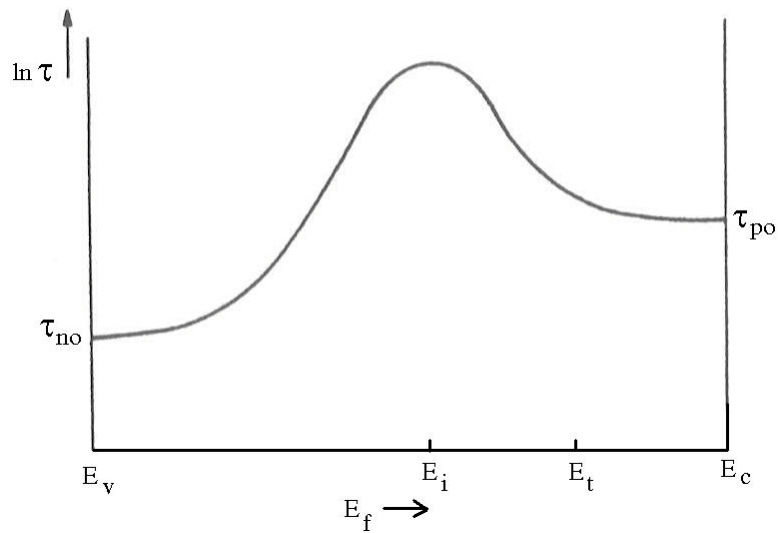
$$\tau = \frac{1}{c_n N_t} = \tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_t} \quad (4.55)$$

ค่า τ_{p0} และ τ_{n0} แสดงให้เห็นว่าในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี ที่มีการโด๊ปสูงๆ เวลาของพาหะข้างน้อยจะมีค่าเท่ากับส่วนกลับของ $c_p N_t$ และ $c_n N_t$ ตามลำดับ ซึ่งค่า τ_{p0} และ τ_{n0} จะเป็นส่วนกลับของผลคูณของ v_{th} (carrier thermal velocity), σ (capture cross-section) และ N_t (density of defects) ตามสมการ(4.54) และ(4.55) ตามลำดับ

สำหรับกรณีที่มีการฉีดพาหะน้อยๆ ($\delta p \ll p_0, n_0, p_1, n_1$) สมการ(4.53) จะกลายเป็น

$$\tau = \frac{\tau_{p0}(n_0 + n_1) + \tau_{n0}(p_0 + p_1)}{n_0 + p_0} \quad (4.56)$$

เมื่อนำสมการนี้ไปเขียนกราฟ ดังรูป 4.7 จะเห็นว่า เวลาของพาหะข้างน้อยจะมีค่ามากที่สุด เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่ใกล้บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาของพาหะกับระดับพลังงานเฟอร์มีในกระบวนการ SRH

จากสมการ(4.53) จัดรูปใหม่ จะเป็น

$$\tau = \tau_0 \left[\frac{1 + \frac{\tau_0(\tau_{p0} + \tau_{n0})\delta p}{\tau_{p0}(n_0 + n_1) + \tau_{n0}(p_0 + p_1)}}{1 + \frac{\delta p}{n_0 + p_0}} \right] \quad (4.57)$$

เมื่อ

$$\tau_0 = \frac{\tau_{p0}(n_0 + n_1) + \tau_{n0}(p_0 + p_1)}{n_0 + p_0} \quad (4.58)$$

จากสมการ(4.57) จัดรูปใหม่ให้ง่ายขึ้น จะเป็น

$$\tau = \tau_0 \left[\frac{1 + a \delta p}{1 + c \delta p} \right] \quad (4.59)$$

เมื่อ

$$a = \frac{\tau_{p0} + \tau_{n0}}{\tau_{p0}(n_0 + n_1) + \tau_{n0}(p_0 + p_1)}$$

$$b = \frac{1}{n_0 + p_0}$$

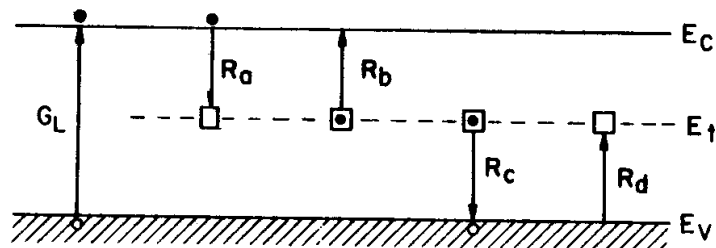
เมื่อพิจารณาถ้า $a > c$ ค่า δp เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า τ เพิ่มขึ้น ถ้า $a < c$ ค่า δp เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า τ ลดลง สำหรับ δp ที่มีค่ามาก ๆ สมการ(4.57) จะกลายเป็น

$$\tau = \tau_0 \left[\frac{\tau_{p0} + \tau_{n0}}{\tau_{p0}(n_0 + n_1) + \tau_{n0}(p_0 + p_1)} \right] (n_0 + p_0) \quad (4.60)$$

แทนค่า τ_0 จากสมการ(4.58) ลงไป จะได้

$$\tau = \tau_{p0} + \tau_{n0} = \tau_{\infty} \quad (4.61)$$

ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำอยู่ในสภาวะไม่สมดุลเชิงความร้อน(nonequilibrium) เช่น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีการให้แสง จะเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลในแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ ดังรูปที่ 4.8 จะไม่ใช่สองสมการนี้ แต่จะพิจารณาใหม่ดังนี้



รูปที่ 4.8 แสดงกระบวนการเกิดพาหะเนื่องจากแสงและการรวมตัวของพาหะ

G_L คืออัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Light generation rate) เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) จำนวนอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันจะต้องเท่ากับจำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์เสมอ หรือจะกล่าว ว่าอัตราการเกิดของพาหะจะเท่ากับอัตราอิเล็กตรอนที่ออกจากแถบคอนดักชัน และอัตราการเกิดของพาหะจะเท่ากับอัตราโฮลที่ออกจากแถบวาเลนซ์ นั่นคือ

$$\frac{dn_n}{dt} = G_L - (R_a - R_b) = 0 \quad (4.62)$$

และ

$$\frac{dp_n}{dt} = G_L - (R_c - R_d) = 0 \quad (4.63)$$

ทำนองเดียวกัน เมื่อระบบอยู่ในเงื่อนไขสภาพสมดุล(equilibrium conditions) นั่นคือ ไม่มีอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง ทำให้ $G_L = 0$ ดังนั้น $R_a = R_b$ และ $R_c = R_d$ อย่างไรก็ตาม ที่ระบบอยู่ในสภาพคงที่แต่ไม่อยู่ในสภาพสมดุล(steady state nonequilibrium conditions) นั่นคือ $R_a \neq R_b$ และ $R_c \neq R_d$ จากสมการ(4.63)และ(4.64) จะได้

$$G_L = R_a - R_b = R_c - R_d \quad (4.64)$$

เนื่องจากอิเล็กตรอน 1 ตัวสามารถครอบครองศูนย์กลางการรวมตัวได้ 1 ที่เท่านั้น เมื่อศูนย์กลางการรวมตัวได้ถูกครอบครองโดยอิเล็กตรอนแล้ว จึงไม่สามารถครอบครองอิเล็กตรอนตัวอื่นได้อีก ดังนั้นเวลาที่ใช้ในกระบวนการนี้(τ_{SRH}) จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของศูนย์กลางการรวมตัว(N_T) และพื้นที่ตัดขวางของศูนย์กลางจับพาหะ (σ) แต่ไม่ขึ้นโดยตรงกับระดับพลังงานของสารเจือปน(energy level of impurity หรือ E_T) เพราะพื้นที่ตัดขวางของศูนย์กลางจับพาหะจะมีค่าสูงสุดสำหรับสารเจือปนที่มีระดับพลังงานของสารเจือปนอยู่ใกล้กับตำแหน่งกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน และพื้นที่ตัดขวางของศูนย์กลางจับพาหะจะมีค่าต่ำสุดเมื่อระดับพลังงานของสารเจือปนอยู่ใกล้กับแถบคอนดักชันหรือแถบวาเลนซ์

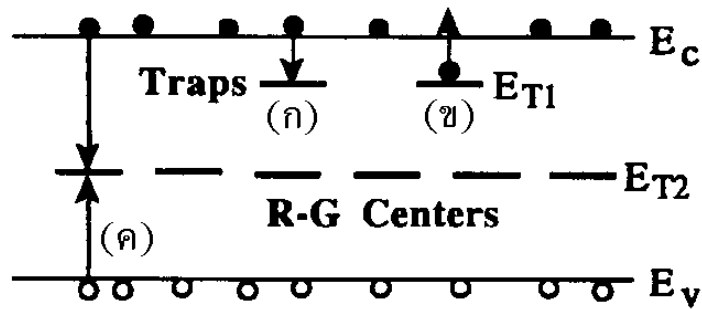
เมื่อพิจารณาผลของระดับพลังงานของสารเจือปน(E_T) และระดับการฉีดพาหะ(carrier injection level) เช่น ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มีการฉีดพาหะต่ำ(low-level injection) จะมีความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกิน(excess minority carrier density(Δn)) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกินข้างมากที่สภาพสมดุล(equilibrium majority carrier density(p_0)) นั่นคือ

$$\Delta n = \Delta p \ll p_0$$

ที่การฉีดพาหะสูง(high-level injection) จะความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกิน(Δn) มีค่ามากเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกินข้างมากที่สภาพสมดุล(p_0) นั่นคือ

$$\Delta n = \Delta p \gg p_0$$

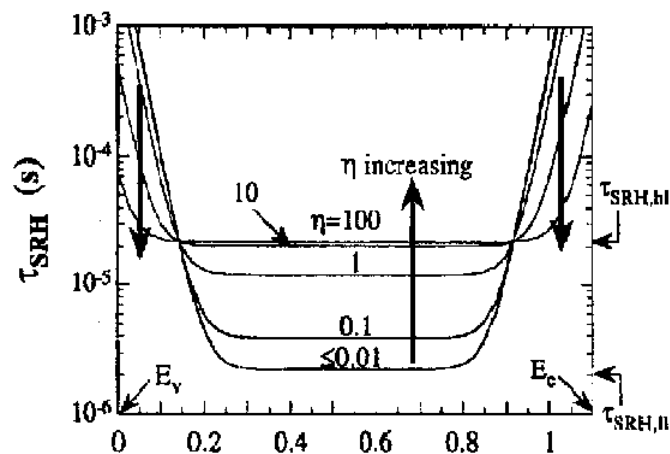
การแทร์ป(trapping)เป็นกระบวนการดักจับ(capture)อิเล็กตรอนไวซ์ชั่วคราวที่ระดับพลังงานของสารเจือปน ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นในช่องว่างพลังงานที่มีระดับพลังงานแตร็ป
 ก) การดักจับ(capture)
 ข) การส่งออกไป(emission)
 ค) การรวมพาหะ(recombination)

อิเล็กตรอนจะถูกจับไว้ที่ระดับพลังงานของสารเจือปน(E_{T1}) ดังรูปที่ 4.9 (ก) และอิเล็กตรอนยังสามารถกลับไปยังแถบคอนดักชันเนื่องจากอุณหภูมิ(thermal emission) ได้อีกด้วย ดังรูปที่ 4.9 (ข) ส่วนระดับพลังงานที่มีการรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลในช่องว่างพลังงาน(E_{T2}) ดังรูปที่ 4.9 (ค) จะเรียกระดับพลังงานนี้ว่า ศูนย์กลางการรวมตัว/การเกิด(recombination/generation (R-G) center) แทนคำว่าแตร็ป(trap)

พิจารณาผลของระดับพลังงานสารเจือปน(E_T)และระดับของการฉีดพาหะต่อค่า τ_{SRH} ดังกราฟในรูปที่ 4.10 โดย $\eta = \Delta n/p_0$



รูปที่ 4.10 แสดงค่าเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH (τ_{SRH})
 เมื่อระดับการฉีดพาหะ(η)เปลี่ยนไป [17]

สำหรับกรณีที่มีการฉีดพาหะต่ำๆ จะมีเวลาอายุของพาหะข้างน้อย $\tau_{SRH}(II)$ เป็น

$$\tau_{SRH}(II) \approx \tau_p(n_1/p_0) + \tau_n(1+p_1/p_0) \quad (4.65)$$

เมื่อ $n_0 \ll n_1$ และ $n_0 \ll p_0$ สมการ (4.65) จะเป็น

$$\tau_{SRH}(II) \approx \tau_n \quad (4.66)$$

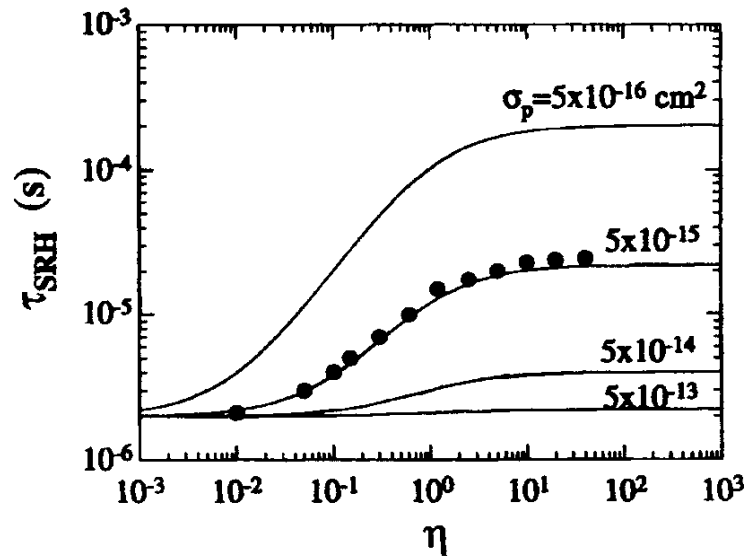
จากรูปที่ 4.10 สำหรับการฉีดพาหะต่ำๆ จะมี $\eta = \Delta n/p_0 \ll 0.01$ จะเห็นได้ว่าระดับพลังงานของสารเจือปนที่มีค่าเข้าใกล้ขอบของช่องว่างพลังงานจะมีค่า τ_{SRH} เพิ่มขึ้นตามค่า $\eta \tau_{SRH}$

สำหรับกรณีที่มีการฉีดพาหะสูงๆ เมื่อ $\Delta n = \Delta p \gg p_0, n_0, p_1$ และ n_1 จะมีค่าเวลาอายุของพาหะข้างน้อยกรณีที่มีการฉีดพาหะสูงๆ แทนด้วย $\tau_{SRH}(hl)$ เป็น

$$\tau_{SRH}(hl) \approx \tau_n + \tau_p \quad (4.67)$$

ซึ่งจะเป็นสมการเดียวกับสมการ(4.61)

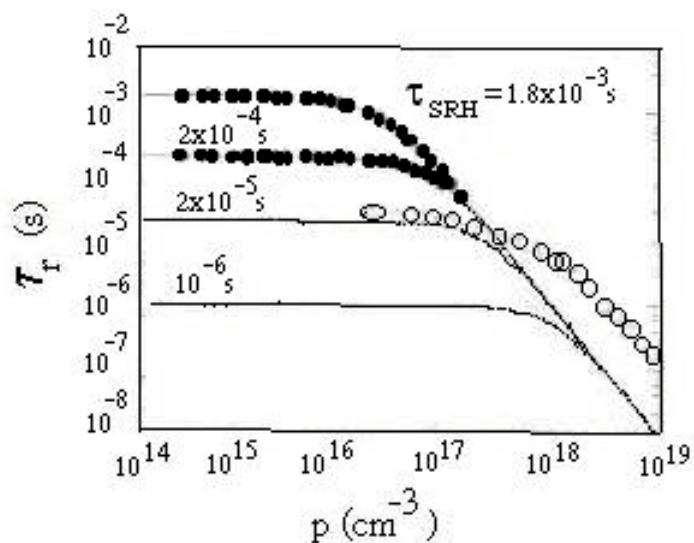
ภายใต้เงื่อนไขตามสมการ (4.54) และ (4.55) ค่า τ_{SRH} จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพื้นที่ตัดขวางของศูนย์กลางจับพาหะลดลงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงค่าเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH (τ_{SRH}) กับพื้นที่ตัดขวางของศูนย์กลางจับพาหะ(η) [17]

ดังนั้นเวลาอายุทั้งหมดของการรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮล(recombination lifetime)เนื่องจากกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นพร้อมๆกัน จะมีสมการเป็นดังนี้

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \quad (4.68)$$



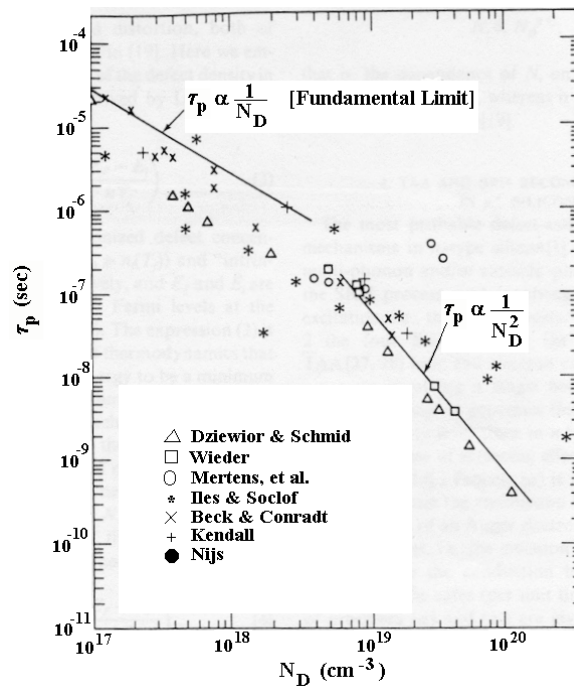
รูปที่ 4.12 แสดงเวลาอายุการรวมตัวของพาหะกับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

จากรูปที่ 4.12 ที่ความหนาแน่นของพาหะข้างมากสูง ๆ (high carrier density) เวลาอายุของการรวมตัวของพาหะจะถูกควบคุมโดยกระบวนการออเจอร์ และที่ความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่ำ ๆ (low carrier density) เวลาอายุของการรวมตัวของพาหะจะถูกควบคุมโดยกระบวนการ SRH [17] สำหรับกระบวนการแบบเปล่งแสง ส่วนมากจะไม่มีบทบาทในซิลิกอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำแบบไม่ตรงแต่จะมีความสำคัญในสารกึ่งตัวนำแบบตรง ดังนั้นสมการ(4.68) จะเป็น

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \quad (4.69)$$

กระบวนการ SRH จะเกิดขึ้นมากในสารที่มีความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่ำ ๆ ส่วนกระบวนการออเจอร์ จะเกิดขึ้นมากในสารที่มีความหนาแน่นสูง ๆ

สำหรับซิลิกอนที่ถูกโด๊ปสูง ๆ (highly doped silicon) เขียนแทนด้วย n^+ หรือ p^+ มีความสัมพันธ์ตามสมการ(4.70) และ (4.71)



รูปที่ 4.13 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีการโด๊ปสูงๆ (n^+ และ n^{++}) [18]

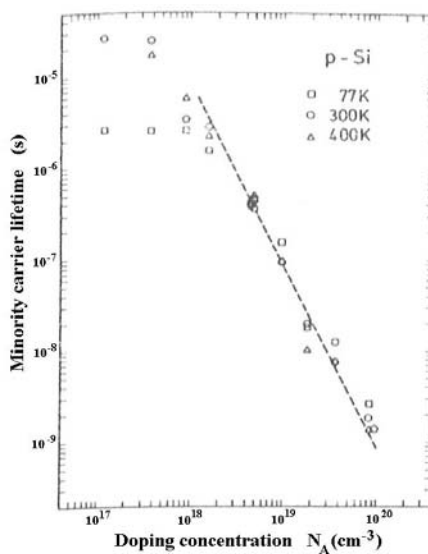
$$\tau_n = \frac{1}{C_n N_A} \quad (4.70)$$

และ

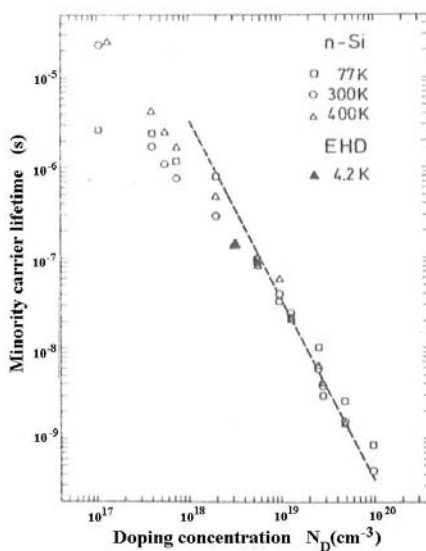
$$\tau_p = \frac{1}{C_p N_D} \quad (4.71)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ถ้าความหนาแน่นของพาหะข้างมาก(N_A)มีค่ามากกว่า 10^{18} cm^{-3} (n^{++}) เวลาอายุของพาหะข้างน้อย(τ_n)จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของพาหะข้างมากยกกำลังสองตามสมการ

$$\tau_n = \frac{1}{C_n N_A^2} \quad (4.72)$$



รูปที่ 4.14 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีการโด๊ปสูงๆ (p^{++}) [11]



รูปที่ 4.15 แสดงเวลาอายุพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีการโด๊ปสูงๆ (n^{++}) [11]

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ถ้าความหนาแน่นของพาหะข้างมาก(N_D)มีค่ามากกว่า 10^{18} cm^{-3} (p^{++}) เวลาอายุของพาหะข้างน้อย(τ_p)จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของพาหะข้างมากยกกำลังสองตามสมการ

$$\tau_p = \frac{1}{C_p N_D^2} \quad (4.73)$$

โดยที่ สัมประสิทธิ์ออเจอร์(Auger coefficient)ของโฮล $C_p = 1-3 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$
 สัมประสิทธิ์ออเจอร์(Auger coefficient)ของอิเล็กตรอน $C_n = 1 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปสูงๆ (มากกว่า 10^{18} cm^{-3}) เวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจะแปรผกผันกับความหนาแน่นของการโด๊ปของพาหะข้างมากยกกำลังสอง [11] เช่น ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อ $N_A > 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จะได้ $\tau_n \propto p^{-2}$ ดังรูปที่ 4.14 และใน n-Si เมื่อ $N_D > 6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จะได้ $\tau_p \propto n^{-2}$ ดังรูปที่ 4.15

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.14 ที่จุด $(10^{19} \text{ cm}^{-3}, 9 \times 10^{-8} \text{ s})$ และ $(10^{20} \text{ cm}^{-3}, 9 \times 10^{-10} \text{ s})$ เส้นตรงนี้มีความชัน

$$G = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\ln(9 \times 10^{-10}) - \ln(9 \times 10^{-8})}{\ln(10^{19}) - \ln(10^{20})} = -2$$

นั่นคือ $y = Gx + C$ เมื่อ $y = \ln(\tau)$ และ $x = \ln(N_A)$

ดังนั้น $\ln(\tau) = \ln(N_A) + C = \ln(CN_A^{-2})$

$$\tau = CN_A^{-2}$$

จะเห็นได้ว่า $\tau \propto N_A^{-2}$

และเมื่อเทียบกับสมการ (4.72) เพื่อหาค่า C_n ที่อุณหภูมิ 300°K จะได้ $C_n = 9.9 \times 10^{-32} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$

ทำนองเดียวกันในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น พิจารณาจากรูปที่ 4.15 ที่จุด $(2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, 9 \times 10^{-7} \text{ s})$ และ $(10^{20} \text{ cm}^{-3}, 3 \times 10^{-10} \text{ s})$ เส้นตรงนี้มีความชัน

$$G = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\ln(9 \times 10^{-7}) - \ln(3 \times 10^{-10})}{\ln(2 \times 10^{18}) - \ln(10^{20})} = -2.04$$

นั่นคือ $y = Gx + C$ เมื่อ $y = \ln(\tau)$ และ $x = \ln(N_D)$

ดังนั้น $\ln(\tau) = \ln(N_D) + C = \ln(CN_D^{-2})$

$$\tau = CN_D^{-2}$$

จะเห็นได้ว่า $\tau \propto N_D^{-2}$

และเมื่อเทียบกับสมการ (4.73) เพื่อหาค่า C_p ที่อุณหภูมิ 300°K จะได้ $C_p = 2.8 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$

จากรูปที่ 4.16 แสดงกราฟสัมประสิทธิ์ออเจอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งเวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะแปรผกผันกับความหนาแน่นของการโด๊ปของพาหะข้างมากยกกำลังสองเช่นกัน ที่อุณหภูมิ 77, 300 และ 400°K สัมประสิทธิ์ออเจอร์จะมีค่าตามตาราง 4.1

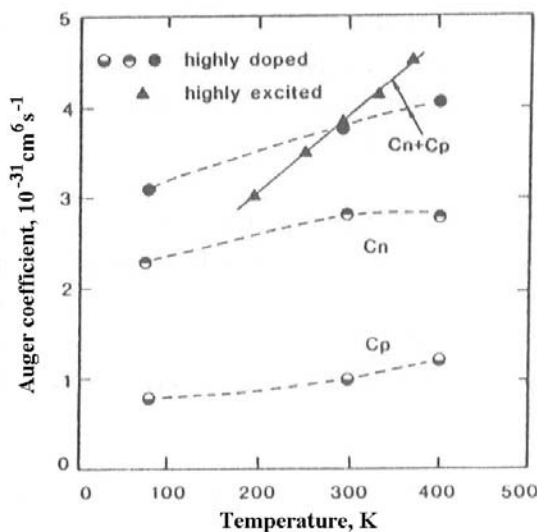
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ออเจอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ [11]

T	77 °K	300 °K	400 °K
C_n	7.8×10^{-32}	9.9×10^{-32}	1.2×10^{-31}
C_p	2.3×10^{-31}	2.8×10^{-31}	2.8×10^{-31}

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการฉีดพาหะสูงๆ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ออเจอร์เป็น

$$C_{\text{Aug}} = C_n + C_p \quad (4.74)$$

ที่อุณหภูมิ 300 °K ค่าสัมประสิทธิ์ออเจอร์ที่ได้จากการวัดสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการฉีดพาหะสูงๆ คือ $3.88 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปสูงๆ คือ $3.79 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟสัมประสิทธิ์ออเจอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

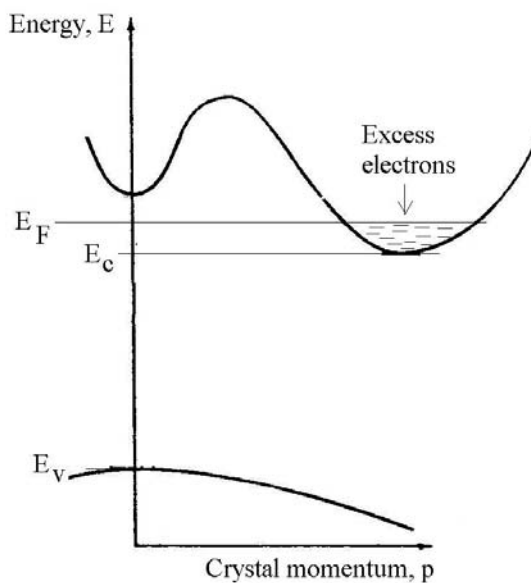
- ค่า C_p ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีการโด๊ปสูงๆ
- ค่า C_n ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีการโด๊ปสูงๆ
- ค่า $C_n + C_p$ ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีที่มีการโด๊ปสูงๆ
- ▲ ค่า $C_n + C_p$ ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีที่มีการฉีดพาหะสูงๆ

สาเหตุที่ทำให้เวลาอายุของพาหะข้างน้อยลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการโด๊ปสูงๆ ด้วยพาหะข้างมากเนื่องจากระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่สูงกว่าระดับล่างสุดของแถบคอนดักชันในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือพิจารณาจากสมการ (4.75) ในเทอมของ $\ln(N_C/N_d)$ เมื่อ $N_d > N_C$ ทำให้มีค่าเป็นลบแล้วค่า $E_F > E_C$ ทำให้มีพาหะอิสระของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นมากมาย (ส่วนที่แรงแจเป็นเส้น) ดังรูปที่ 4.17 โอกาสที่พาหะเหล่านี้จะรวมตัวกับพาหะข้างมากที่เป็นโฮลจึงมีสูงขึ้น นั่นคือเวลาอายุของพาหะข้างน้อยลดลงอย่างรวดเร็วนั่นเอง

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
$$E_F = E_C - kT \ln(N_C/N_d) \quad (4.75)$$

ทำนองเดียวกัน สารกึ่งตัวนำชนิดพีระดับพลังงานเฟอร์มีจะอยู่ต่ำกว่าระดับสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ตามสมการ (4.76)

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$$E_F = E_V + kT \ln(N_V/N_a) \quad (4.76)$$



รูปที่ 4.17 แสดงระดับพลังงานเฟอร์มิเมื่อมีการโด๊ปสูงๆในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

4.2 อัตราการรวมตัวของพาหะ(Recombination rate)

อัตราที่อิเล็กตรอนและโฮลมารวมตัวกันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่า อัตราการรวมตัวของพาหะ(Recombination Rate) แทนสัญลักษณ์ด้วย R ตามสมการ (4.77) และ (4.78) [1] มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$

$$R = \frac{\Delta(np)}{\tau(n+p)} \quad (4.77)$$

$$\Delta(np) = np - n_i^2 \quad (4.78)$$

เมื่อ $\Delta(np)$ คือ ผลต่างของผลคูณค่าของ np ขณะมีแสงและไม่มีแสง

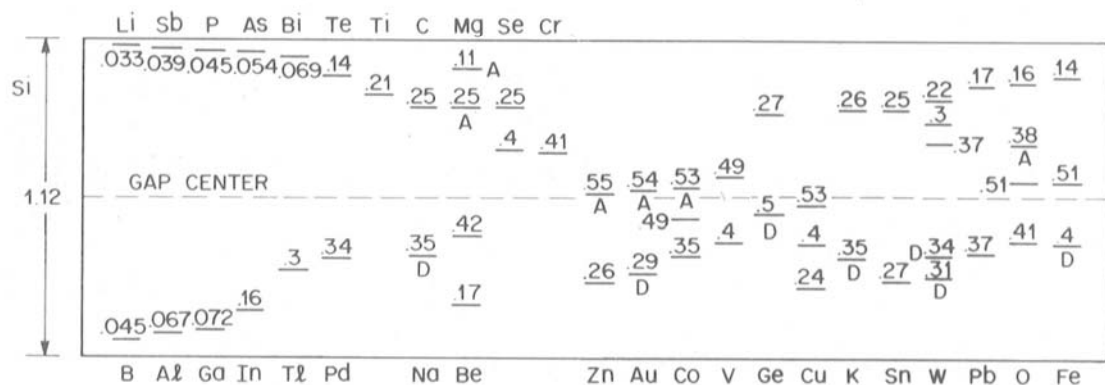
τ คือ เวลาอายุการรวมตัวกันของพาหะ โดยจะขึ้นอยู่กับ การแจกแจงของศูนย์กลางการรวมตัว (distribution of recombination center) ของแต่ละตำแหน่ง(x,y)

สำหรับเวลาอายุการรวมตัวกันของพาหะ จะขึ้นอยู่กับกระบวนการรวมตัวกันแบบ SRH และการรวมตัวกันแบบออเจอร์ ซึ่งมีเวลาอายุรวมของการรวมตัวกันของพาหะตามสมการ(4.69)

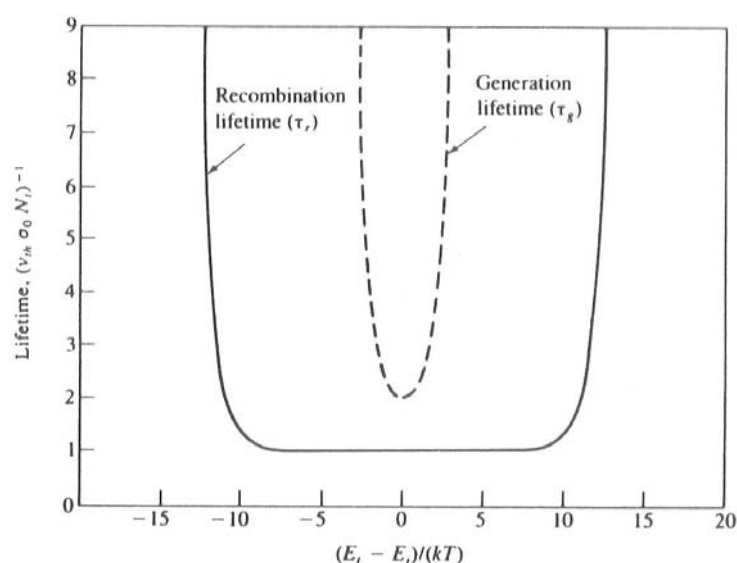
$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_{\text{SRH}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Auger}}} \quad (4.69)$$

4.3 สารเจือปน(Impurities)

เนื่องจากซิลิกอนที่มีอยู่ตามธรรมชาติหรือจากการเตรียม จะมีสารเจือปน(impurities)มากมายเข้ามาแทรกหรืออยู่แทนที่อะตอมของซิลิกอน และเป็นการยากที่จะขจัดออกไปให้หมด จึงทำให้เกิดมีระดับพลังงานของสารเจือปนเหล่านี้เกิดขึ้นในแถบช่องว่าง(bandgap) เรียกว่า ระดับพลังงานแตรป(Trap energy level) หรือ ระดับพลังงานสารเจือปน(impurity energy level หรือ E_T) ดังรูปที่ 4.18 สารเจือปนเหล่านี้ถ้ามีระดับพลังงานอยู่ใกล้กับบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานเช่น ทอง(Au) เป็นต้น ก็จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะขึ้นเป็นศูนย์กลางการรวมตัว(recombination center) ทำให้พาหะข้างน้อยไม่สามารถข้ามไปยังฝั่งตรงกันข้ามได้เกิดการรวมตัวกับพาหะข้างมากขึ้น แต่ถ้าสารเจือปนเหล่านี้มีระดับพลังงานอยู่ใกล้ขอบของช่องว่างพลังงานเช่น ฟอสฟอรัส(P)มีระดับพลังงานห่างจากแถบคอนดักชัน 0.045 eV เป็นต้น จะเป็นที่พักชั่วคราวของอิเล็กตรอน โอกาสที่จะรวมตัวกับโฮลที่ระดับพลังงานนี้มีน้อยมากเนื่องจากโฮลต้องใช้พลังงานจากแถบวาเลนซ์ถึง $1.12 - 0.045 = 1.075$ eV จึงจะมารวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานนี้ได้



รูปที่ 4.18 แสดงระดับพลังงานสารเจือปนในซิลิกอน [16]

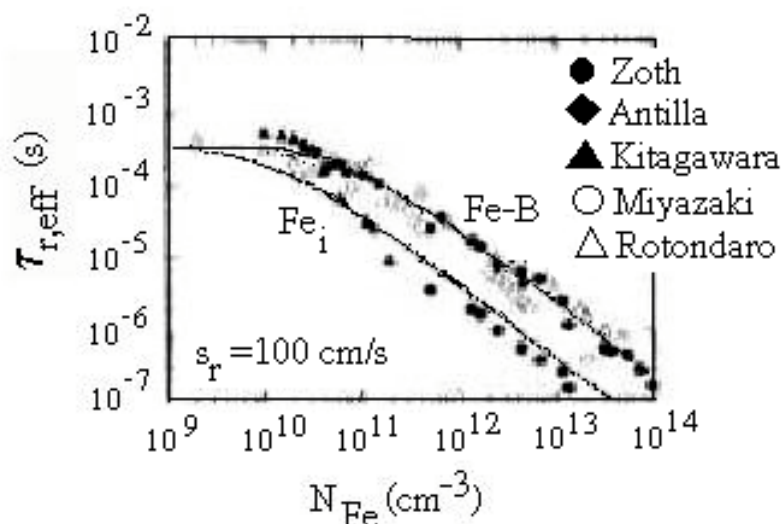


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อยและระดับพลังงานสารเจือปน

เนื่องจากระดับพลังงานสารเจือปนเหล่านี้มีผลต่อเวลาอายุของพาหะข้างน้อย ดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า เวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อระดับพลังงานสารเจือปนอยู่ใกล้ๆ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน เช่น Au ซึ่งมีระดับพลังงานห่างจากแถบคอนดักชัน 0.54 eV หรือ อยู่ห่างจากบริเวณกึ่งกลาง 0.02 eV จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะข้างน้อยในอัตราที่มากที่สุด

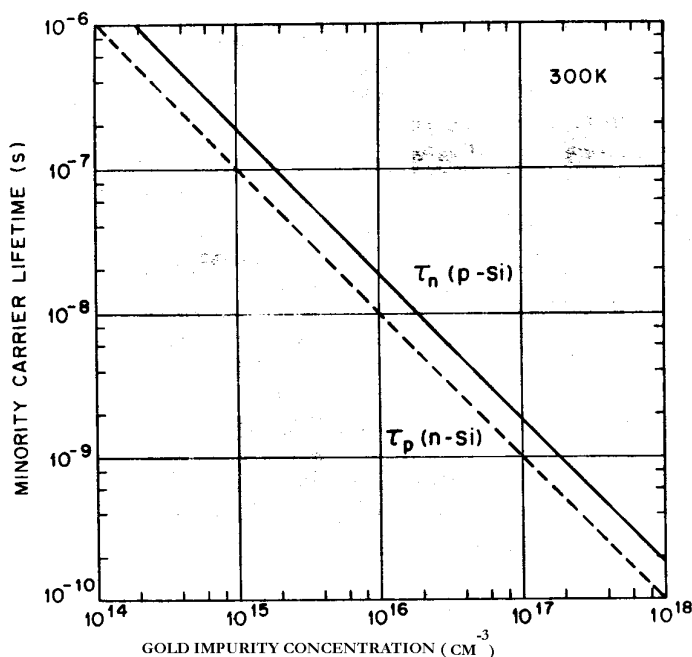
นอกจากระดับพลังงานสารเจือปนจะมีผลต่อเวลาอายุของพาหะข้างน้อยแล้ว ปริมาณการฉีดพาหะ(η)และความหนาแน่นของพาหะข้างมาก ก็มีผลต่อเวลาอายุของพาหะข้างน้อยเช่นกัน

สารเจือปนที่สำคัญในผลึกของซิลิกอนคือ เหล็ก(Fe) ซึ่งมีผลต่อเวลาอายุของพาหะข้างน้อยในกระบวนการรวมตัวกันของพาหะ ดังรูปที่ 4.20 ถ้าเหล็กมีปริมาณมากกว่า 10^{10} cm^{-3} จะทำให้เวลาอายุของพาหะข้างน้อยมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว จะเกิดอัตราการรวมตัวของพาหะสูงขึ้น ดังนั้นจะต้องขจัดเหล็กออกจากซิลิกอนให้เหลือน้อยๆ จึงจะทำให้ค่าอัตราการรวมตัวของพาหะที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยๆ จึงต้องลดปริมาณของสารเจือปนเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุดเพราะสารเหล่านี้เป็นสาเหตุของการเกิดระดับแทร็ปที่อยู่ลึกในช่องว่างพลังงาน สามารถจับพาหะข้างมากได้และเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะด้วย ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง



รูปที่ 4.20 แสดงเวลาอายุการรวมตัวของพาหะข้างน้อยที่มีสารเจือปนเหล็กในซิลิกอน [17]

สารเจือปนเป็นจำนวนมากที่มีระดับพลังงานอยู่ใกล้กับบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะมีผลต่อเวลาอายุในการรวมตัวของพาหะ เช่น ทอง(Au) จะมีระดับพลังงานที่เป็นแอ็คเซ็ปเตอร์สเตต (acceptor state) ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ $E_i - E_i = 0.02 \text{ eV}$ และเมื่อความหนาแน่นของสารเจือปนนี้มีมากขึ้น จะทำให้เวลาอายุของพาหะข้างน้อยลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อยกับความเข้มข้นของสารเจือปนทอง [19]

จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของทองเพิ่มขึ้นจาก 10^{14} cm^{-3} เป็น 10^{18} cm^{-3} ทำให้ เวลาอายุของพาหะข้างน้อยลดลงจาก $1 \text{ } \mu\text{s}$ เป็น 0.1 ns

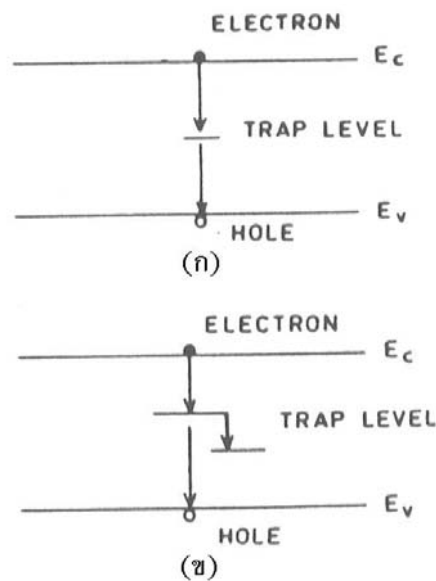
เมื่อมีสารเจือปน หรืออะตอมของสารกึ่งตัวนำเกิดบกพร่อง(crystal defect)อาจเนื่องมาจากการบิดไปของอะตอม(dislocation) จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดระดับพลังงานที่อยู่ใกล้บริเวณกึ่งกลางในช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเรียกระดับพลังงานนี้ว่า ระดับพลังงานลึก(deep energy level) มีผลทำให้พาหะอิเล็กตรอนอิสระ(free electron carrier)ถูกดักจับก่อนที่จะไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์

กระบวนการนี้อาจจะมีศูนย์กลางการรวมตัวหนึ่งระดับ(single level recombination center) ดังรูปที่ 4.22(ก) หรืออาจจะมีศูนย์กลางการรวมตัวหลายระดับ(multilevel recombination center) ดังรูปที่ 4.22(ข) แม้จะมีระดับพลังงานลึกอยู่หลายระดับ แต่จะเพียงระดับพลังงานเดียวเท่านั้นที่สำคัญและโดดเด่นขึ้นมา โดยใช้แบบจำลองของ Shockley-Read-Hall

สำหรับเวลาอายุการรวมตัวของพาหะในเนื้อสาร(bulk recombination lifetime หรือ τ_r) จะไม่ขึ้นกับเวลาอายุการรวมตัวของพาหะที่ผิว(surface recombination lifetime หรือ τ_s) แต่จากการวัดค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะรวมนั้นเป็นค่ารวมแบบยังผลของทั้งสองอย่าง(effective recombination lifetime หรือ $\tau_{r,\text{eff}}$) ตามสมการ

$$\frac{1}{\tau_{r,\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_s} \quad (4.79)$$

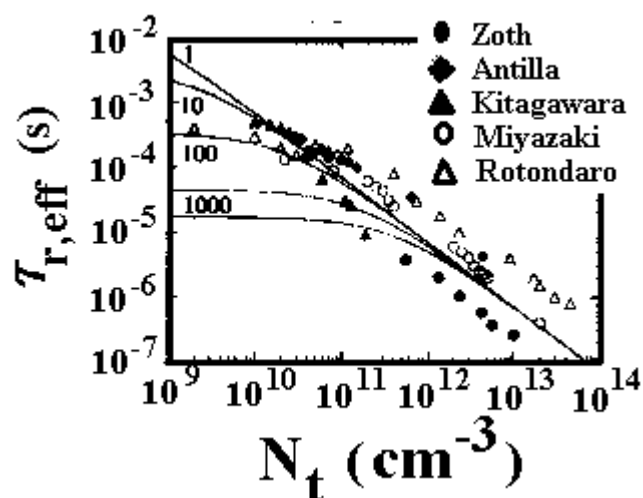
เมื่อนำสมการนี้มาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 แสดงการรวมตัวของพาหะที่ระดับพลังงานเล็ก [10]

(ก) ศูนย์กลางการรวมตัวหนึ่งระดับ

(ข) ศูนย์กลางการรวมตัวหลายระดับ



รูปที่ 4.23 แสดงค่าเวลาอายุการรวมตัวยังผลที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารเจือปน [17]

สำหรับสารเจือปนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 10^{12} cm^{-3} ค่าอัตราเร็วของการรวมตัวกันที่ผิว (surface recombination velocity หรือ s_r) จะต้องมีค่าน้อยมาก ค่าที่วัดได้จึงจะใกล้เคียงค่าจริงของเวลาอายุการรวมตัวของพาหะมากที่สุด

เมื่อสารเจือปนมีความหนาแน่นมาก ๆ เวลาในการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารจะมีอิทธิพลมากกว่าที่ผิว และเช่นเดียวกันเมื่อสารเจือปนมีความหนาแน่นต่ำ ๆ เวลาอายุในการรวมตัวของพาหะยังผลจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเจือปน (N_t) แต่จะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการรวมตัวกันที่ผิว (s_r) เวลาของพาหะยังผลจะมีค่าน้อยเมื่ออัตราเร็วของการรวมตัวกันที่ผิวมีค่ามากทำให้เกิดอัตราการรวมตัวของพาหะเกิดขึ้นสูงมาก ดังนั้นควร

จะจัดสารเจือปนออกไปให้มากที่สุดและลดอัตราเร็วของการรวมตัวกันที่ผิวลงด้วย เพื่อลดอัตราการรวมตัวของพาหะที่จะเกิดขึ้นให้ได้มากที่สุด

4.4 สรุป

จากทฤษฎีในหัวข้อที่ผ่านมา จะนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราการรวมตัวของพาหะโดยจะพิจารณาเป็นกระบวนการรวมตัวแบบ SRH, กระบวนการรวมตัวแบบอเจอร์ และ กระบวนการรวมตัวรวม ในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

การสร้างแบบจำลอง

จะใช้โปรแกรม Fortran90 ที่ทำงานบน Linux เพื่อสร้างแบบจำลองการคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงและอัตราการรวมตัวของพาหะ โดยบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองเป็น 2 ส่วนคือ

- 5.1 การสร้างแบบจำลองของอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง
- 5.2 การสร้างแบบจำลองของอัตราการรวมตัวของพาหะ
- 5.3 สรุป

5.1 การสร้างแบบจำลองของอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง

การสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงจากพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องคือโฟตอนฟลักซ์, สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง, อัตราการสะท้อนกลับ มีขั้นตอนดังนี้

5.1.1 เตรียมข้อมูลต่างๆที่ได้จากการสืบค้น ผ่านขั้นตอนการเตรียมโดยวิธีแบบ Spline Interpolation ตามขั้นตอนที่จะกล่าวถึงในภาคผนวก ก. หาชุดสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆและความยาวคลื่นแสงตามสมการ(ก.1) โดยชุดสมการที่ได้จะนำไปหาค่าอัตราการเกิดของพาหะต่อไป

$$p_j(x) = a_{j0} + a_{j1}(x - x_j) + a_{j2}(x - x_j)^2 + a_{j3}(x - x_j)^3 \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ p แทน สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 x แทน ความยาวคลื่นแสง
 a แทน ค่าคงที่

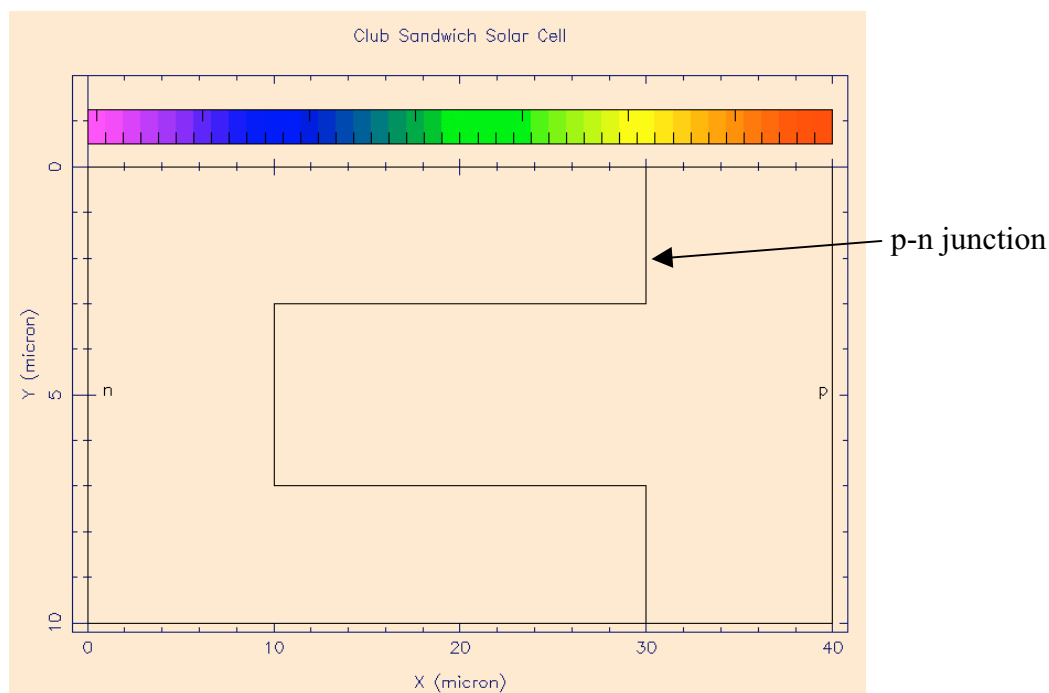
สำหรับอัตราการสะท้อนกลับ จะกำหนดให้เป็นศูนย์ เนื่องจาก สมมุติให้แสงที่มากกระทบ ถูกดูดกลืนทั้งหมด

5.1.2 เมื่อได้ชุดสมการโพลีโนเมียลตามสมการ(ก.1)แล้ว จะนำมาคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงที่บริเวณต่างๆตั้งแต่ที่ผิวลงไปในสาร โดยชุดสมการโพลีโนเมียลที่นำมาคำนวณจะต้องตรวจสอบช่วงของความยาวคลื่นที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้ ซึ่งจะต้องมีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ $1.109 \mu\text{m}$ ตามสมการ(3.3)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_{ph}} = \frac{1.24}{E_{ph}(\text{eV})} \quad \mu\text{m} \quad (3.3)$$

บริเวณต่างๆในสาร จะเก็บเป็นข้อมูลไว้เป็นบริเวณ 2 มิติคือ (x,y) มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร(μm) โดยที่ x จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง x_{max} และ y จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง y_{max} เมื่อ $y=0$ คือที่บริเวณผิวของสาร ดังรูปที่

5.1 ซึ่งเป็นแบบจำลอง “Club Sandwich Solar Cell” ใน 2 มิติ กว้าง x ลึก y สำหรับขนาดของแบบจำลอง (ค่า x_{max} และ y_{max}) สามารถกำหนดได้ในโปรแกรม



รูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลอง “Club Sandwich Solar Cell”

5.1.3 การคำนวณค่า G_y ตามสมการ(3.17) จะต้องทราบค่า $\Delta\lambda$ ที่เหมาะสม ตามขั้นตอนดังรูปที่ 5.2

$$G_y(x, y) = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} G_{rate} d\lambda \quad (3.17)$$

จากรูปที่ 5.2 เมื่อกำหนดระยะความลึก(y)และจำนวนเลขนัยสำคัญ(nofprecision)แล้ว จะเริ่มคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะของแต่ละความยาวคลื่น(G_{rate}) แล้วคำนวณหาอัตราการเกิดของพาหะของทุกความยาวคลื่น(G_y) ตั้งแต่ความยาวคลื่นที่สั้นจนถึงความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล

การคำนวณหาค่า $\Delta\lambda$ ที่เหมาะสมจากการแบ่งช่วงข้อมูลที่มีอยู่คือ ระหว่างข้อมูล λ_i และ λ_{i+1} แบ่งออกเป็น i idedived ครั้ง(เมื่อ i idedived คือจำนวนครั้งที่แบ่งช่วงข้อมูลระหว่างข้อมูล λ_i และ λ_{i+1} ค่า i idedived จะเริ่มจาก 1, 2, 3, ...) ดังนั้นกำหนดให้ G_y เป็นค่าอัตราการเกิดของพาหะของทุกความยาวคลื่นที่ความลึกใดๆ ในที่นี้จะพิจารณาที่ผิว($y=0$) โดยที่ค่าสูงสุดของ i idedived ที่ทำให้ผลต่างระหว่างค่า G_y รอบที่ i idedived - 1 กับรอบที่ i idedived ($\Delta G_y(\%)$)จากสมการ(5.2) เทียบกับค่าผลต่างต่ำสุดที่กำหนดขึ้นมาจากเลขนัยสำคัญที่ต้องการ($\Delta G_y(\%)_{\text{minimum}}$)จากสมการ(5.3) โดยกระบวนการจะสิ้นสุดเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ(5.1) นั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดของพาหะของทุกความยาวคลื่นมีค่าน้อยมาก

$$\Delta G_y(\%) < \Delta G_y(\%)_{\text{minimum}} \quad (5.1)$$

$$\Delta G_y(\%) = \frac{|G_{y,now} - G_{y,previous}|}{G_{y,now}} \times 100 \quad (5.2)$$

และ

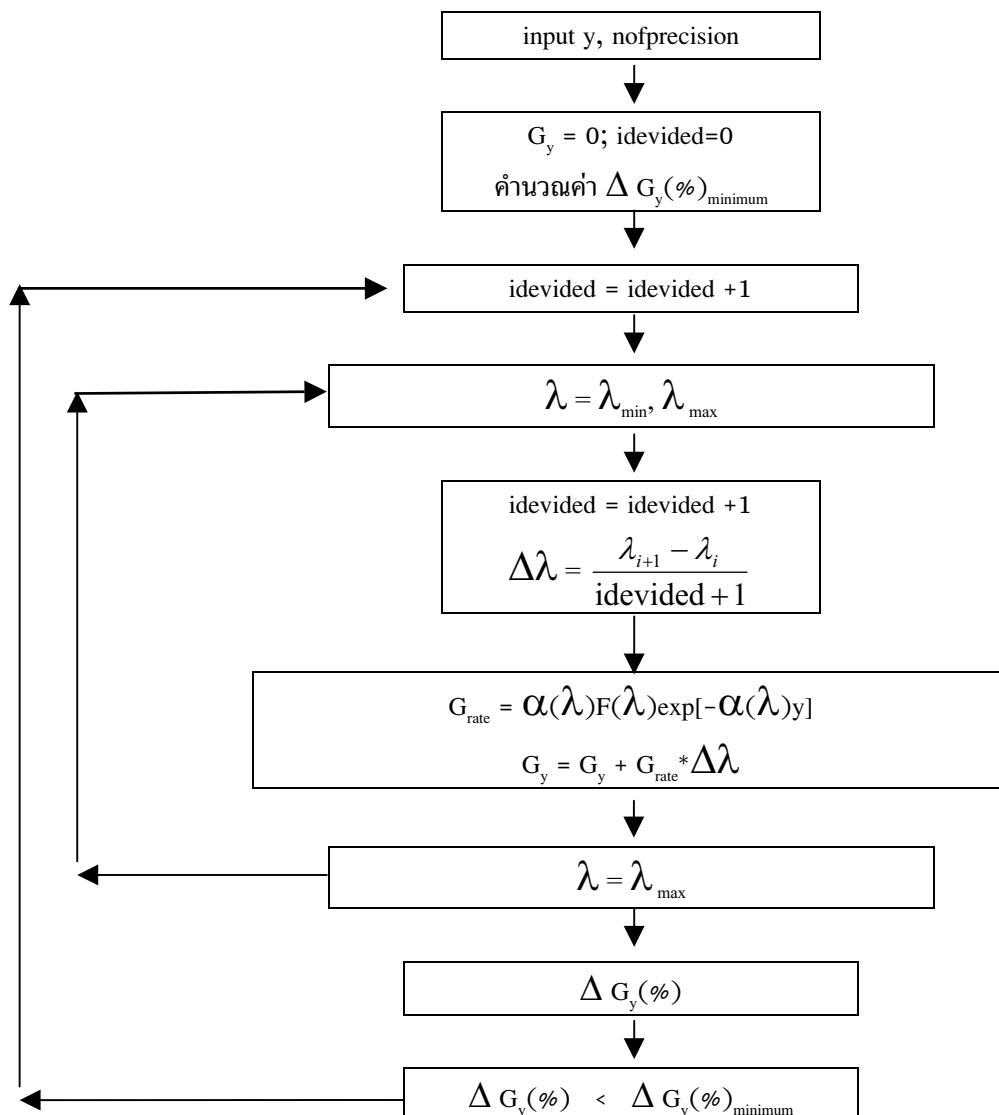
$$\Delta G_y(\%)_{\text{minimum}} = 0.5 \times 10^{2-\text{nofprecision}} \quad (5.3)$$

เมื่อ nofprecision แทน จำนวนเลขนัยสำคัญที่ต้องการ

$G_{y,now}$ แทน ค่า G_y รอบปัจจุบัน

$G_{y,previous}$ แทน ค่า G_y รอบที่แล้ว

ค่า $\Delta G_y(\%)_{\text{minimum}}$ ที่คำนวณจากสมการ(5.3) เมื่อใช้เลขนัยสำคัญต่างๆตั้งแต่ 1 เป็นต้นไป แสดงไว้ดังตารางที่(5.1) จะเห็นได้ว่า ถ้าใช้เลขนัยสำคัญมากๆ การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงจะละเอียดขึ้น ดังนั้นเลขนัยสำคัญแต่ละค่า จะให้ผลการคำนวณของค่า idevided ต่างๆกันไป ซึ่งค่า idevided นี้ จะเป็นตัวบอกค่า $\Delta \lambda$ ที่เหมาะสมต่อไป

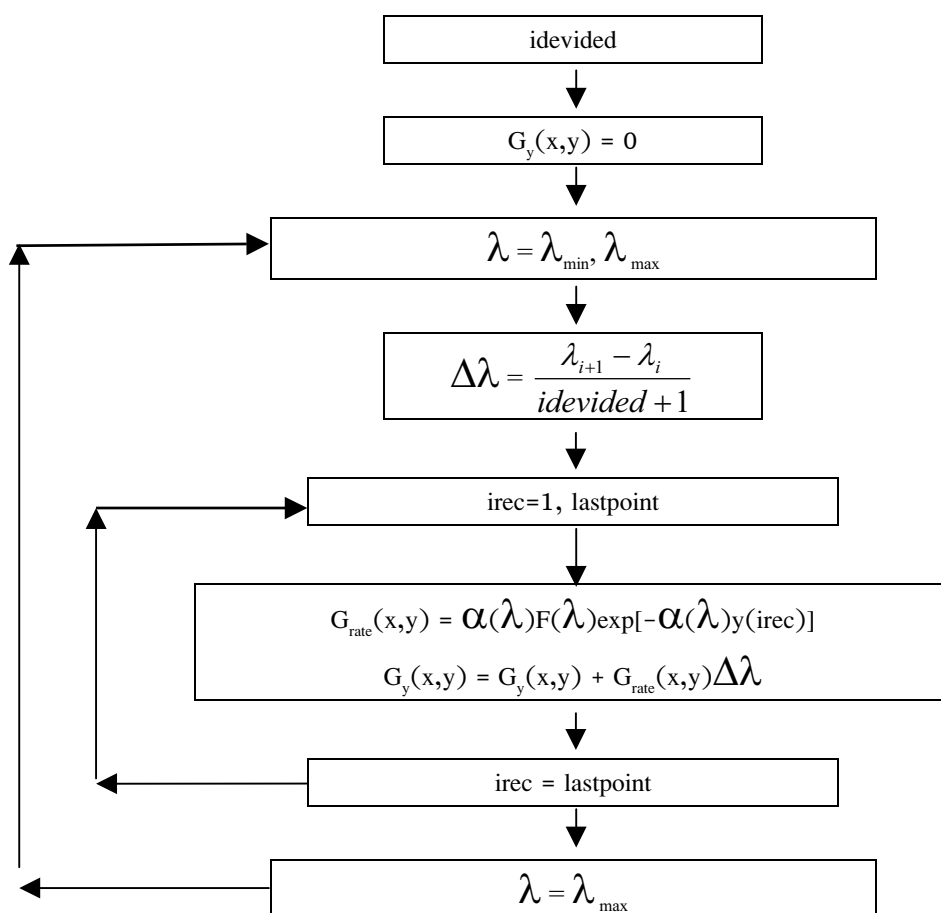


รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนการหาค่า $\Delta\lambda$ ที่เหมาะสม

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าผลต่างต่ำสุดที่กำหนดขึ้นมาจากเลขนัยสำคัญ

จำนวนเลขนัยสำคัญ(n of precision)	$\Delta G_y(\%)_{\text{minimum}}$
1	5
2	0.5
3	0.05
4	0.005
5	0.0005

5.1.4 เมื่อทราบค่า G_y โดยใช้ค่า $\Delta\lambda$ ที่เหมาะสมแล้ว จะคำนวณหาอัตราการเกิดของพาหะที่ระดับความลึกต่าง ๆ ตามสมการ(3.17) โดยใช้ข้อมูลจากแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพีเอ็นที่มีโครงสร้างแบบ“คลัสแซนวิช”มาคำนวณค่า G_n และ G_p ในแบบจำลอง 2 มิติที่ทราบตำแหน่ง(x,y) ซึ่งมีค่าเท่ากันตามสมการ(3.19) ตามขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 5.3 แสดงขั้นตอนการหาค่าอัตราการเกิดของพาหะในแบบจำลองที่ตำแหน่งต่างๆ

จากรูปที่ 5.3 ข้อมูลในแบบจำลองแบบ“คลับแซนวิช”จะเก็บไว้ในตำแหน่ง(x,y)ที่มีหมายเลขที่แสดงอันดับของตำแหน่งแทนด้วยตัวแปรชื่อ irec ซึ่งจะเก็บค่าของอัตราการเกิดของพาหะอิเล็กตรอน(G_n)และอัตราการเกิดของพาหะโฮล(G_p)ไว้ โดยจะคำนวณทุกความยาวคลื่นที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้

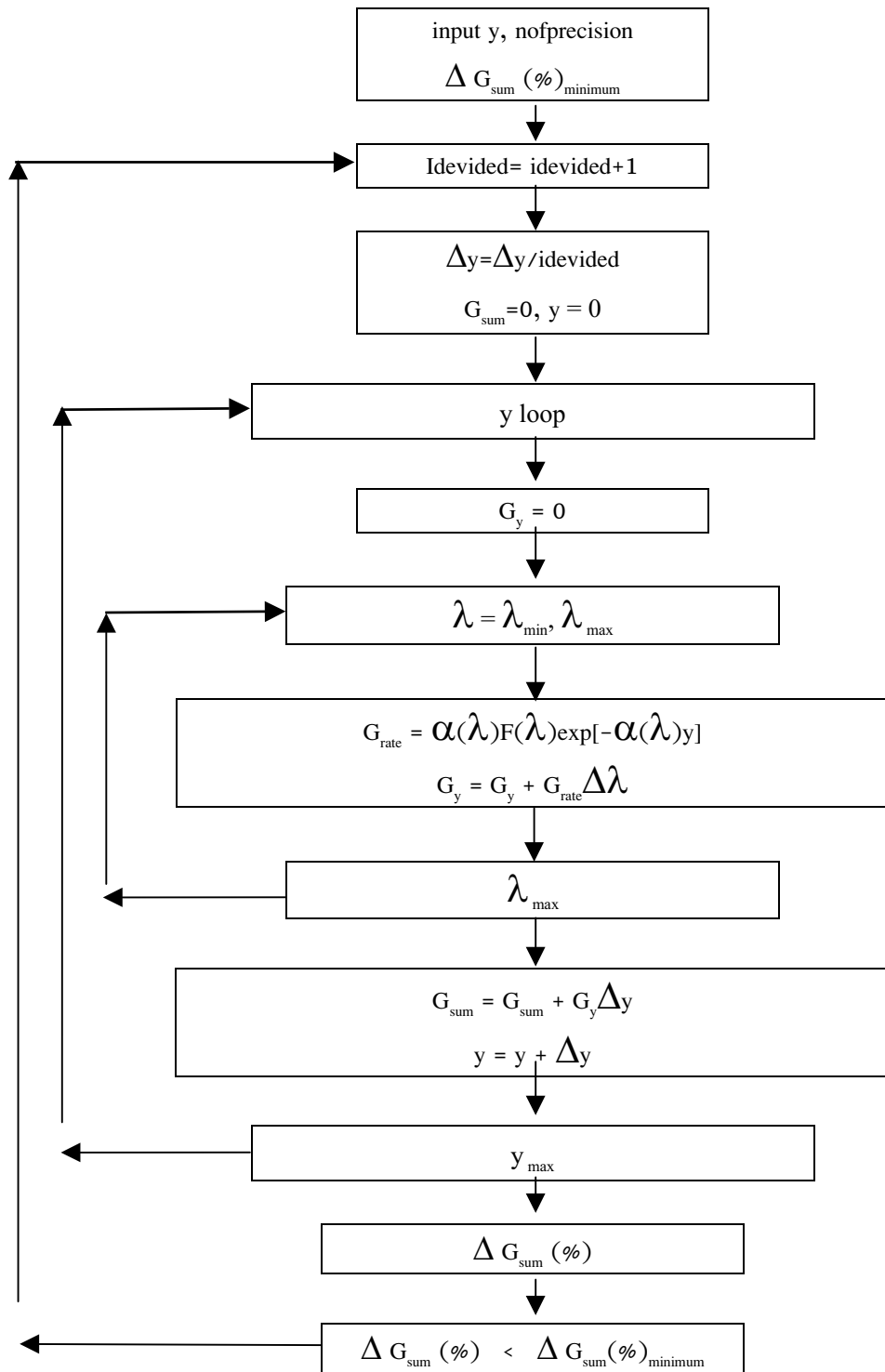
เมื่อทำการคำนวณอัตราการเกิดของพาหะเรียบร้อยแล้ว จะเก็บข้อมูลนี้ไว้สำหรับการคำนวณในแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ“คลับแซนวิช”ต่อไป โดยเตรียมไว้สำหรับที่ AM ต่าง ๆ เช่น AM0, AM1, AM1.5, และ AM2 เป็นต้น

5.1.5 การคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมหรืออัตราการเกิดของพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่(G_{sum}) ตามสมการ(3.18) จะต้องทราบค่า Δy ที่เหมาะสมเช่นกัน เนื่องจากถ้าใช้ค่า Δy กว้างเกินไปจะทำให้ได้ค่า G_{sum} ไม่ถูกต้อง จำเป็นจะต้องคำนวณค่า Δy ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองด้วย ตามขั้นตอนดังรูปที่ 5.4

$$G_{sum} = \int_{y=0}^y G_y dy \quad (3.18)$$

จากรูปที่ 5.4 การคำนวณค่า Δy ที่เหมาะสมนั้น จะต้องแบ่งค่า Δy เริ่มตั้งแต่ $1 \mu m$ จากสมการ $\Delta y = (1 \mu m) / \text{idevdiv}$ เมื่อ idevdiv มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ... เป็นต้นไป โดยเงื่อนไขการหยุดของโปรแกรมจะเป็นไปตามสมการ(5.1), (5.2), และ (5.3) ที่กำหนดความละเอียดของการเปลี่ยนแปลงจากค่าของเลขนัยสำคัญ(n of precision)

ดังนั้นเลขนัยสำคัญแต่ละค่า จะให้ผลการคำนวณของค่า idevdiv ต่าง ๆ กันไป ซึ่งค่า idevdiv นี้ จะเป็นตัวบอกค่า Δy ที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 5.4 แสดงขั้นตอนการหาค่า ΔG_{sum} และ G_{sum} ในแบบจำลองที่ตำแหน่งต่างๆ

5.2 การสร้างแบบจำลองของอัตราการรวมตัวของพาหะ

การสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

5.2.1 แบบจำลองเพื่อคำนวณค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะ

5.2.2 แบบจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราการรวมตัวของพาหะ

5.2.3 สารเจือปน

เนื่องจากกระบวนการรวมตัวของพาหะ มีพารามิเตอร์หลายอย่างที่มีผลต่อเวลาอายุของพาหะและอัตราการรวมตัวของพาหะ กระบวนการที่สำคัญมีอยู่ 2 กระบวนการด้วยกันคือ กระบวนการแบบ SRH และกระบวนการแบบออเจอร์ ดังนั้นแบบจำลองจะแยกออกพิจารณาในแต่ละกระบวนการและรวมทั้งสองกระบวนการ กำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลองของอัตราการรวมตัวของพาหะ ดังนี้

1) พื้นที่ตัดขวางของศูนย์กลางจับพาหะ(capture cross section)

$$\text{สำหรับอิเล็กตรอน} \quad \sigma_n = 5 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$$

$$\text{สำหรับโฮล} \quad \sigma_p = 5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$$

2) ความเร็วเชิงความร้อน(thermal velocity)

$$v_{th} = 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$$

3) ความหนาแน่นประสิทธิผลของสเตต(effective density of states)

$$\text{ในแถบคอนดักชัน} \quad N_c = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{ในแถบวาเลนซ์} \quad N_v = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

4) สัมประสิทธิ์ออเจอร์(Auger coefficients)

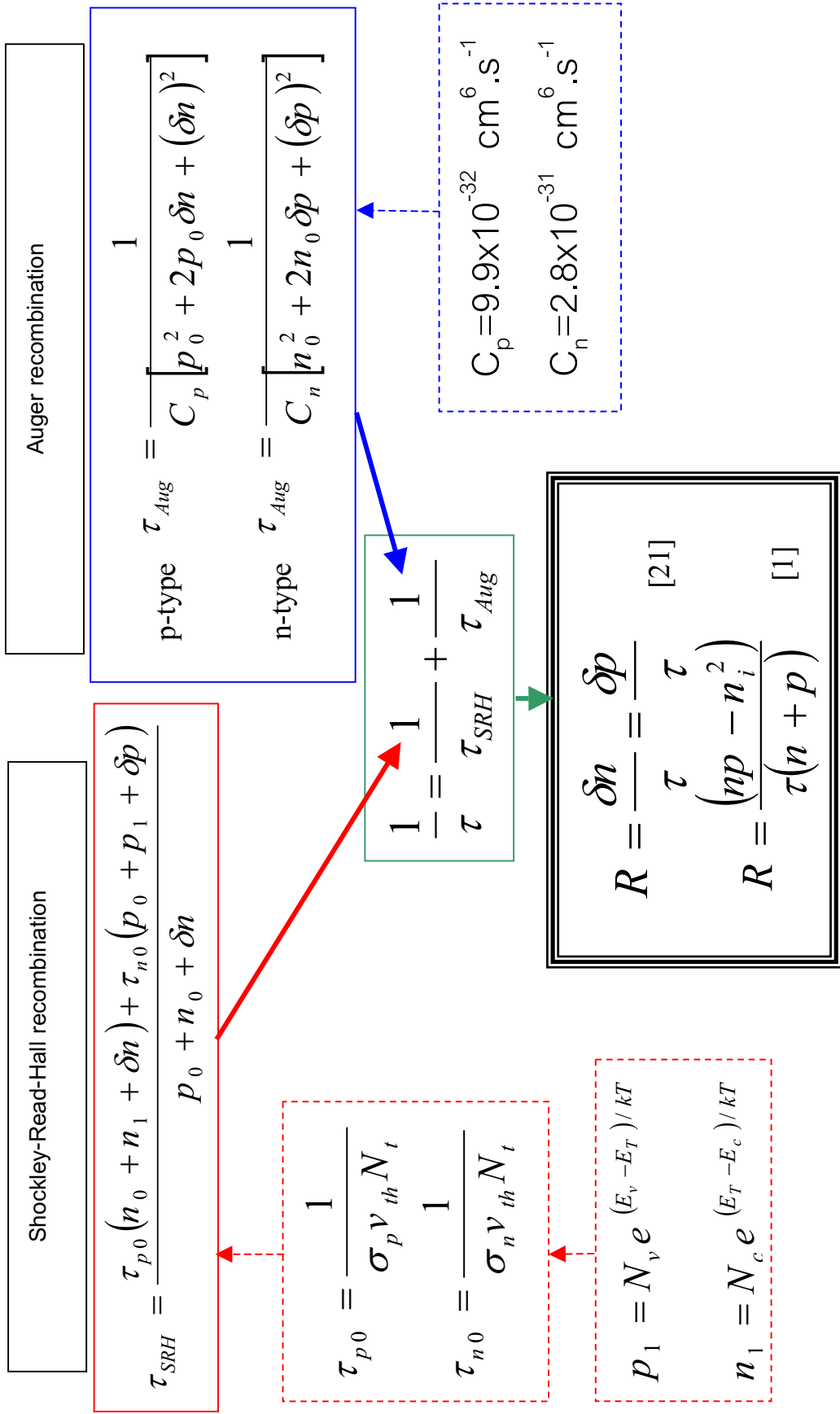
$$\text{สำหรับซิลิกอนชนิดเอ็น} \quad C_n = 2.8 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$$

$$\text{สำหรับซิลิกอนชนิดพี} \quad C_p = 9.9 \times 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s}$$

5.2.1 แบบจำลองเพื่อคำนวณค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะ

แบบจำลองเพื่อคำนวณค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการคือ กระบวนการแบบ SRH และกระบวนการแบบออเจอร์ จะพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ จากทฤษฎีและจากข้อมูลที่สืบค้น

5.2.1.1 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะจากทฤษฎี สำหรับเวลาอายุการรวมตัวของพาหะของกระบวนการแบบ SRH คำนวณได้จากสมการ(4.53)ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการนี้คือระดับพลังงานเฟอร์มิ (F_0), ระดับพลังงานของสารเจือปน(E_i), ความหนาแน่นของสารเจือปน(N_i), ความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน (η) และความหนาแน่นของการโด๊ป(n_0 หรือ p_0) สำหรับเวลาอายุการรวมตัวของพาหะของกระบวนการแบบออเจอร์ คำนวณได้จากสมการ(4.19) และ (4.20) โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ จะมีผลต่อค่าเวลาอายุของพาหะ ในกระบวนการรวมตัวต่าง ๆ แตกต่างกันไป



รูปที่ 5.5 แสดงขั้นตอนการหาค่าเวลายากการรวมตัวของพาหะและอัตราการรวมตัวของพาหะจากทฤษฎี

$$\frac{1}{\tau_{SRH}} = \frac{(p_0 + n_0 + \delta p)}{\tau_{p0}(n_0 + n_1 + \delta p) + \tau_{n0}(p_0 + p_1 + \delta p)} \quad (4.53)$$

$$\tau_{Auger} = \frac{1}{C_p(p_0^2 + 2p_0\Delta n + (\Delta n)^2)} \quad (4.19)$$

$$\tau_{Auger} = \frac{1}{C_n(n_0^2 + 2n_0\Delta p + (\Delta p)^2)} \quad (4.20)$$

สำหรับเวลาอายุรวมของการรวมตัวของพาหะจากทั้งสองกระบวนการ คำนวณจากสมการ(4.70)

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \quad (4.70)$$

จากรูปที่ 5.5 แสดงขั้นตอนการคำนวณหาค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะจากทฤษฎี ซึ่งมีกระบวนการแบบ SRH และกระบวนการแบบออเจอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง การคำนวณในแบบจำลองจะเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อเวลาอายุการรวมตัวของพาหะ

5.2.1.2 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะจากข้อมูลที่สืบทอด จะต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการสืบทอดที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อย (τ_n , τ_p) และความหนาแน่นของการโด๊ป (N_A , N_D) ตามลำดับ จากรูปที่ 5.6 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ใช้วิธี Spline interpolation ตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในภาคผนวก ก. หาชุดสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาอายุของพาหะข้างน้อยกับค่าความหนาแน่นของการโด๊ป ตามลำดับ ดังสมการ(ก.1)

$$p_j(x) = a_{j0} + a_{j1}(x - x_j) + a_{j2}(x - x_j)^2 + a_{j3}(x - x_j)^3 \quad (ก.1)$$

เมื่อ P_j แทน เวลาอายุของพาหะข้างน้อย (τ_n และ τ_p)

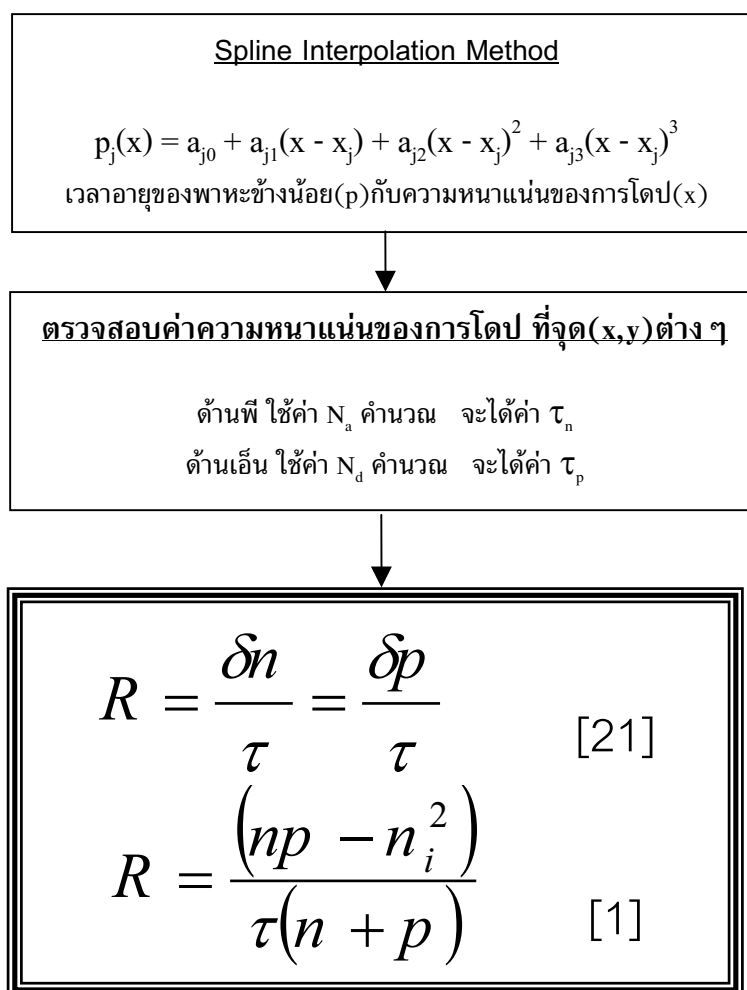
และ x แทน ความหนาแน่นของการโด๊ป (N_A และ N_D)

2. เมื่อทราบค่าความหนาแน่นของการโด๊ปที่จุด (x, y) ต่างๆในเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามีค่าเป็นเท่าไร แล้วจะได้ค่าเวลาอายุของพาหะข้างน้อย จากสมการ(6.2)

ด้านพี ใช้ค่า N_A คำนวณ จะได้ค่า τ_n

ด้านเอ็น ใช้ค่า N_D คำนวณ จะได้ค่า τ_p

เวลาอายุการรวมตัวของพาหะจากข้อมูลที่สืบทอดที่ได้ จะเป็นเวลาอายุรวมของทั้งสองกระบวนการแล้ว และจะนำไปคำนวณค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในหัวข้อ 5.2.2 ต่อไป



รูปที่ 5.6 แสดงขั้นตอนการหาค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะและอัตราการรวมตัวของพาหะจากการทดลอง

5.2.2 แบบจำลองเพื่อคำนวณค่าอัตราการรวมตัวของพาหะ

การคำนวณหาค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในแบบจำลอง จะแยกพิจารณาออกเป็นค่าอัตราการรวมตัวของพาหะจากทฤษฎีและค่าอัตราการรวมตัวของพาหะจากข้อมูลที่สืบค้น

อัตราการรวมตัวของพาหะจากทฤษฎี และอัตราการรวมตัวของพาหะจากข้อมูลที่สืบค้น จะใช้สมการเดียวกัน คือสมการที่(4.78)และ(4.79)

$$R = \frac{\Delta(np)}{\tau(n + p)} \quad (4.78)$$

$$\Delta(np) = np - n_i^2 \quad (4.79)$$

แต่จะต่างกันที่เวลาอายุการรวมตัวของพาหะ โดยที่อัตราการรวมตัวของพาหะจากทฤษฎีจะใช้สมการเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 คือสมการ(4.53), (4.19) และ (4.20) ดังรูปที่ 5.5

สำหรับอัตราการรวมตัวของพาหะจากข้อมูลที่สืบค้นจะใช้เวลาอายุการรวมตัวของพาหะจากชุดสมการโพลีโนเมียลที่เตรียมไว้ โดยวิธี Spline Interpolation จากหัวข้อ 5.2.1 ดังรูปที่ 5.6

5.2.3 สารเจือปน

จะพิจารณาผลของสารเจือปนที่มีต่อค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะในกระบวนการรวมตัวแบบต่างๆ คือ กระบวนการแบบ SRH และกระบวนการแบบฮอเจอร์ โดยจะพิจารณาจากผลของระดับพลังงานของสารเจือปน (E_T) ความหนาแน่นของสารเจือปน (N_T) และระดับการฉีดพาหะ (η) สมการที่ใช้จะเป็นสมการเดียวกันกับหัวข้อ 5.2.1

5.3 สรุป

แบบจำลองที่สร้างไว้เพื่อคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงที่ AM ต่างๆ และค่าอัตราการรวมตัวของพาหะ จะเก็บเป็นข้อมูลของตำแหน่งต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์เอาไว้ เพื่อใช้สำหรับการคำนวณในแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ “คลับแซนวิช” ต่อไป

บทที่ 6

ผลการจำลองแบบและวิเคราะห์ผล

ผลการคำนวณการเกิดของพาหะและการรวมตัวของพาหะในแบบจำลอง แยกออกเป็น 2 ส่วนคือ

6.1 การเกิดพาหะเนื่องจากแสง

6.2 การรวมตัวของพาหะ

6.1 การเกิดพาหะเนื่องจากแสง(Light generation of charge carriers)

จะพิจารณาออกเป็น

6.1.1 โฟตอนฟลักซ์(Photon flux)

6.1.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Light Absorption Coefficient)

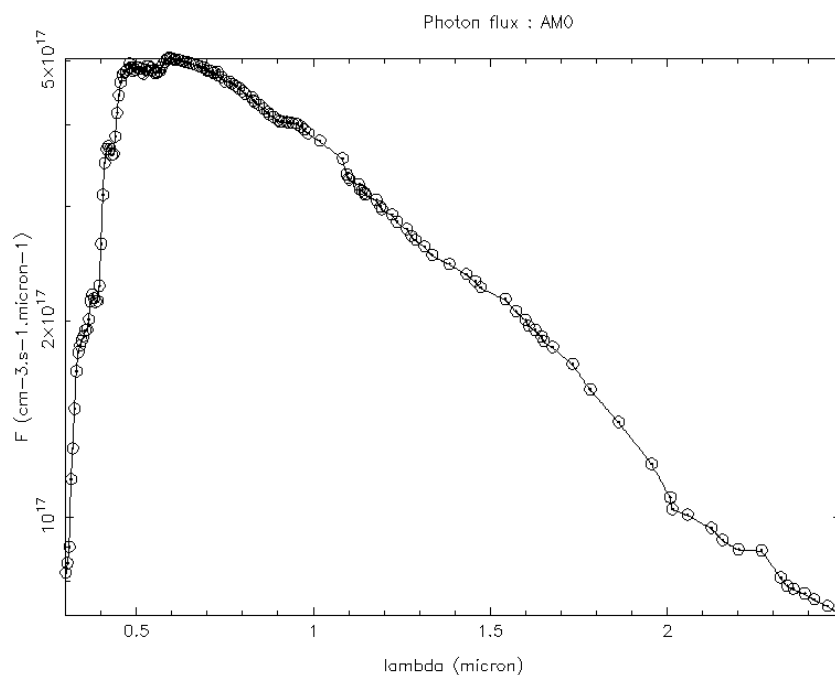
6.1.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ(Reflectivity)

6.1.4 อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Generation rate)

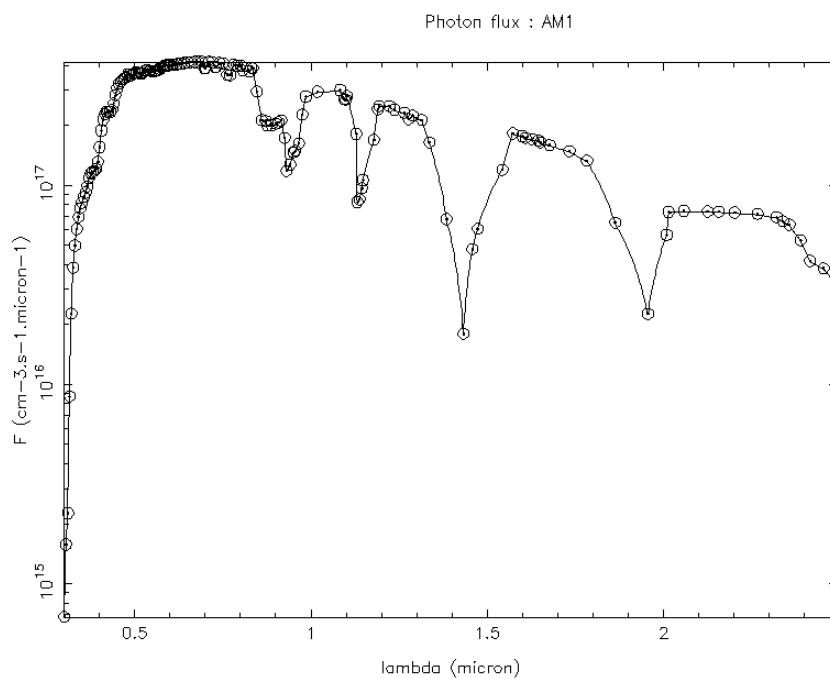
6.1.5 อัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้นและอัตราการเกิดของพาหะรวม

6.1.1 โฟตอนฟลักซ์(Photon flux)

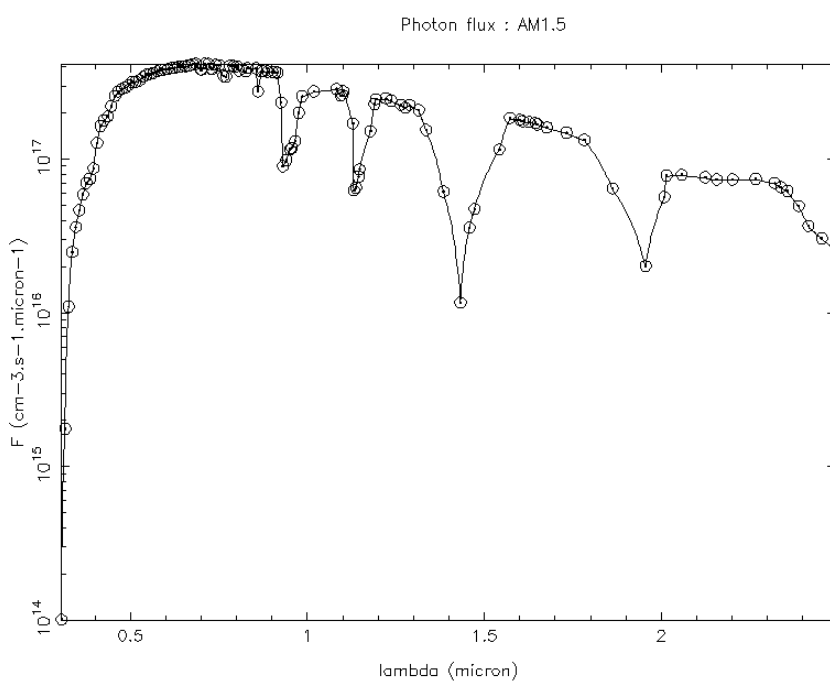
โฟตอนฟลักซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวคลื่นแสง แทนสัญลักษณ์ด้วย F มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ และมีข้อมูลที่ได้จากการสืบค้นที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 แสดงไว้ดังรูปที่ 6.1, 6.2, 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ [2]



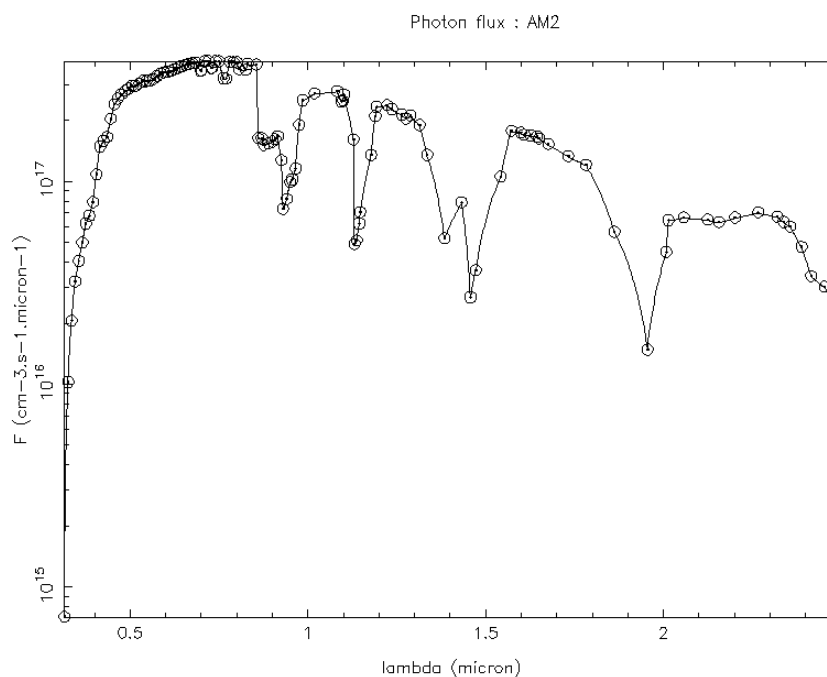
รูปที่ 6.1 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM0



รูปที่ 6.2 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM1

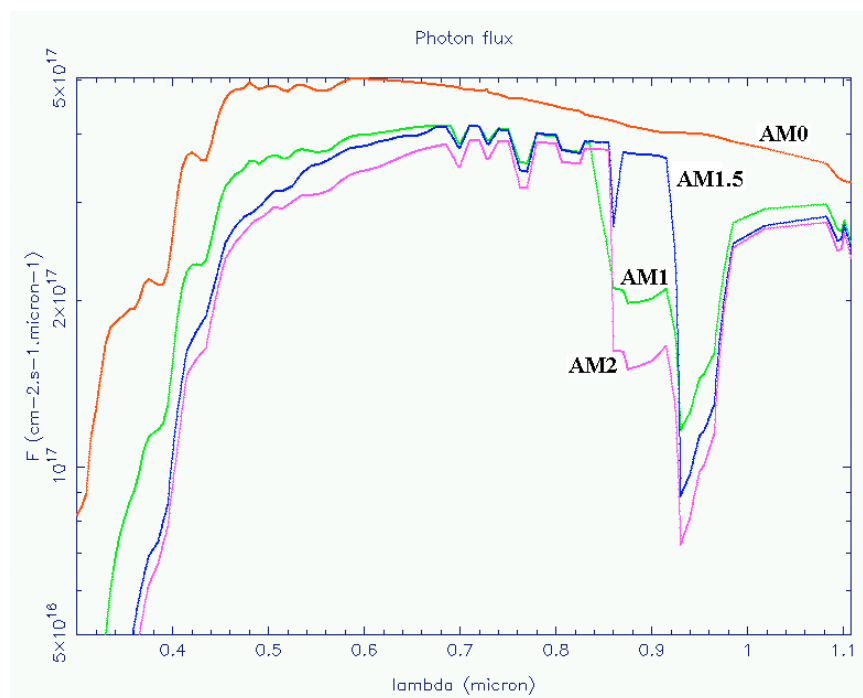


รูปที่ 6.3 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM1.5



รูปที่ 6.4 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM2

เมื่อพิจารณาเฉพาะโฟตอนที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับความยาวคลื่นที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ สำหรับซิลิกอนมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.12 eV เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นแล้วเท่ากับ 1.109 μm ดังนั้นโฟตอนฟลักซ์ที่ Air Mass ต่างๆ ดังรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่าโฟตอนฟลักซ์จะลดลงเป็นหลุมลึกเป็นช่วงๆตั้งแต่ความยาวคลื่นตั้งแต่สเปกตรัมสีแดง(0.622 μm)ขึ้นไป เนื่องจากถูกดูดกลืนและกระเจิงโดยอนุภาคและก๊าซในบรรยากาศที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว



รูปที่ 6.5 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM ต่างๆ

พื้นที่ใต้กราฟ คือ อัตราการตกกระทบของโฟตอนบนผิวน้ำสารกึ่งตัวนำ มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ที่ AM ต่างๆเป็นดังตารางที่ 6.1 โดยคิดเฉพาะสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ $1.109 \mu\text{m}$

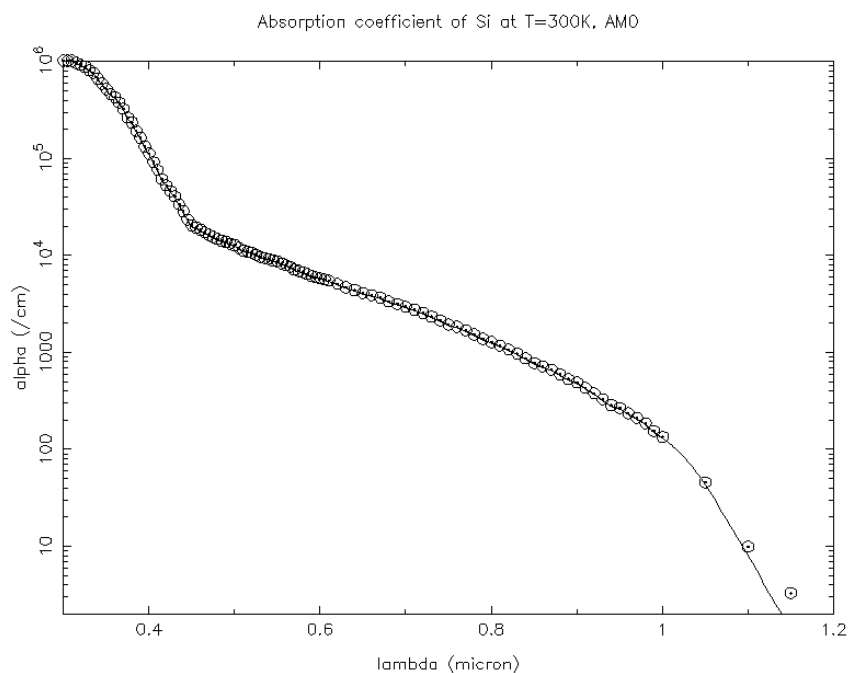
ตารางที่ 6.1 แสดงปริมาณโฟตอนฟลักซ์ที่ AM ต่างๆ

Air Mass	โฟตอนฟลักซ์ ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
0	3.25339×10^{17}
1	2.32605×10^{17}
1.5	2.27108×10^{17}
2	2.01037×10^{17}

ทั้งนี้การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล จะพิจารณาความยาวคลื่นที่น้อยกว่าความยาวคลื่นที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้ คือ $\lambda \leq 1.109 \mu\text{m}$

6.1.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Light Absorption Coefficient)

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง แทนสัญลักษณ์ด้วย α มีหน่วยเป็น cm^{-1} และสำหรับซิลิกอน มีข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงที่ได้จากการสืบค้นจะเป็นดังรูปที่ 6.6 [3]



รูปที่ 6.6 แสดงสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของซิลิกอน ที่ AM0 [3]

จะเห็นว่า สเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นสั้นในช่วงแสงอุลตราไวโอเล็ต จะมีสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงมากเนื่องจากสเปกตรัมในย่านนี้จะมีพลังงานสูงกว่าช่องว่างพลังงานของซิลิกอนมาก และสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงจะลดลงเมื่อสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นยาวขึ้น จนเข้าใกล้ศูนย์เมื่อสเปกตรัมมีพลังงานใกล้เคียงกับช่องว่างพลังงานของซิลิกอน

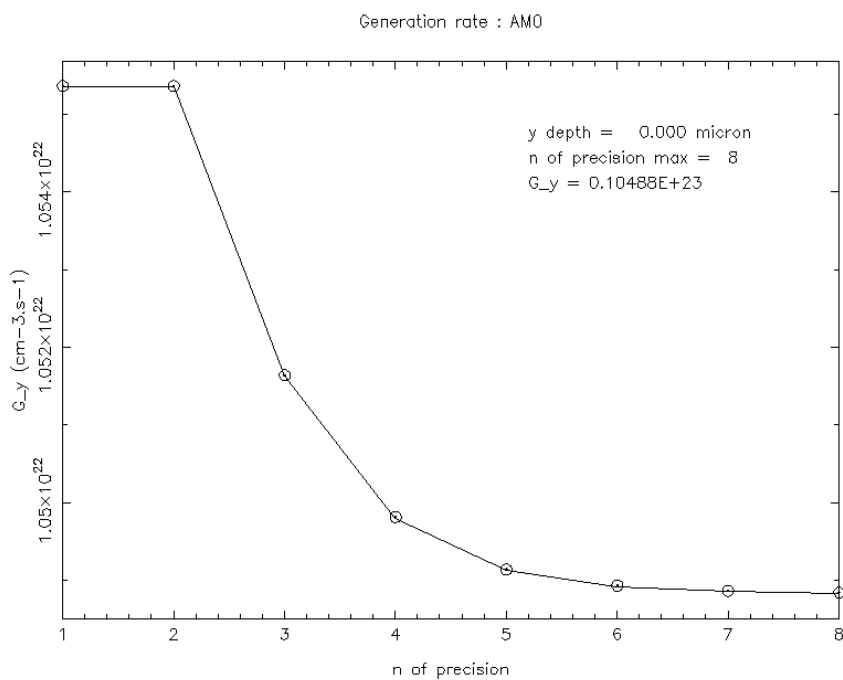
6.1.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflectivity)

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ แทนสัญลักษณ์ด้วย r ไม่มีหน่วย และสำหรับการสะท้อนกลับที่ใช้ในแบบจำลอง จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ โดยสมมุติว่าแสงที่มากกระทบถูกดูดกลืนทั้งหมด ไม่มีการสะท้อนกลับที่ผิว ดังนั้นค่า r ทุกความยาวคลื่นจะเป็นศูนย์ ตามสมการ(6.1)

$$r(\lambda) = 0 \quad (6.1)$$

6.1.4 อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Generation Rate)

อัตราการเกิดของพาหะ แทนสัญลักษณ์ด้วย G มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ เมื่อใช้เลขนัยสำคัญต่างๆ นำไปคำนวณค่า G_y ผลปรากฏดังรูปที่ 6.7

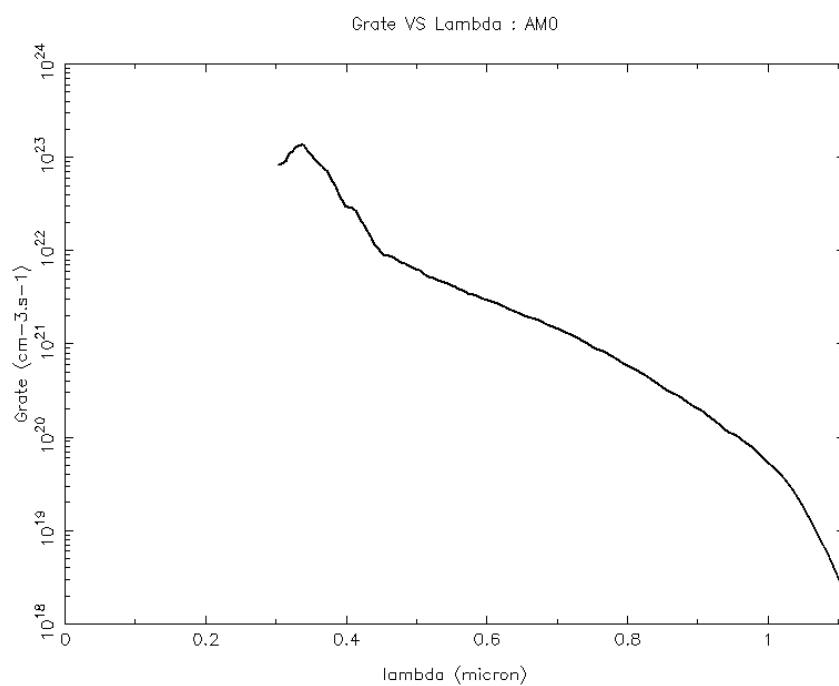


รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_y กับจำนวนเลขนัยสำคัญ

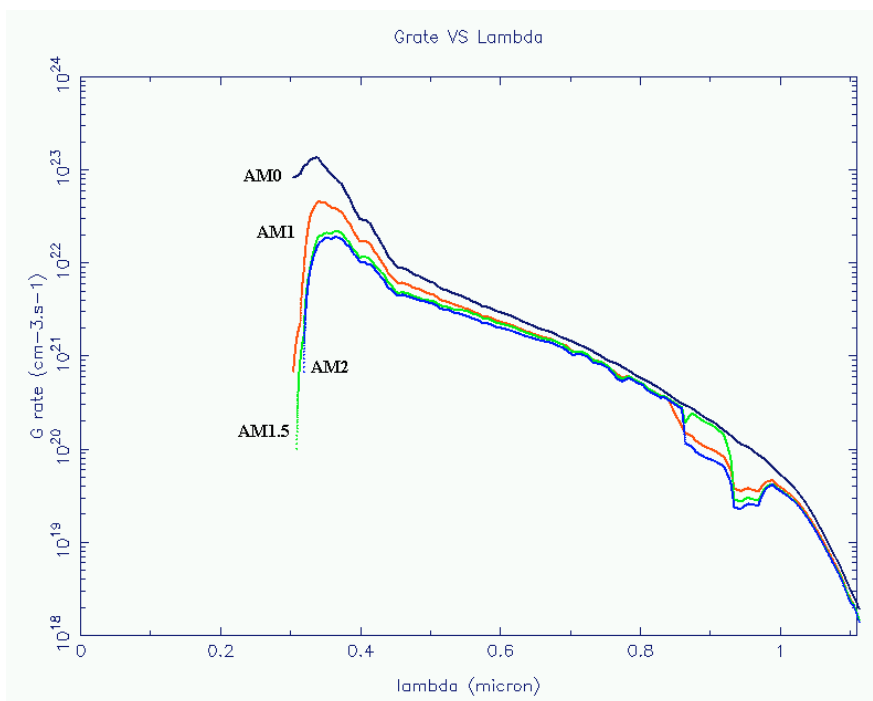
จะเห็นได้ว่าค่า G_y เริ่มจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อค่า nofpresicion เริ่มตั้งแต่ 5 ซึ่งได้ค่า idevided=62 ครั้ง นั่นคือจะแบ่งช่วงความยาวคลื่นที่อยู่ติดกันคือ ระหว่างข้อมูล λ_i และ λ_{i+1} ออกเป็น 62 ครั้งนั่นเอง สำหรับรายละเอียดค่า nofpresicion และ idevided อื่นๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการคำนวณค่า idevided จากการกำหนดเลขนัยสำคัญต่างๆ

จำนวนเลขนัย สำคัญ (nofprecision)	จำนวนครั้งที่แบ่ง(idevided)			
	AM0	AM1	AM1.5	AM2
1	2	2	2	2
2	2	2	2	2
3	6	4	4	4
4	19	6	7	6
5	62	14	20	18
6	192	44	62	50
7	544	114	160	128
8	1341	234	308	216



รูปที่ 6.8 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในแต่ละความยาวคลื่น ที่ AM0



รูปที่ 6.9 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในแต่ละความยาวคลื่น ที่ AM0, AM1, AM1.5, และ AM2

เมื่อได้ค่า $\text{idivided}=62$ ครั้งที่แบ่งช่วงระหว่างข้อมูล λ_i และ λ_{i+1} แล้ว จะคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะ(Grate)ที่ความยาวคลื่นต่างๆที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้ที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ($y=0$) ปรากฏผลดังรูปที่ 6.8 สำหรับที่ AM0 จะมีค่า Grate มากที่สุดเท่ากับ $1.34484 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ที่ความยาวคลื่น $0.3335 \text{ }\mu\text{m}$

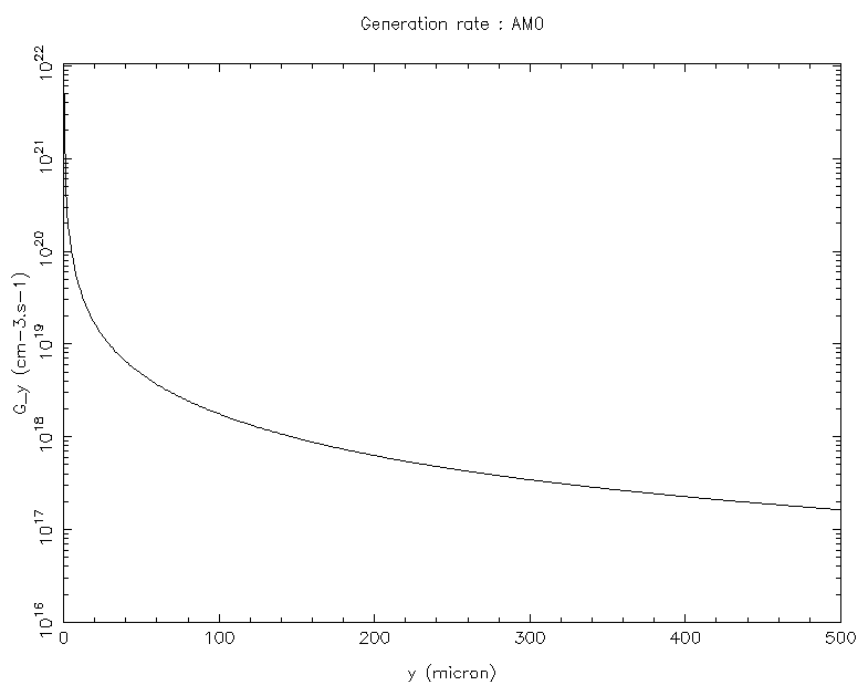
สำหรับที่ AM1, AM1.5, และ AM2 ปรากฏผลดังรูปที่ 6.9

ที่ AM1 จะมีค่า Grate= $4.51323 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ที่ความยาวคลื่น $0.3366 \text{ }\mu\text{m}$

ที่ AM1.5 จะมีค่า Grate= $2.19442 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ที่ความยาวคลื่น $0.3613 \text{ }\mu\text{m}$

ที่ AM2 จะมีค่า Grate= $1.88770 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ที่ความยาวคลื่น $0.3607 \text{ }\mu\text{m}$

จากนั้น จะคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะที่ความลึกระดับต่างๆ และพิจารณาที่ความลึกถึงระดับ $y=500 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งปรากฏผล ดังรูปที่ 6.10 และตารางที่ 6.3 โดยมีค่า $G_y=1.635334 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ จะมีค่าน้อยกว่าที่ผิว($y=0$)ประมาณ 1.55876×10^{-5} เท่าของที่ผิว จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการเกิดของพาหะจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อลึกลงจากผิวไม่เกิน $100 \text{ }\mu\text{m}$ และเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยมาก(น้อยกว่า 2%) เมื่อมีความลึกมากกว่า $100 \text{ }\mu\text{m}$ ดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.10 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้น ที่ AM0

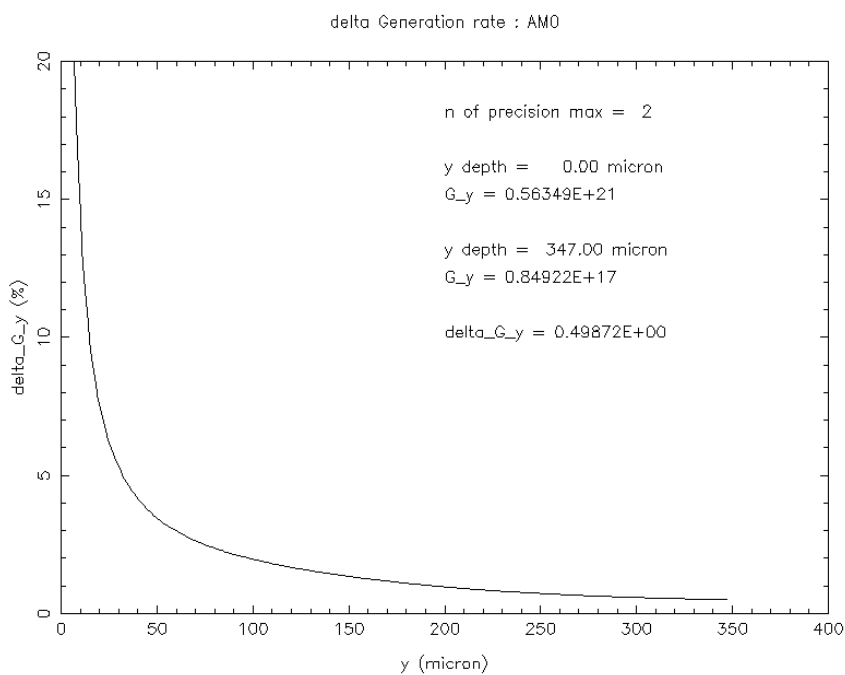
เช่นเดียวกัน ที่ AM1, AM1.5, และ AM2 จะได้ผลดังรูปที่ 6.12 เมื่อพิจารณาถึงความลึก $100 \text{ }\mu\text{m}$ และแสดงผลการคำนวณ ตามตารางที่ 6.3

ที่ AM1 ที่ผิว($y=0$) จะมีค่า $G_y=4.17650 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่ความลึก $y=500 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งมีค่า $G_y=1.34031 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ จะมีค่าน้อยกว่าที่ผิวประมาณ 3.209170×10^{-5} เท่าของที่ผิว

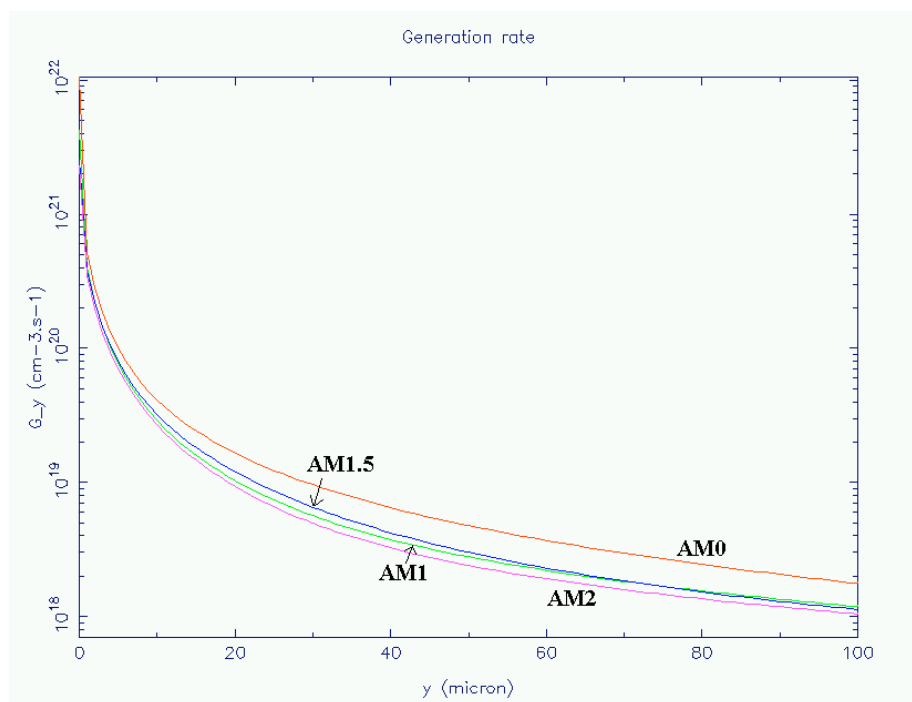
ที่ AM1.5 ที่ผิว($y=0$) จะมีค่า $G_y=2.56377 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่ความลึก $y=500 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งมีค่า $G_y=1.26923 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ จะมีค่าน้อยกว่าที่ผิวประมาณ 4.95063×10^{-5} เท่าของที่ผิว

ที่ AM2 ที่ผิว($y=0$) จะมีค่า $G_y=2.27795 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่ความลึก $y=500 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งมีค่า $G_y=1.23976 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ จะมีค่าน้อยกว่าที่ผิวประมาณ 5.44243×10^{-5} เท่าของที่ผิว

เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับกัน จะได้ผลดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.11 แสดงการเปรียบเทียบผลต่างของค่าอัตราการเกิดของพาหะในระดับความลึกต่างๆ ที่ AM0



รูปที่ 6.12 แสดงการเปรียบเทียบการลดลงของค่าอัตราการเกิดของพาหะที่ระดับความลึกต่างๆ

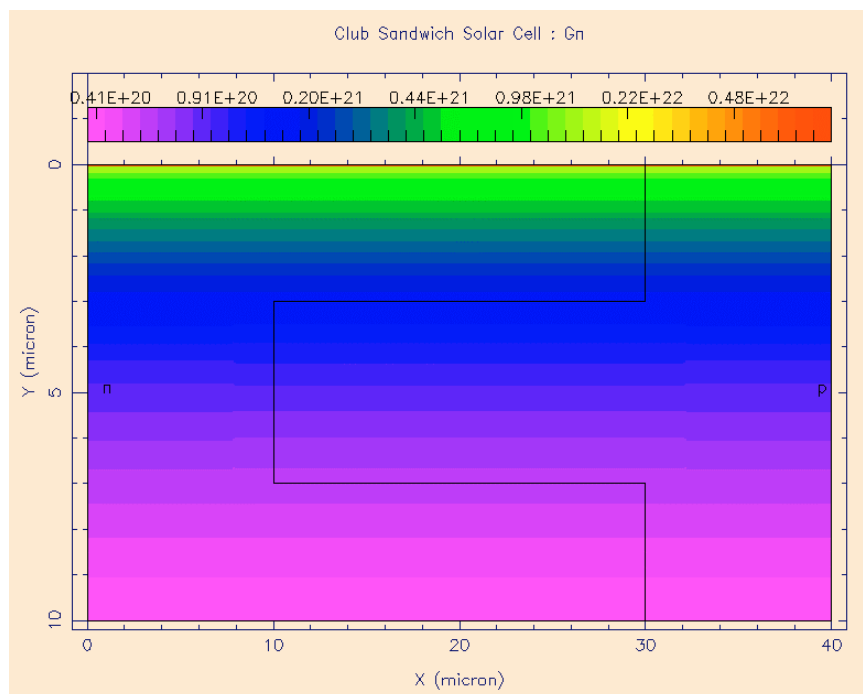
ตารางที่ 6.3 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวบน

ความลึก จากผิวบน (μm)	ค่า G ที่ AM0 ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$)	ค่า G ที่ AM1 ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$)	ค่า G ที่ AM1.5 ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$)	ค่า G ที่ AM2 ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$)
0.00	1.04912×10^{22}	4.17650×10^{21}	2.56377×10^{21}	2.27795×10^{21}
0.01	6.55275×10^{21}	3.07656×10^{21}	2.05362×10^{21}	1.83722×10^{21}
0.02	4.58747×10^{21}	2.44454×10^{21}	1.74046×10^{21}	1.56466×10^{21}
0.03	3.53329×10^{21}	2.05801×10^{21}	1.53654×10^{21}	1.38609×10^{21}
0.04	2.92143×10^{21}	1.80643×10^{21}	1.39607×10^{21}	1.26245×10^{21}
0.05	2.53713×10^{21}	1.63280×10^{21}	1.29421×10^{21}	1.17241×10^{21}
0.10	1.74623×10^{21}	1.21986×10^{21}	1.02911×10^{21}	9.36221×10^{20}
0.20	1.27693×10^{21}	9.31953×10^{20}	8.19774×10^{20}	7.47600×10^{20}
0.30	1.05996×10^{21}	7.87909×10^{20}	7.06989×10^{20}	6.45237×10^{20}
0.40	9.19138×10^{20}	6.90878×10^{20}	6.28144×10^{20}	5.73333×10^{20}
0.50	8.15467×10^{21}	6.17717×10^{20}	5.67252×10^{20}	5.17615×10^{20}
1.0	5.21002×10^{20}	4.02463×10^{20}	3.81552×10^{20}	3.47044×10^{20}
2.0	2.83731×10^{20}	2.21653×10^{20}	2.18111×10^{20}	1.96898×10^{20}
3.0	1.84113×10^{20}	1.43549×10^{20}	1.447548×10^{20}	1.29710×10^{20}
4.0	1.31806×10^{20}	1.01890×10^{20}	1.04669×10^{20}	9.30450×10^{19}
5.0	1.00449×10^{20}	7.67077×10^{19}	8.00326×10^{19}	7.05184×10^{19}
10.0	4.12595×10^{19}	2.91514×10^{19}	3.22444×10^{19}	2.70026×10^{19}
20.0	1.65149×10^{19}	1.02835×10^{19}	1.20129×10^{19}	9.30538×10^{18}
30.0	9.59781×10^{18}	5.62875×10^{18}	6.54618×10^{18}	4.95798×10^{18}
40.0	6.48737×10^{18}	3.75276×10^{18}	4.22028×10^{18}	3.25167×10^{18}
50.0	4.76433×10^{18}	2.78864×10^{18}	3.00841×10^{18}	2.40258×10^{18}
100.0	1.76688×10^{18}	1.18109×10^{18}	1.12686×10^{18}	1.04482×10^{18}
200.0	6.28129×10^{17}	4.83875×10^{17}	4.53529×10^{17}	4.42759×10^{17}
300.0	3.44300×10^{17}	2.76398×10^{17}	2.60513×10^{17}	2.54912×10^{17}
400.0	2.26266×10^{17}	1.84251×10^{17}	1.74175×10^{17}	1.70292×10^{17}
500.0	1.63533×10^{17}	1.34031×10^{17}	1.26923×10^{17}	1.23976×10^{17}
1000.0	5.65686×10^{16}	4.67637×10^{16}	4.44461×10^{16}	4.33046×10^{16}

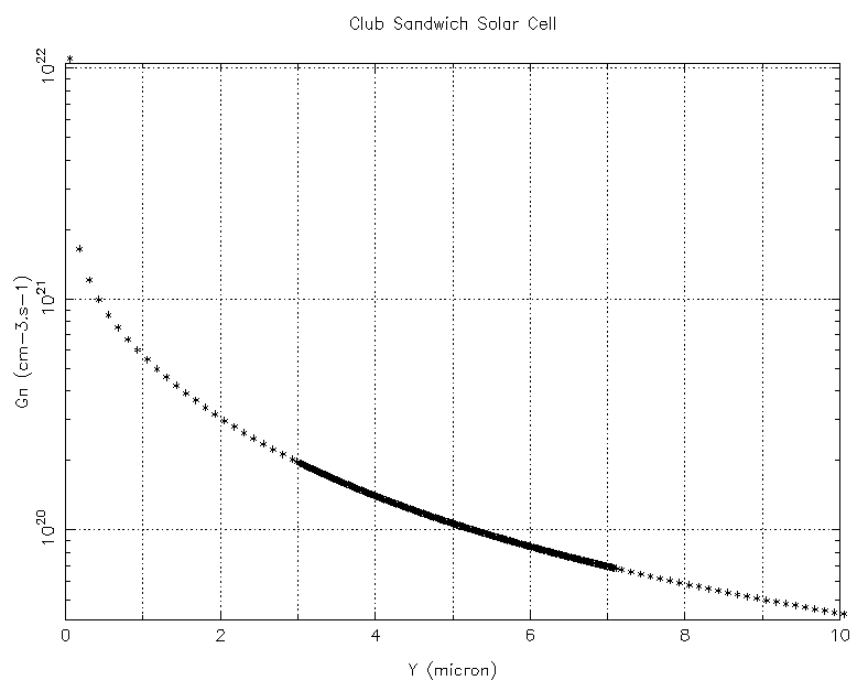
จากตารางที่ 6.3 ค่าอัตราการเกิดของพาหะที่ผิวด้านรับแสง($y=0 \mu\text{m}$) จะมีค่ามากที่สุด และมีค่าจากมากไปหาน้อยที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 ตามลำดับ

ค่าอัตราการเกิดของพาหะที่ได้ผลปรากฏดังรูปที่ 6.13 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการเกิดของพาหะจากผิวบนลงมาล่าง เมื่อแทนด้วยระดับสีแล้วจะมีค่าลดลงจากมากลงป็นน้อยเป็นชั้น ๆ และที่ระดับความลึกจากผิว

เท่า ๆ กัน จะมีค่าอัตราการเกิดของพาหะเท่า ๆ กันสังเกตได้จากระดับสีซึ่งมีระดับสีเดียวกัน เมื่อเลือกพิจารณาเฉพาะตามระดับความลึก(แกน Y) แล้วนำค่าที่ได้มาแสดงด้วยกราฟดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.13 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM0



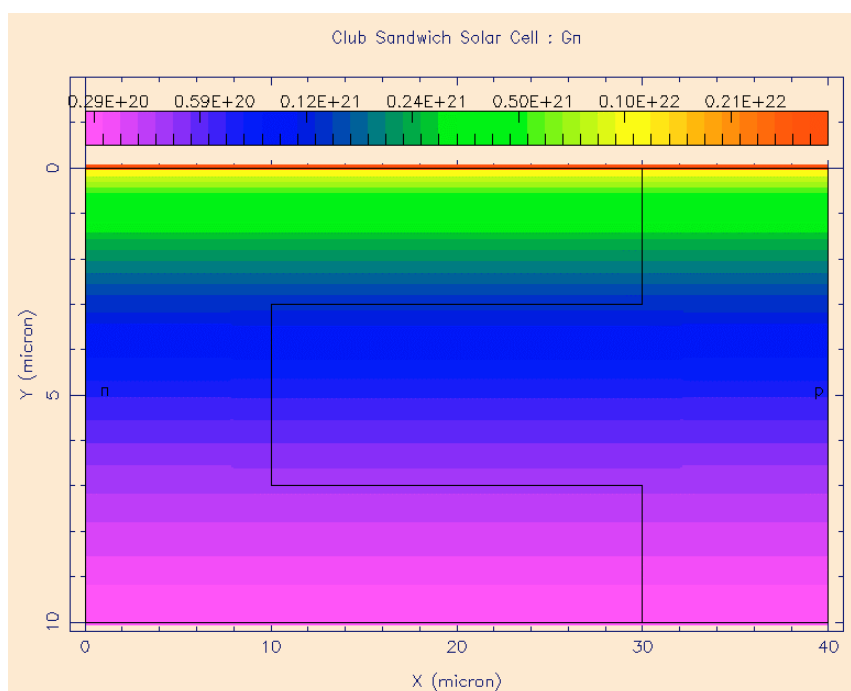
รูปที่ 6.14 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะตามระดับความลึก

จากรูปที่ 6.14 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการเกิดของพาหะจะมีค่าลดลงแบบฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล (exponential function) ตามระดับความลึกจากผิวบน โดยที่ผิว ($y=0$) จะมีค่า $G=1.04912 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่ส่วนล่างสุดของสาร ($y=10 \text{ }\mu\text{m}$) มีค่า $G=4.12595 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ มีค่าน้อยกว่าที่ผิว 3.93277×10^{-3} เท่า เช่นเดียวกันใน AM1 ที่ผิว ($y=0$) จะมีค่า $G=4.17650 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่ส่วนล่างสุดของสาร ($y=10 \text{ }\mu\text{m}$) มีค่า $G=2.91514 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ มีค่าน้อยกว่าที่ผิว 6.97986×10^{-3} เท่า

ใน AM1.5 ที่ผิว ($y=0$) จะมีค่า $G=2.56377 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่ส่วนล่างสุดของสาร ($y=10 \text{ }\mu\text{m}$) มีค่า $G=3.22444 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ มีค่าน้อยกว่าที่ผิว 1.25769×10^{-2} เท่า

ใน AM2 ที่ผิว ($y=0$) จะมีค่า $G=2.27795 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่ส่วนล่างสุดของสาร ($y=10 \text{ }\mu\text{m}$) มีค่า $G=2.70026 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ มีค่าน้อยกว่าที่ผิว 1.18539×10^{-2} เท่า

สำหรับค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM1, AM1.5 และ AM2 แสดงไว้ดังรูปที่ 6.15, 6.16 และ 6.17 ตามลำดับ โดยที่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการเกิดของพาหะตามความลึกนั้นจะเป็นแบบฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลทั้งหมด ต่างกันที่ค่าเริ่มต้นที่ผิวซึ่งจะมีค่าจากมากไปหาน้อยตามลำดับดังนี้คือ ที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2

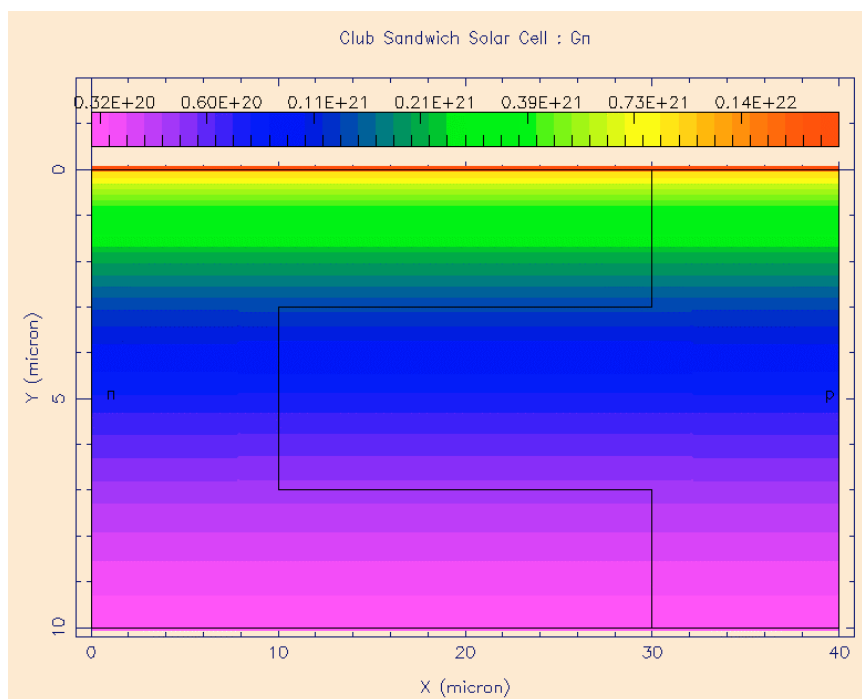


รูปที่ 6.15 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM1

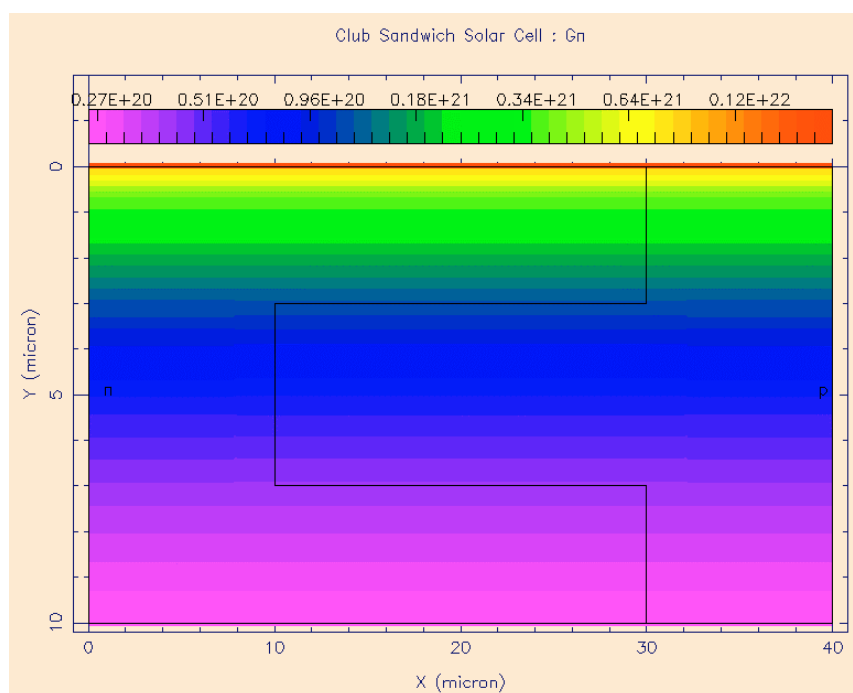
เนื่องจากโฟตอน 1 ตัวจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลเป็น อิเล็กตรอน 1 ตัวและโฮล 1 ตัว ดังนั้นอัตราการเกิดอิเล็กตรอนและอัตราการเกิดโฮลจะเท่ากัน ตามสมการ

$$G_n = G_p \quad (6.2)$$

เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงได้จะต้องผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลจากแสงให้ได้ปริมาณมากที่สุด และจะต้องกวาดอิเล็กตรอนและโฮลเหล่านั้นให้ไหลออกไปสู่วงจรภายนอกให้ได้มากที่สุดโดยการใช้ปรากฏการณ์แพร่กระจายของพาหะ



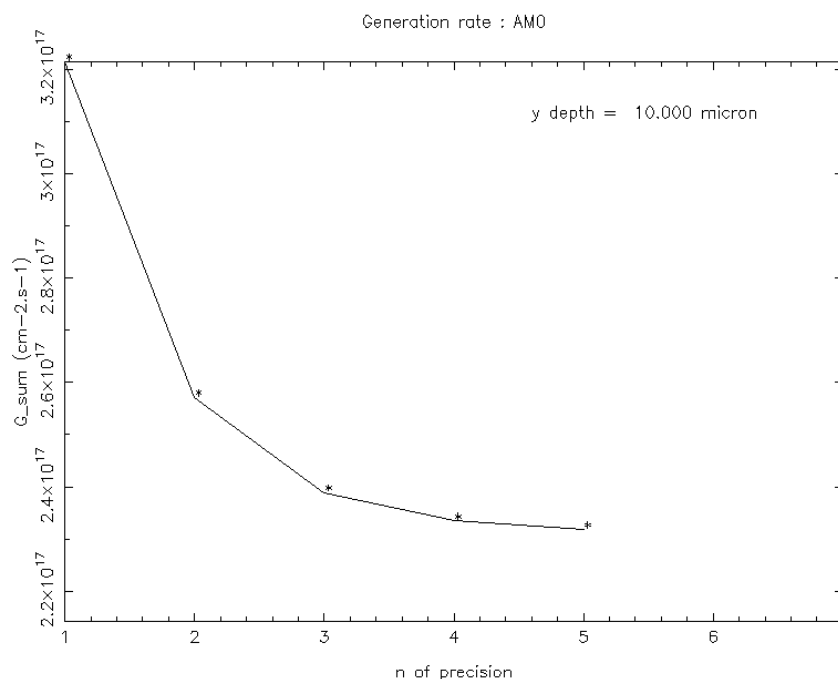
รูปที่ 6.16 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM1.5



รูปที่ 6.17 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM2

6.1.5 อัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้นและอัตราการเกิดของพาหะรวม

อัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้น แทนสัญลักษณ์ด้วย G_y มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ(2.17) อัตราการเกิดรวม แทนสัญลักษณ์ด้วย G_{sum} มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ คำนวณได้จากสมการ (2.18) เมื่อทราบเงื่อนไขตามสมการ(2.17) และการหาค่า G_{sum} ตามสมการ(2.18) จะพิจารณาไปถึงระดับความลึกจากผิว $10 \mu\text{m}$ ผลการคำนวณค่า ΔG_{sum} และค่า nofprecision ปรากฏผลดังนี้



รูปที่ 6.18 แสดงค่า ΔG_{sum} และ nofprecision

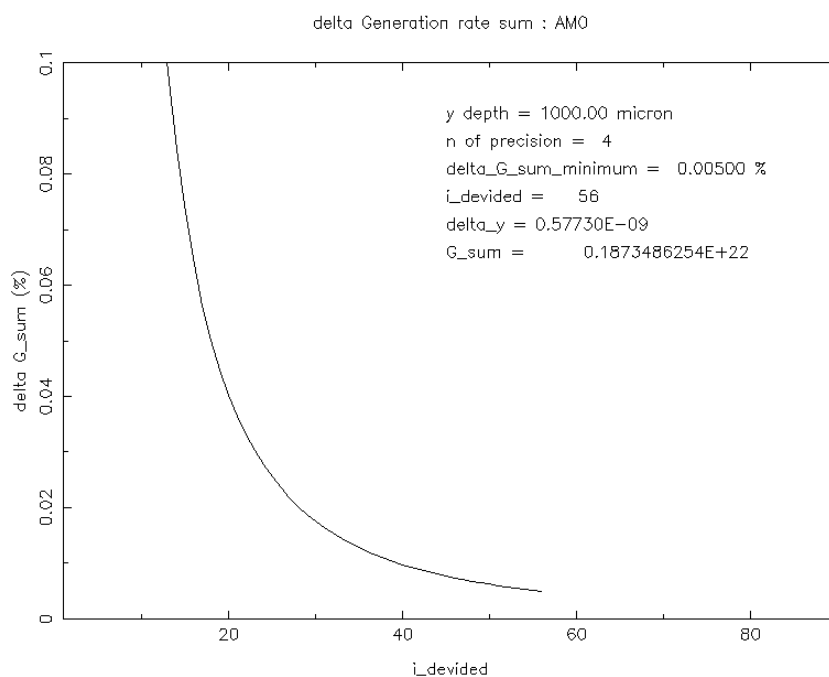
จากรูปที่ 6.18 เมื่อใช้ความละเอียดของเลขนัยสำคัญต่างๆ โดยคำนวณไปถึงระดับความลึกจากผิว $10 \mu\text{m}$ จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อใช้ความละเอียดของเลขนัยสำคัญตั้งแต่ 4 ขึ้นไป และผลการคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม เมื่อใช้ความละเอียดของเลขนัยสำคัญต่างๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการคำนวณค่า idevied จากการกำหนดเลขนัยสำคัญต่างๆ

จำนวนเลขนัย สำคัญ (nfpprecision)	จำนวนครั้งที่แบ่ง(idevied)			
	AMO	AM1	AM1.5	AM2
1	9	7	6	6
2	26	19	16	15
3	74	55	44	44
4	221	163	131	130

5	681	502	403	401
---	-----	-----	-----	-----

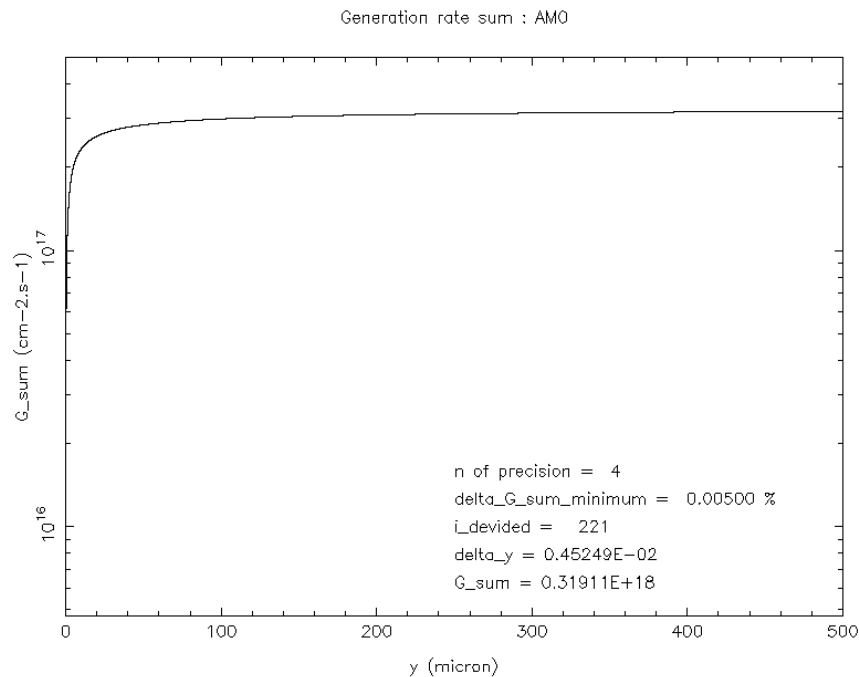
ผลการคำนวณค่า ΔG_{sum} และ idevided ปรากฏผลดังนี้



รูปที่ 6.19 แสดงค่า ΔG_{sum} และ idevided

จากรูปที่ 6.19 เมื่อใช้ความละเอียดของเลขนัยสำคัญเป็น 4 ตำแหน่งซึ่งก็คือต้องการค่าผลต่างน้อยที่สุดเป็น 0.005 % การคำนวณจะไปถึงสุดท้ายที่ค่า idevided = 56 นั่นคือจะต้องแบ่ง $\Delta y = (1 \mu\text{m})/56 = 5.7730 \times 10^{-8} \mu\text{m}$ จึงจะทำให้ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือ $G_{\text{sum}} = 1.87348 \times 10^{-21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$

เมื่อหาค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมทุก ๆ ชั้นตามสมการ (2.18) จะได้อัตราการเกิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในเวลาหนึ่งวินาที ดังรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.20 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม ที่ AM0

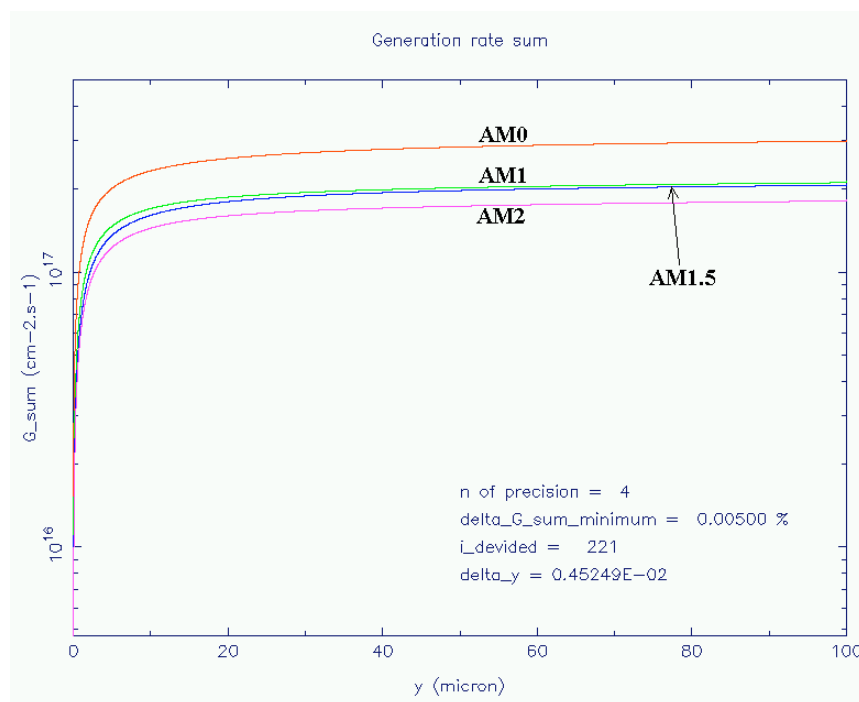
ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมที่ความลึกจากผิว $y=0.01 \mu\text{m}$ จะมีค่า $G_{\text{sum}}=1.16124 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ และที่ส่วนล่างสุด($y=500 \mu\text{m}$) ซึ่งมีค่า $G_{\text{sum}}=4.07267 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ จะมีค่ามากกว่าที่ $y=0.01 \mu\text{m}$ ประมาณ 35.07 เท่า

เช่นเดียวกัน ที่ AM1, AM1.5, และ AM2 จะได้ผลทำนองเดียวกันกับรูปที่ 6.20 เพียงแต่ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมในแต่ละชั้นจะน้อยกว่าที่ AM0 คือ

AM1 ที่ความลึกจากผิว $y=0.01 \mu\text{m}$ จะมีค่า $G_{\text{sum}}=4.66544 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ และที่ความลึก $y=500 \mu\text{m}$ ซึ่งมีค่า $G_{\text{sum}}=2.68833 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ จะมีค่ามากกว่าที่ $y=0.01 \mu\text{m}$ ประมาณ 57.62 เท่า

AM1.5 ที่ความลึกจากผิว $y=0.01 \mu\text{m}$ จะมีค่า $G_{\text{sum}}=3.59979 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ และที่ความลึก $y=500 \mu\text{m}$ ซึ่งมีค่า $G_{\text{sum}}=2.49747 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ จะมีค่ามากกว่าที่ $y=0.01 \mu\text{m}$ ประมาณ 69.37 เท่า

AM2 ที่ความลึกจากผิว $y=0.01 \mu\text{m}$ จะมีค่า $G_{\text{sum}}=3.22936 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ และที่ความลึก $y=500 \mu\text{m}$ ซึ่งมีค่า $G_{\text{sum}}=2.20383 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ จะมีค่ามากกว่าที่ $y=0.01 \mu\text{m}$ ประมาณ 68.24 เท่า เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกัน จะได้ผลดังรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.21 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม

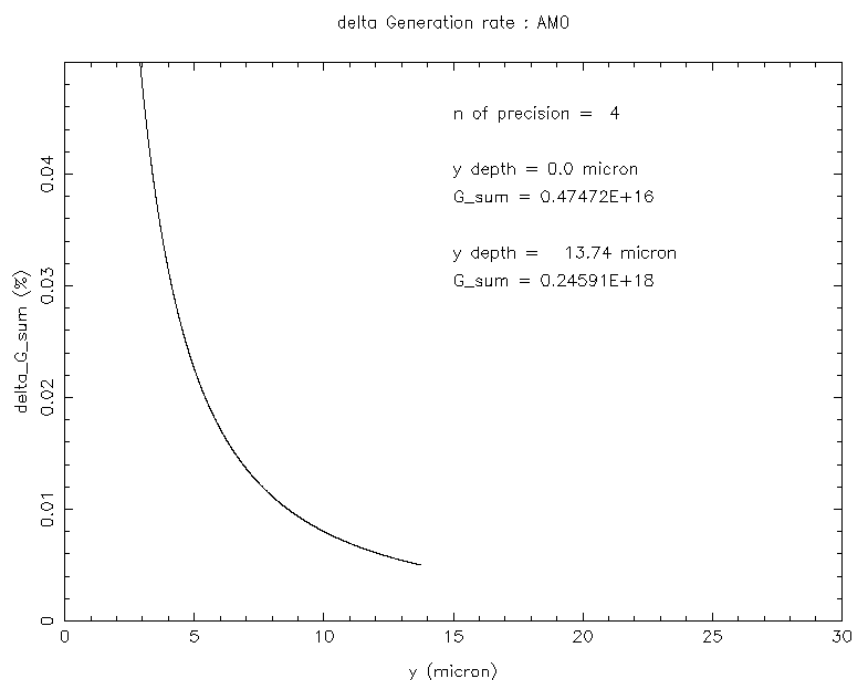
ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม ที่ได้นี้ แสดงถึงอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ความลึกจากผิว จากรูปที่ 6.21 เมื่อความลึกจากผิวมากกว่า 20 μm อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลก็ไม่ได้เพิ่มมากขึ้นเท่าใด ดังนั้นการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ความลึกมาก ๆ ก็ไม่เกิดประโยชน์เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับผลผลิตที่ได้เกือบเท่าเดิม ดังนั้นควรจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความลึกไม่เกิน 20 μm เพื่อลดปริมาณสารกึ่งตัวนำที่ใช้ผลิตได้และเป็นการลดต้นทุนสำหรับวัสดุที่ใช้ทำอีกด้วย

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวบน

ความลึก จากผิวบน (μm)	ค่า G_{sum} ที่ AM0 ($\times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	ค่า G_{sum} ที่ AM1 ($\times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	ค่า G_{sum} ที่ AM1.5 ($\times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	ค่า G_{sum} ที่ AM2 ($\times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
0.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.01	0.11612	0.04665	0.03599	0.03229
0.02	0.16394	0.07995	0.05028	0.04518
0.03	0.20024	0.09373	0.06304	0.05673
0.04	0.22977	0.11774	0.08553	0.07714
0.05	0.26657	0.13857	0.09571	0.08641
0.1	0.36737	0.20599	0.15633	0.13454
0.2	0.51297	0.30924	0.24605	0.21816
0.3	0.62810	0.39330	0.32118	0.29280
0.4	0.72610	0.47018	0.38715	0.35328
0.5	0.81218	0.53419	0.44632	0.40751
1.0	1.13725	0.78342	0.67637	0.61781
2.0	1.51928	1.08038	0.96596	0.87766
3.0	1.74702	1.25820	1.14302	1.03694
4.0	1.90242	1.37888	1.26580	1.14655
5.0	2.01728	1.46668	1.35655	1.22742
10.0	2.33455	1.70157	1.60828	1.44427
20.0	2.59111	1.87270	1.80312	1.60127
30.0	2.71633	1.94821	1.89146	1.66877
40.0	2.79500	1.99394	1.94390	1.70871
50.0	2.85053	2.02619	1.97945	1.73656
100.0	2.99390	2.11487	2.06904	1.81366
200.0	3.09785	2.18966	2.13932	1.88105
300.0	3.14406	2.22608	2.17355	1.91452
400.0	3.17188	2.24859	2.19480	1.93530
500.0	3.19109	2.26428	2.20965	1.94981

จากตารางที่ 6.5 ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.0028% ที่ความลึกจากผิวมากกว่า 20 μm

ผลการคำนวณค่า ΔG_{sum} ที่ความลึกจากผิวระดับต่างๆ ปรากฏผลดังรูปที่ 6.22 ดังนี้



รูปที่ 6.22 แสดงค่า ΔG_{sum} ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่ AM0

จากรูปที่ 6.22 เมื่อใช้ความละเอียดของเลขนัยสำคัญเป็น 4 ตำแหน่งซึ่งก็ต้องการค่าผลต่างน้อยที่สุดเป็น 0.005 % ของค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การคำนวณจะไปสิ้นสุดที่ความลึกต่างๆ จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตั้งแต่ความลึก 20 μm เป็นต้นไป

สำหรับเลขนัยสำคัญอื่นๆ ได้ผลดังตาราง 6.6

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าระยะความลึกที่ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมเริ่มไม่เปลี่ยนแปลง ที่ AM ต่างๆ

เลขนัยสำคัญ	ระยะความลึก(μm)ที่ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมเริ่มไม่เปลี่ยนแปลง			
	AM0	AM1	AM1.5	AM2
1	1.56	1.86	2.17	2.17
2	3.54	4.37	5.06	5.20
3	8.15	9.36	11.41	10.89
4	17.75	19.04	23.54	21.68
5	37.17	37.71	84.40	85.12

6.2 การรวมตัวของพาหะ(Recombination of charge carriers)

การรวมตัวของพาหะ จะพิจารณาออกเป็นคือ

6.2.1 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะ(Recombination lifetime)

6.2.2 อัตราการรวมตัวของพาหะ(Recombination rate)

6.2.3 สารเจือปน(impurities)

6.2.1 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะ(Recombination lifetime)

จะพิจารณาออกเป็น 3 ส่วนคือ

6.2.1.1 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH

6.2.1.2 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะในกระบวนการอเจอร์

6.2.1.3 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะรวม

6.2.1.1 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH

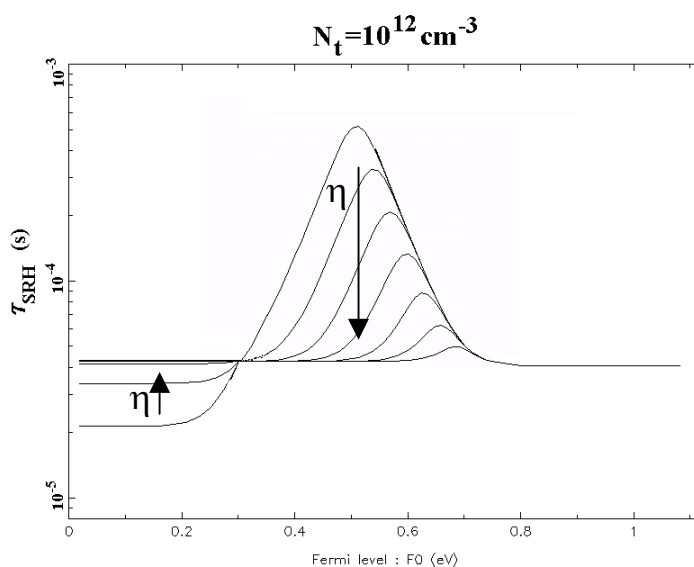
เวลาอายุการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH จากสมการ(4.57) ถ้าค่า τ_{∞} ต่างจากค่า τ_0 (โดยทั่วไป) เมื่อค่า δp เพิ่มขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงค่า τ อยู่ระหว่าง τ_{∞} และ τ_0 ดังรูปที่ 6.23 ซึ่งแสดงค่าเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิ(F_0)อยู่ในบริเวณระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชัน

$$\tau = \tau_0 \left[\frac{1 + \frac{\tau_0(\tau_{p0} + \tau_{n0})\delta p}{\tau_{p0}(n_0 + n_1) + \tau_{n0}(p_0 + p_1)}}{1 + \frac{\delta p}{n_0 + p_0}} \right] \quad (4.57)$$

สำหรับระดับการฉีดพาหะ(η)มีความสัมพันธ์กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน(Δn และ Δp หรือ δn และ δp) ดังนี้

$$\text{ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad \eta = \Delta n / p_0 \quad (6.3)$$

$$\text{ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad \eta = \Delta p / n_0 \quad (6.4)$$



รูปที่ 6.23 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยในกระบวนการ SRH ที่ระดับพลังงานเฟอร์มีต่าง ๆ

จากรูปที่ 6.23 มีค่า τ_{p0} เท่ากับ 3.84615×10^{-5} s และค่า τ_{n0} เท่ากับ 3.84615×10^{-6} s ดังนั้นจะได้ค่า τ_0 เท่ากับ 4.23076×10^{-5} s เมื่อเริ่มต้น (δp น้อยๆ) ค่า τ จะมากเมื่อระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน (0.56 eV) และจะมีค่าน้อยเมื่อระดับพลังงานเฟอร์มีน้อยกว่าบริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน (< 0.56 eV) และเมื่อ δp มากขึ้นเรื่อยๆ ค่า τ จะมีค่าเข้าใกล้ 4.23076×10^{-5} s ซึ่งเท่ากับ τ_0 นั่นเอง

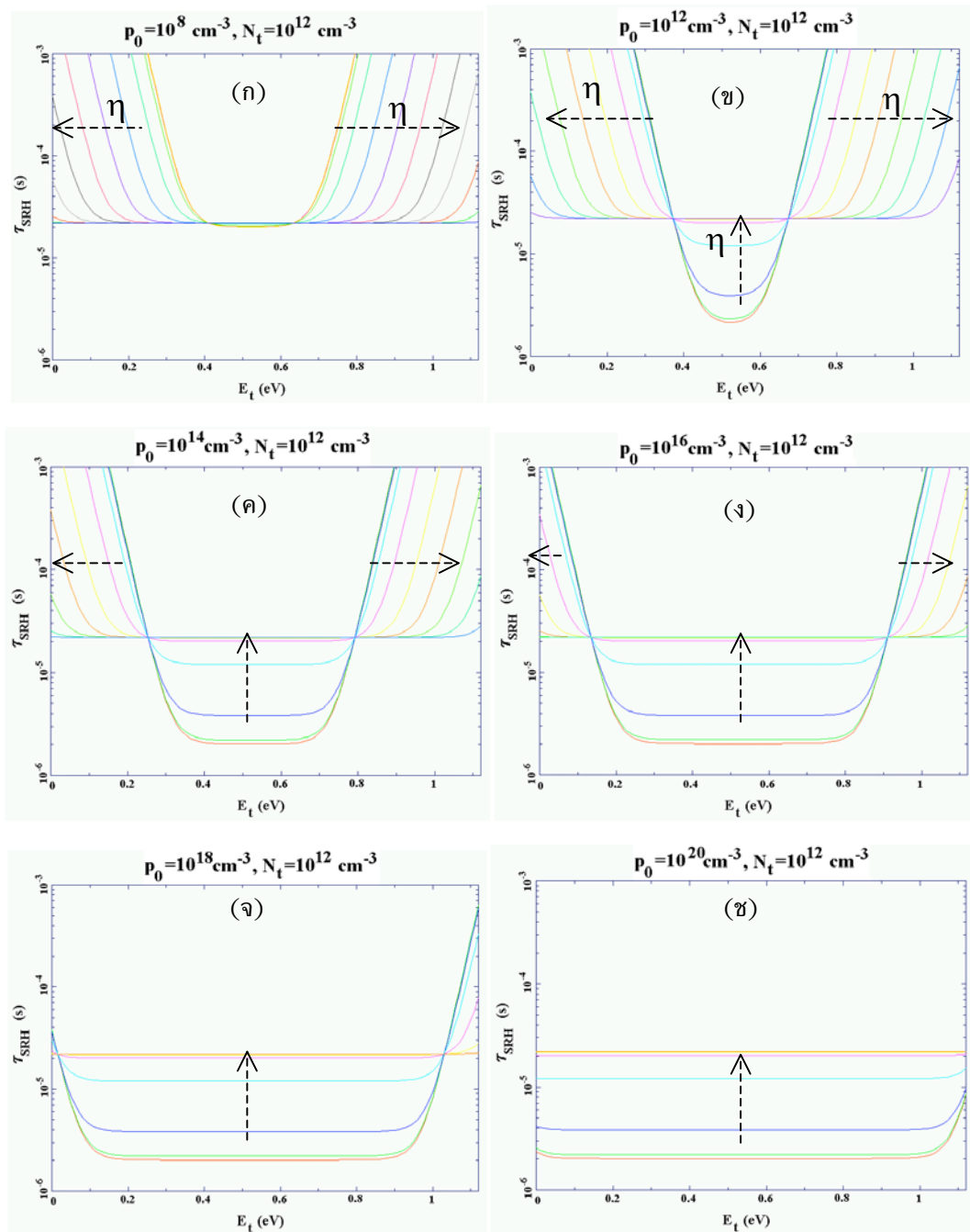
เมื่อพิจารณาเฉพาะกระบวนการการรวมตัวผ่านแตริปโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับการโด๊ปเช่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเปลี่ยนแปลงค่า p_0 อยู่ระหว่าง $10^8 - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ดังรูปที่ 6.24 เมื่อระดับพลังงานแตริปมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1.12 eV และกำหนดให้ $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

จากรูปที่ 6.24 (ก) - (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการโด๊ปสูงขึ้น (p_0 มากขึ้น) และมีการฉีดพาหะต่ำๆ (η น้อย) เวลาอายุของพาหะข้างน้อย $\tau_{SRH}(II)$ จะมีค่าลดลง (เกิดการรวมตัวของพาหะข้างน้อยมากขึ้น) แต่ถ้ามมีการฉีดพาหะมากๆ (η มาก) เวลาอายุของพาหะข้างน้อย $\tau_{SRH}(hl)$ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง (เกิดการรวมตัวของพาหะข้างน้อยเท่าเดิม)

อย่างไรก็ตาม บริเวณที่มีเวลาอายุของพาหะน้อยที่สุดทุกกรณี ระดับพลังงานของสารเจือปนจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน แสดงว่า พาหะจะเกิดการรวมตัวกันมากที่สุดในบริเวณนี้

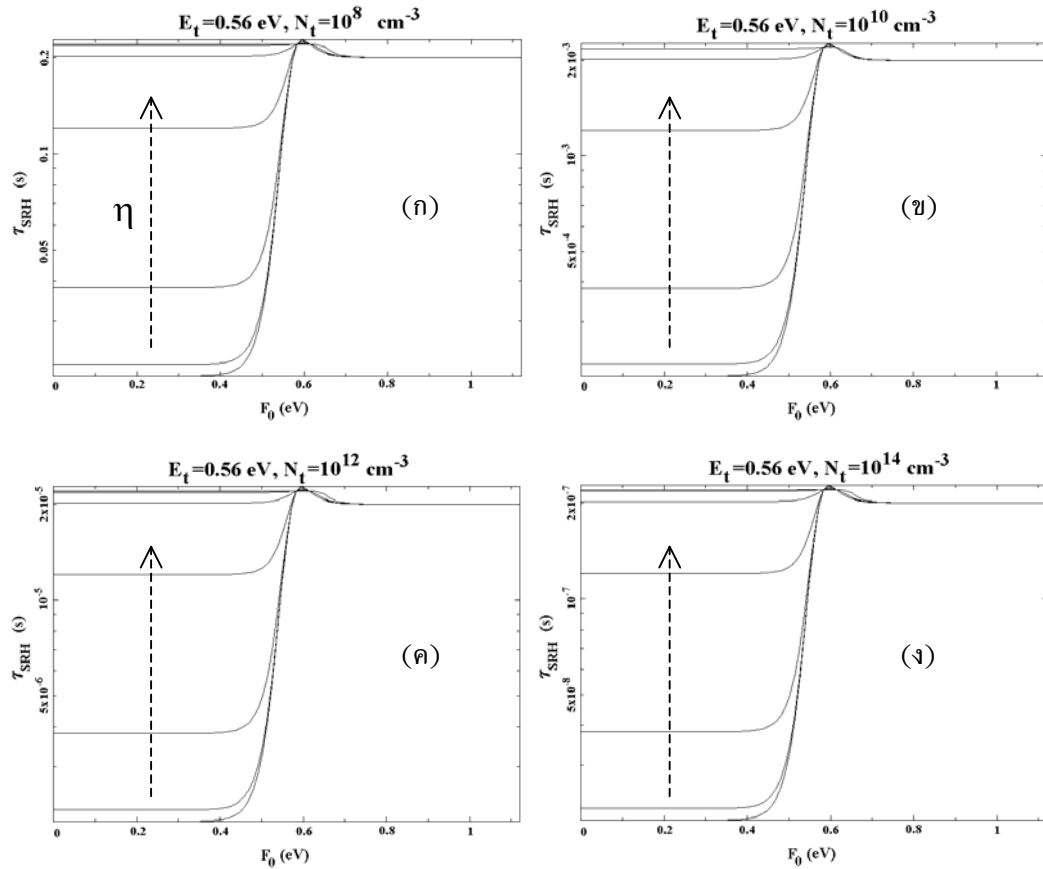
จากรูปที่ 6.24 (ข) ถ้ามมีการโด๊ประดับปานกลาง $p_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และมีการฉีดพาหะต่ำๆ (η น้อย) เวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะมีค่าต่ำที่สุดในบริเวณแคบๆ ใกล้จุดกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อพิจารณาผลของระดับพลังงานเฟอร์มีต่อเวลาอายุของพาหะเฉพาะในกระบวนการ SRH เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มีมีค่าอยู่ระหว่าง E_v และ E_c และกำหนดให้ระดับพลังงานของสารเจือปน $E_t = 0.56 \text{ eV}$ ซึ่งเป็นบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน ได้ผลดังรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.24 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยในกระบวนการ SRH ที่ระดับพลังงานของสารเจือปนต่าง ๆ

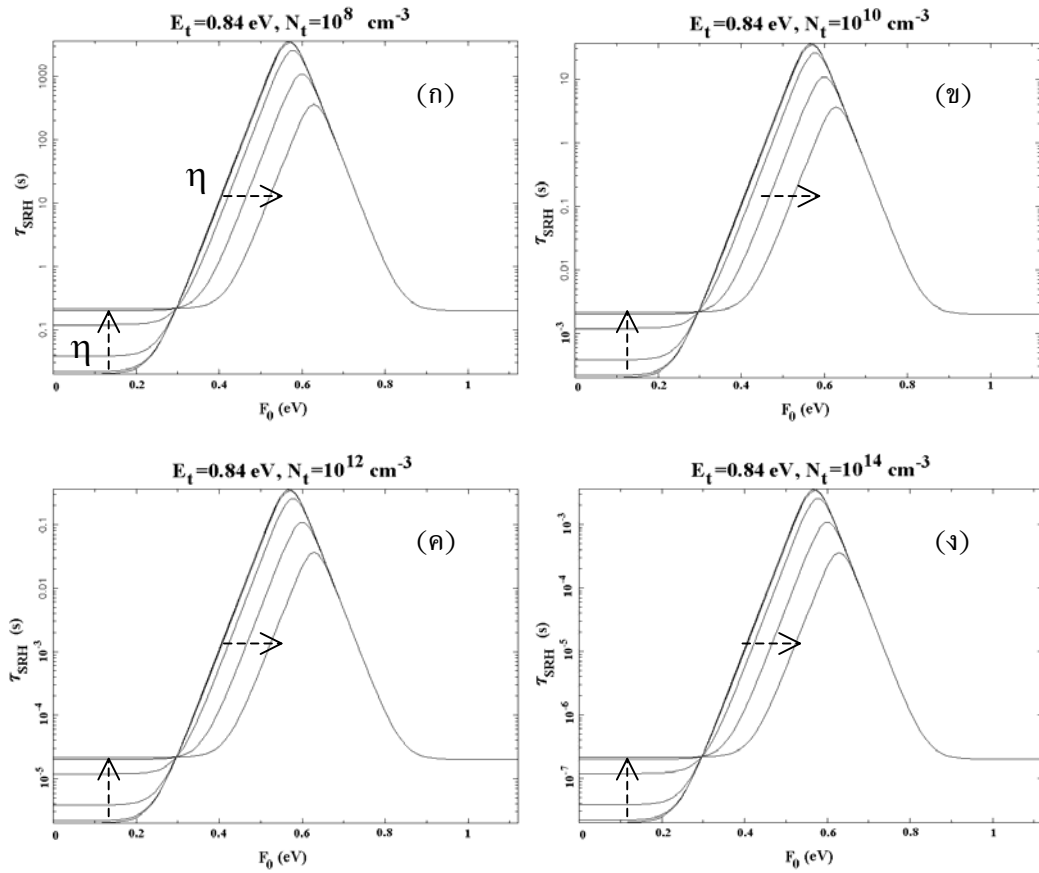
ก) $p_0 = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ข) $p_0 = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ค) $p_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
 ง) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ จ) $p_0 = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ข) $p_0 = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 6.25 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t=0.56$ eV
 ก) $N_t=10^8$ cm⁻³ ข) $N_t=10^{10}$ cm⁻³ ค) $N_t=10^{12}$ cm⁻³ ง) $N_t=10^{14}$ cm⁻³

จากรูปที่ 6.25 เมื่อ η มีค่าตั้งแต่ 0.001 ถึง 100.0 จะเห็นได้ว่า เมื่อ N_t มีค่ามากขึ้น เวลาอายุของพาหะ τ จะมีค่าน้อยลง แสดงว่า เมื่อสารเจือปนมีมาก โอกาสที่พาหะจะเกิดการรวมตัวก็มีมากขึ้นด้วย และเช่นเดียวกัน เมื่อพาหะส่วนเกิน ($\delta n = \eta p_0$) มีค่ามากขึ้น เวลาอายุของพาหะข้างน้อย (τ_n ในชนิดพี, τ_p ในชนิดเอ็น) จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น กล่าวคือ เมื่อ $\eta=1.0$ หรือ $\delta n=p_0$ จะทำให้ $\tau_n=\tau_p$ และเมื่อ $\eta>1.0$ จะมี $\tau_n \cong \tau_p$

ถ้าระดับพลังงานของสารเจือปน $E_t=0.84$ eV ได้ผลดังรูปที่ 6.26



รูปที่ 6.26 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t = 0.84$ eV
 ก) $N_t = 10^8$ cm $^{-3}$ ข) $N_t = 10^{10}$ cm $^{-3}$ ค) $N_t = 10^{12}$ cm $^{-3}$ ง) $N_t = 10^{14}$ cm $^{-3}$

จากรูปที่ 6.26 จะพิจารณาระดับพลังงานเฟอร์มิ เป็น 4 บริเวณคือ

1. ในบริเวณ p^+ ซึ่งมี $F_0 < 2E_i - E_t = 0.28$ eV จะมีระดับพลังงานแตร้ปว่างทั้งหมดและจำนวนโฮล(พาหะข้างมาก)มีมากพอที่จะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอน(พาหะข้างน้อย)ที่มาจากแถบคอนดักชัน เวลาอายุของพาหะข้างน้อยจึงขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนที่มาจากแถบคอนดักชัน ดังนั้นในบริเวณนี้จะมีเวลาคงที่คือ

$$\tau = \tau_{n0} \quad (6.5)$$

2. ในบริเวณ p ซึ่งมี $2E_i - E_t < F_0 < E_i$ ระดับพลังงานแตร้ปเกือบทั้งหมดจะว่าง แต่มีจำนวนโฮล(พาหะข้างมาก)ไม่เพียงพอที่จะรวมตัวกับอิเล็กตรอน(พาหะข้างน้อย)ได้ทั้งหมด ทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนจะกระโดดกลับไปยังแถบคอนดักชัน ดังนั้นในบริเวณนี้เวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ F_0 คือ

$$\tau = \tau_{p0} \exp[(F_0 - 2E_i + E_t)/kT] \quad (6.6)$$

3. ในบริเวณ n^- ซึ่งมี $E_i < F_0 < E_t$ ระดับพลังงานแฟร์มีเกือบทั้งหมดจะว่าง และเวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ F_0 คือ

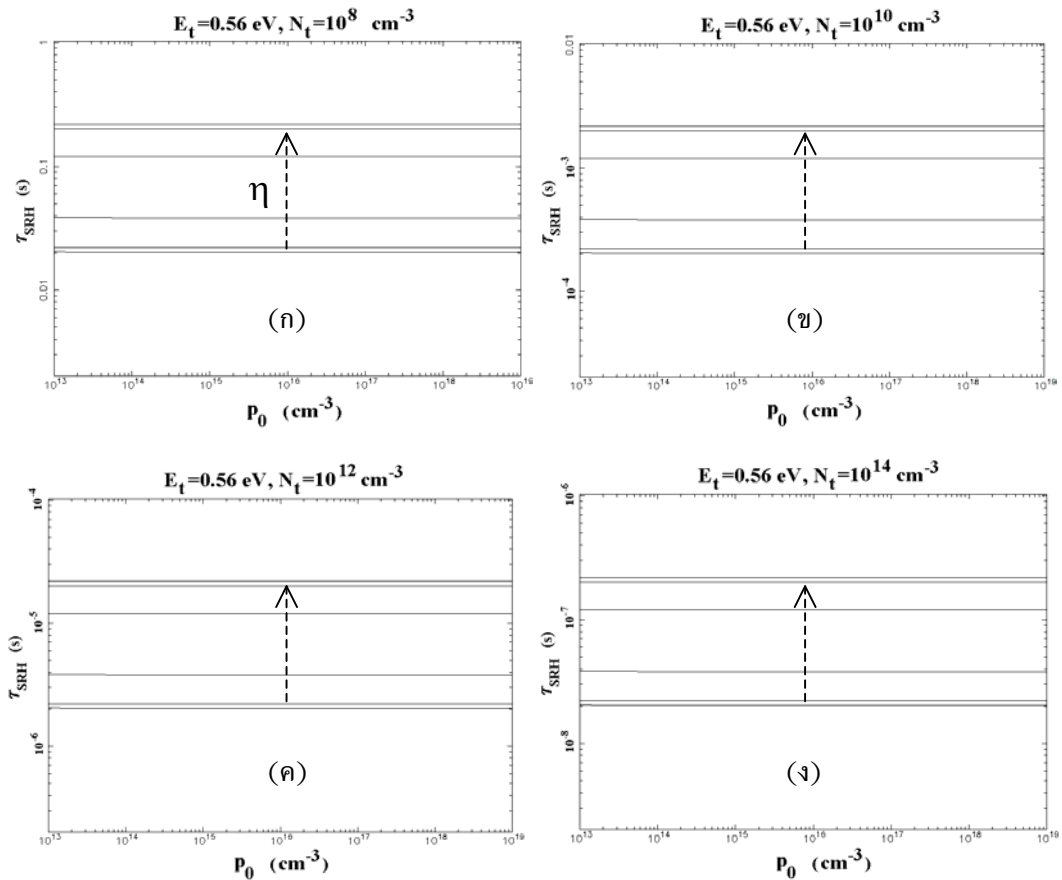
$$\tau = \tau_{p0} \exp[(E_i - F_0)/kT] \quad (6.7)$$

4. ในบริเวณ n^+ ซึ่งมี $F_0 > E_t$ จะมีระดับพลังงานแฟร์มีเต็มไปด้วยอิเล็กตรอน(พาหะข้างมาก) จึงสามารถจับโฮลและขึ้นอยู่กับปริมาณของโฮล(พาหะข้างน้อย) ดังนั้นในบริเวณนี้จะมีเวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะคงที่ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของโฮลคือ

$$\tau = \tau_{p0} \quad (6.8)$$

จะเห็นได้ว่าทุกกรณี เวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $F_0 = E_t$ และมีการฉีดพาหะ (η) น้อยๆ

ผลของการโด๊ปพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะข้างน้อย ในที่นี้จะพิจารณาในชนิดพี เมื่อใช้การโด๊ปที่ระดับต่างๆ $p_0 = 10^{14} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และกำหนดให้ สารเจือปนมีระดับพลังงาน $E_t = 0.56 \text{ eV}$ และความหนาแน่น $N_t = 10^8 - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ดังรูปที่ 6.27



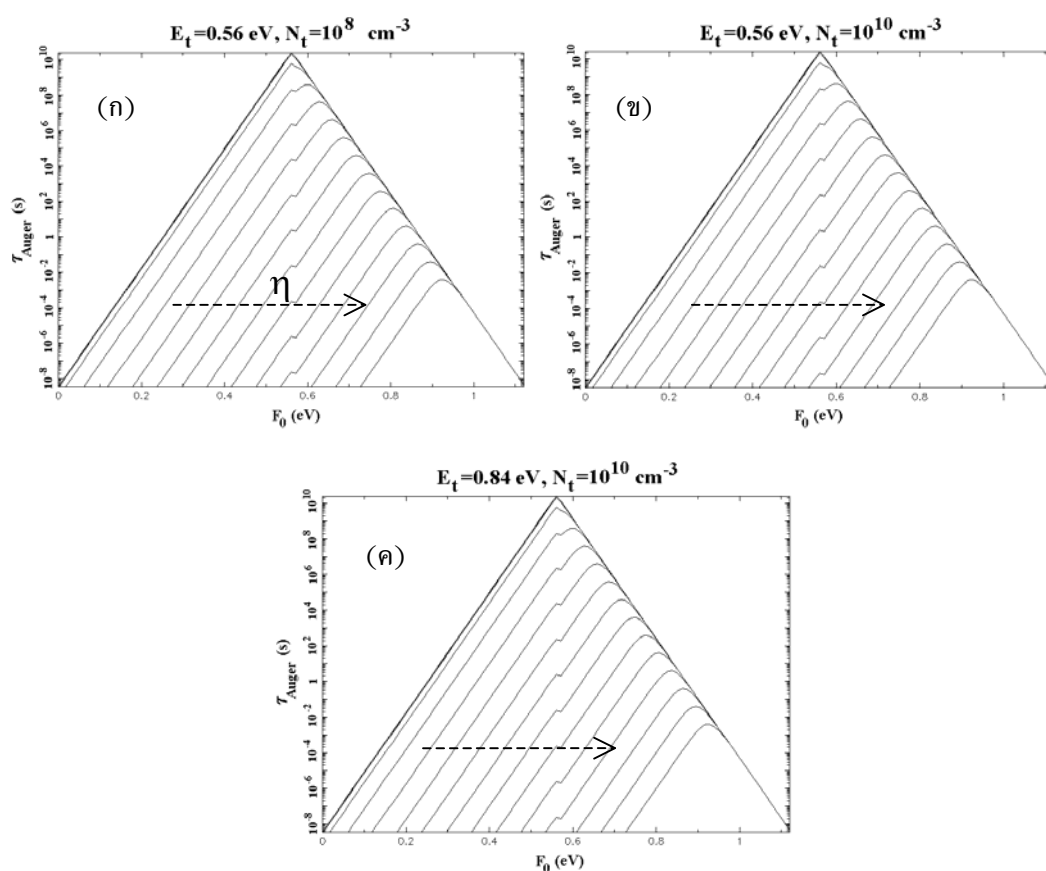
รูปที่ 6.27 แสดงผลของการโด๊ปพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t = 0.56 \text{ eV}$

ก) $N_t=10^8 \text{ cm}^{-3}$ ข) $N_t=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ค) $N_t=10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ง) $N_t=10^{14} \text{ cm}^{-3}$

จากรูปที่ 6.27 จะเห็นว่าเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH นั้น เมื่อความหนาแน่นของสารเจือปนมีปริมาณมากขึ้น เวลาอายุของพาหะจะน้อยลง นั่นคือพาหะจะถูกรวมตัวมากขึ้นนั่นเอง เมื่อการฉีดพาหะต่ำ ($\eta < 0.001$) เวลาอายุของพาหะจะมีค่าไม่ต่ำกว่า $\tau(\text{II})$ และการฉีดพาหะสูง ($\eta > 100.0$) เวลาอายุของพาหะจะมีค่าไม่เกิน $\tau(\text{hl})$

6.2.1.2 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์

เวลาอายุการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์ จากสมการ(3.18) และ (3.19) โดยพิจารณาความหนาแน่นของพาหะข้างมากในเทอมของระดับพลังงานเฟอร์มิ ดังรูปที่ 6.28



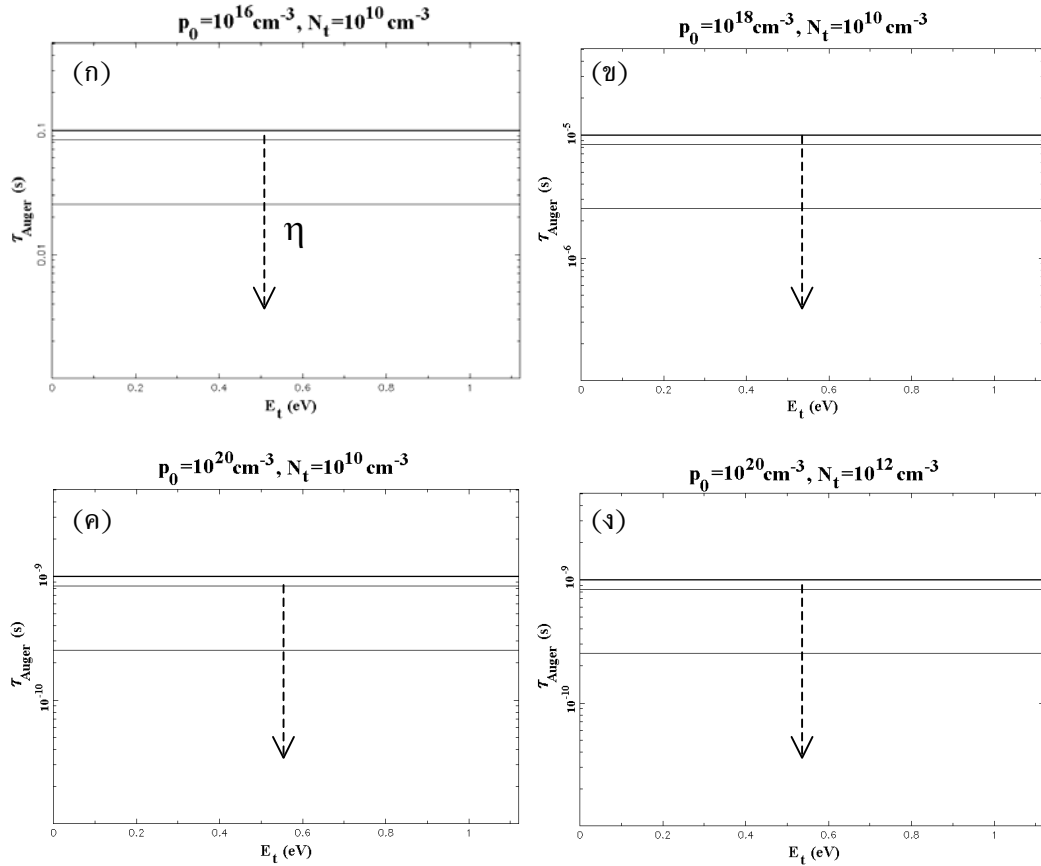
รูปที่ 6.28 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์

ก) $E_t=0.56 \text{ eV}$, $N_t=10^8 \text{ cm}^{-3}$ ข) $E_t=0.56 \text{ eV}$, $N_t=10^{10} \text{ cm}^{-3}$
 ค) $E_t=0.84 \text{ eV}$, $N_t=10^{10} \text{ cm}^{-3}$

จะเห็นว่า ระดับพลังงานของสารเจือปน(E_t), ความหนาแน่นของสารเจือปน(N_t) ไม่ได้มีผลต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์เลย จะมีแต่ระดับพลังงานเฟอร์มิ(F_0)ที่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพาหะข้างมากในที่นี้คือสารกึ่งตัวนำชนิดพี(p_0) และความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินในเทอมของ η เท่านั้นที่มีผลต่อเวลาอายุของพาหะ กล่าวคือเมื่อความหนาแน่นของพาหะข้างมากมีมากขึ้นหรือระดับพลังงาน

เฟอร์มิอยู่ใกล้ขอบช่องว่างพลังงานมากขึ้น เวลาอายุของพาหะก็จะน้อยลง และเมื่อ η มีค่ามากขึ้น เวลาอายุของพาหะก็จะน้อยลงด้วย

หรือจะพิจารณาผลของระดับพลังงานของสารเจือปน(E_t), ความหนาแน่นของสารเจือปน(N_t) ที่มีต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์ ดังรูป 6.32



รูปที่ 6.29 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์

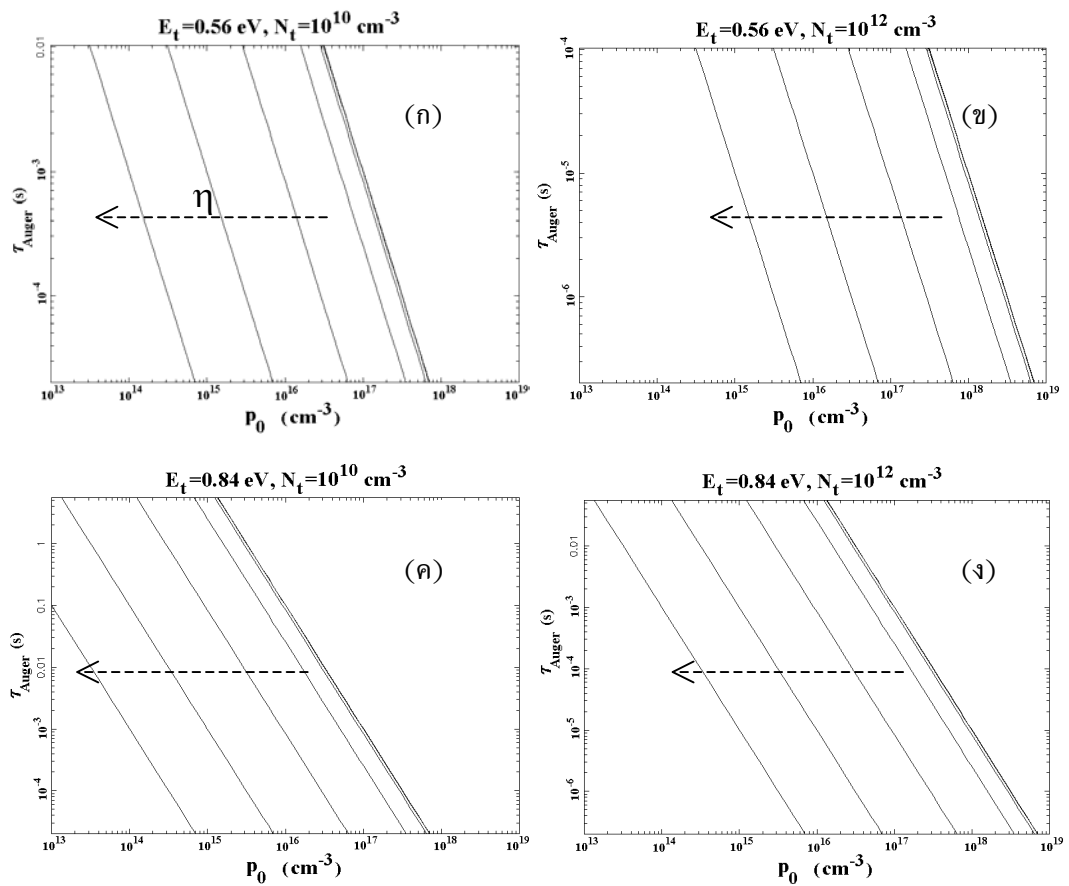
ก) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ข) $p_0 = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ค) $p_0 = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ง) $p_0 = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

จะเห็นได้ว่า ระดับพลังงานของสารเจือปน(E_t), ความหนาแน่นของสารเจือปน(N_t) ไม่ได้มีผลต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์เลย แต่ความหนาแน่นของพาหะข้างมากในที่นี้คือสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p_0) ที่มีความสัมพันธ์กับแต่ระดับพลังงานเฟอร์มิ(F_0) และความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินในเทอมของ η มีผลต่อเวลาอายุของพาหะ กล่าวคือเมื่อความหนาแน่นของพาหะข้างมากมีมากขึ้น เวลาอายุของพาหะก็จะน้อยลง และเมื่อ η มีค่ามากขึ้น เวลาอายุของพาหะก็จะน้อยลงด้วย ดังรูป 6.30 เช่นกัน



รูปที่ 6.30 แสดงผลของความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์

- ก) $E_t = 0.56 \text{ eV}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ข) $E_t = 0.56 \text{ eV}$, $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
 ค) $E_t = 0.84 \text{ eV}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ง) $E_t = 0.84 \text{ eV}$, $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ในกระบวนการออเจอร์นั้น สิ่งที่มีผลต่อเวลาอายุของพาหะคือความหนาแน่นของพาหะข้างมาก และความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินซึ่งมีความความสัมพันธ์กันกับค่า η

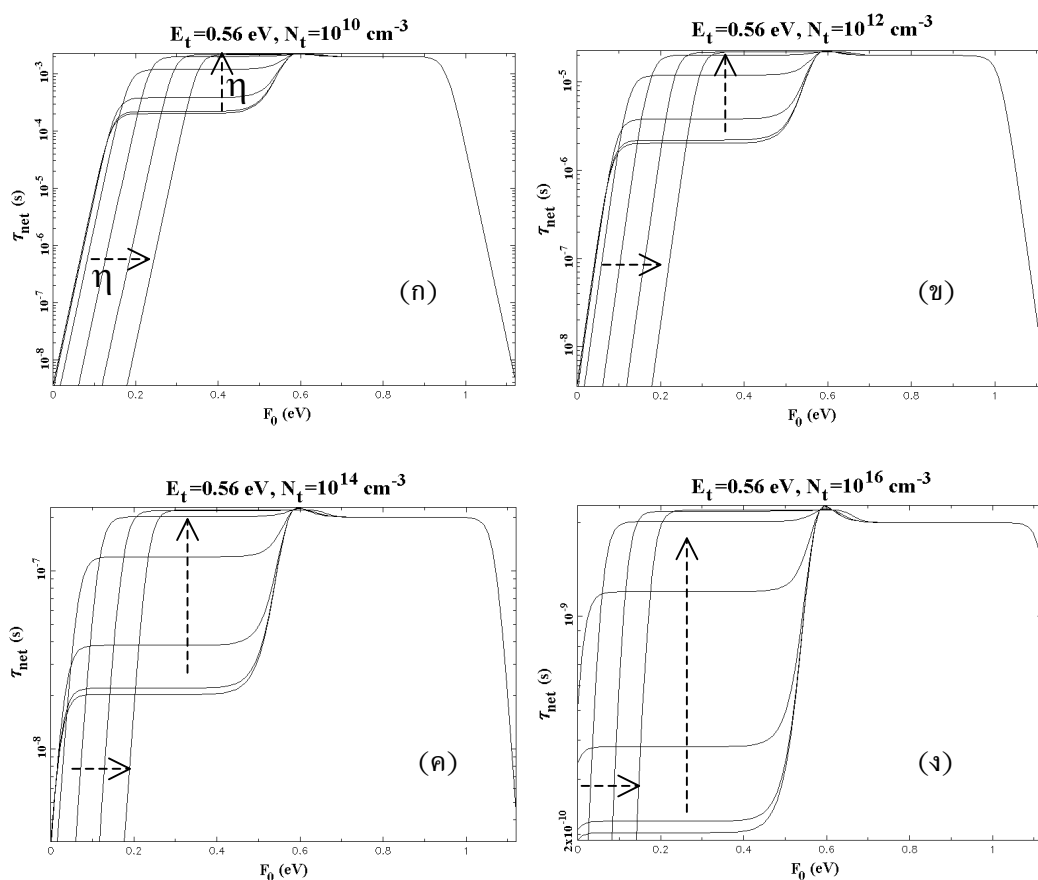
6.2.1.3 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะรวม จะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ

6.2.1.3.1 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะรวมจากทฤษฎี

6.2.1.3.2 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะรวมจากข้อมูลผลการทดลอง

6.2.1.3.1 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะรวมจากทฤษฎี

เวลาอายุการรวมตัวของพาหะรวม ตามสมการ(3.70) ซึ่งเป็นผลรวมของเวลาอายุของพาหะ 2 กระบวนการคือกระบวนการ SRH และกระบวนการออเจอร์ ดังรูปที่ 6.31



รูปที่ 6.31 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะรวม ที่ $E_t = 0.56$ eV

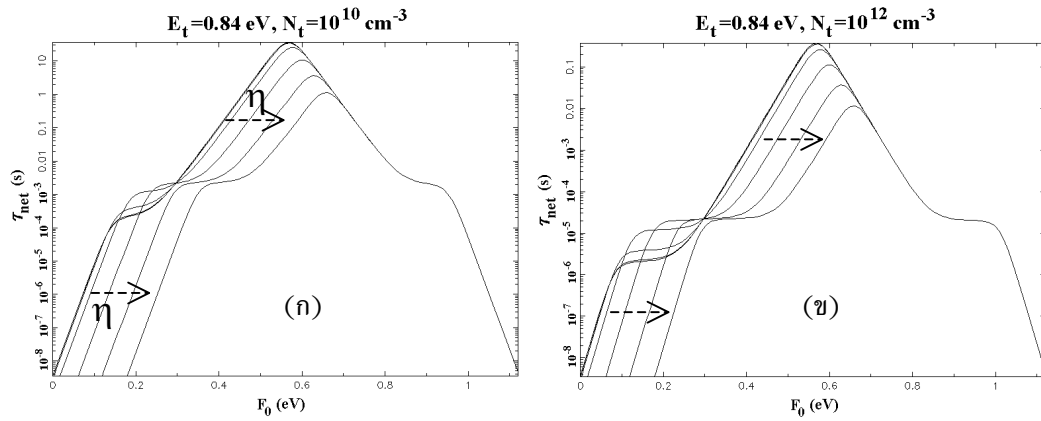
ก) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ข) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ค) $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

ง) $N_t = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาอายุของพาหะรวมจะมีค่ามากที่สุด เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน และเวลาอายุของพาหะรวมจะมีค่าน้อยลงเมื่อสารเจือปนมีปริมาณมากขึ้น เมื่อมีสารเจือปนที่มีระดับพลังงานสูงขึ้น เวลาอายุของพาหะก็จะน้อยลง ดังรูปที่ 6.32

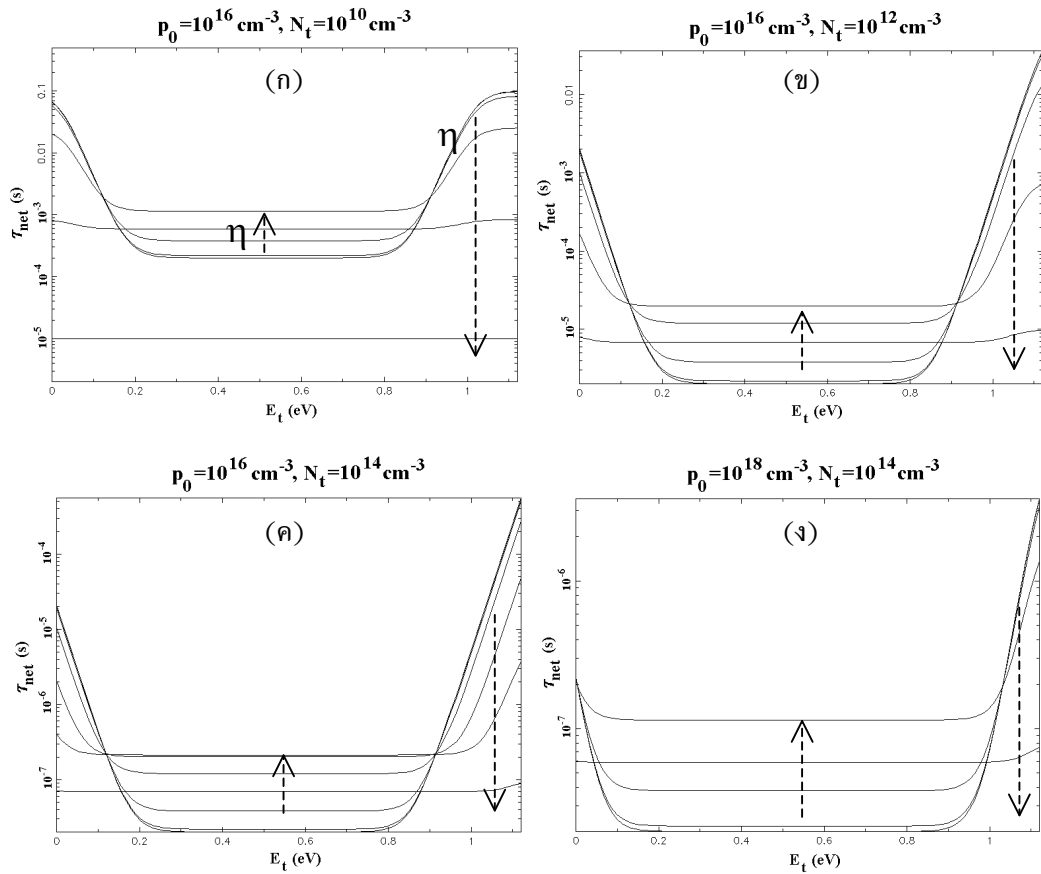


รูปที่ 6.32 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะรวม ที่ $E_t = 0.84$ eV

ก) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ข) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

หรืออาจจะพิจารณาจากรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.33 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่อเวลาอายุของพาหะรวม

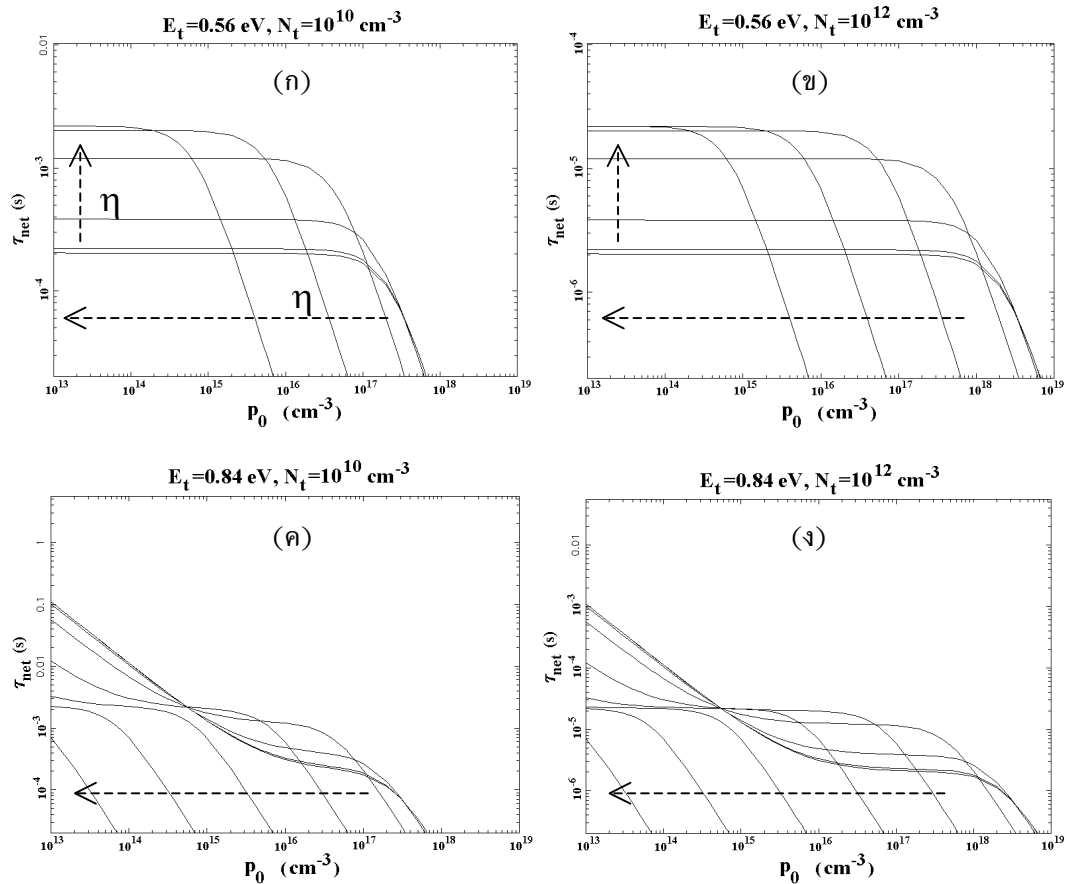
ก) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ข) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ค) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

ง) $p_0 = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

จะเห็นได้ว่า เมื่อระดับพลังงานของสารเจือปนอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 eV เวลาอายุของพาหะรวมจะมีค่าเท่ากันตลอด นั่นคือจะไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือปน แต่จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารเจือปน และจะขึ้นอยู่กับพาหะส่วนเกินซึ่งมีความสัมพันธ์กับ η ตามสมการ(6.4)



รูปที่ 6.34 แสดงผลของความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะรวม

ก) $E_t = 0.56 \text{ eV}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

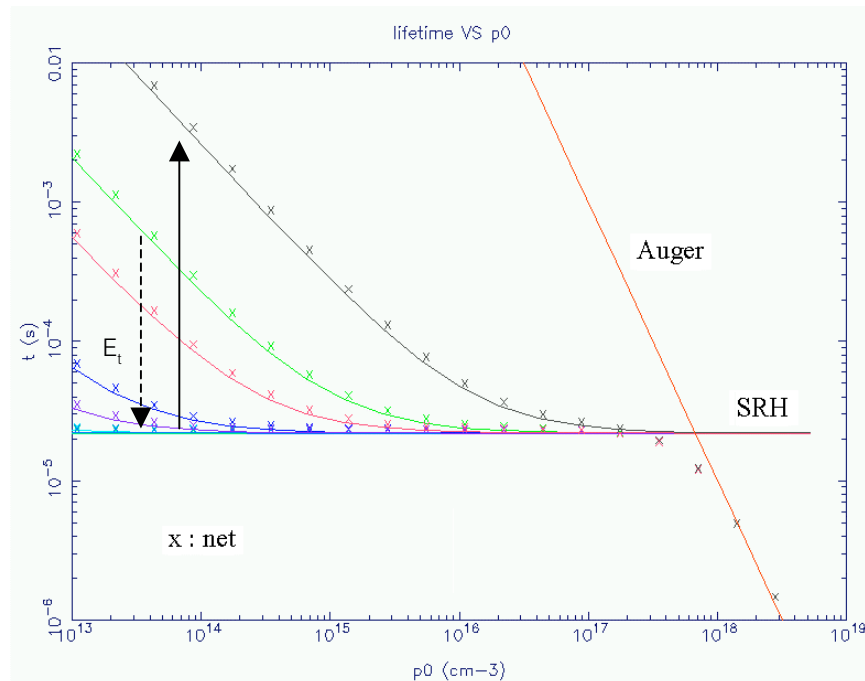
ข) $E_t = 0.56 \text{ eV}$, $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ค) $E_t = 0.84 \text{ eV}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ง) $E_t = 0.84 \text{ eV}$, $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

จะเห็นได้ว่า ถ้าการฉีดพาหะเท่าเดิม(η คงที่) ที่ความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่ำ ๆ กระบวนการ SRH จะมีอิทธิพลมาก แต่ที่ความหนาแน่นของพาหะข้างมากสูง ๆ กระบวนการออเจอร์จะมีอิทธิพลมาก เมื่อการฉีดพาหะเท่าเดิม(η คงที่) โดยเวลาอายุของพาหะจะลดลงอย่างรวดเร็ว

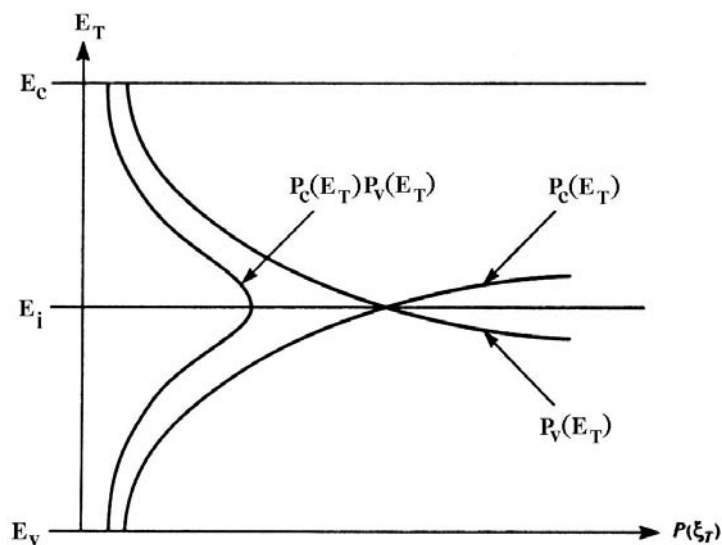
นำมาเขียนกราฟระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อย(τ_n)กับพาหะข้างมากชนิดพี(p_0) โดยเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างพลังงานตั้งแต่ 0 eV ถึง 1.12 eV จะเป็นดังรูปที่ 6.35



รูปที่ 6.35 แสดงเวลาอายุการรวมตัวของพาหะกับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

จะเห็นได้ว่า เมื่อความหนาแน่นของพาหะข้างมากมีค่าต่ำๆ กระบวนการรวมตัวแบบ SRH จะมีอิทธิพลมากต่อการรวมตัวของพาหะ เมื่อความหนาแน่นของพาหะข้างมากมีค่าสูงๆ กระบวนการรวมตัวแบบออเจอร์ จะมีอิทธิพลมากต่อการรวมตัวของพาหะ และระดับพลังงานของสารเจือปน (energy level of impurity หรือ E_i) จะมีค่าตั้งแต่ระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ (valence energy level หรือ E_v) จนถึงระดับพลังงานแถบคอนดักชัน (conduction energy level หรือ E_c) จะเห็นได้ว่าที่บริเวณความหนาแน่นของพาหะข้างมากมีค่าประมาณ $10^8 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ เมื่อระดับพลังงานของสารเจือปนมีค่ามากขึ้นจนถึงบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (ประมาณ 0.56 eV) เวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะลดลงตามเส้นประสีดำถึง $40 \mu\text{s}$ และจะมีค่ามากขึ้นอีกครั้งเมื่อระดับพลังงานของสารเจือปนมีค่ามากขึ้นจากบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานไปจนถึงระดับพลังงานแถบคอนดักชันตามเส้นทึบสีดำ

แสดงว่าเมื่อระดับพลังงานของสารเจือปนมีค่าอยู่ใกล้บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะมีการรวมตัวกันของพาหะมากที่สุดเนื่องจากเวลาของพาหะข้างน้อยมีค่าน้อยที่สุดตามสมการ (3.9) และจะมีการรวมตัวกันของพาหะน้อยลงเมื่อระดับพลังงานของสารเจือปนมีค่าเข้าใกล้ขอบของช่องว่างพลังงานดังรูปที่ 6.36



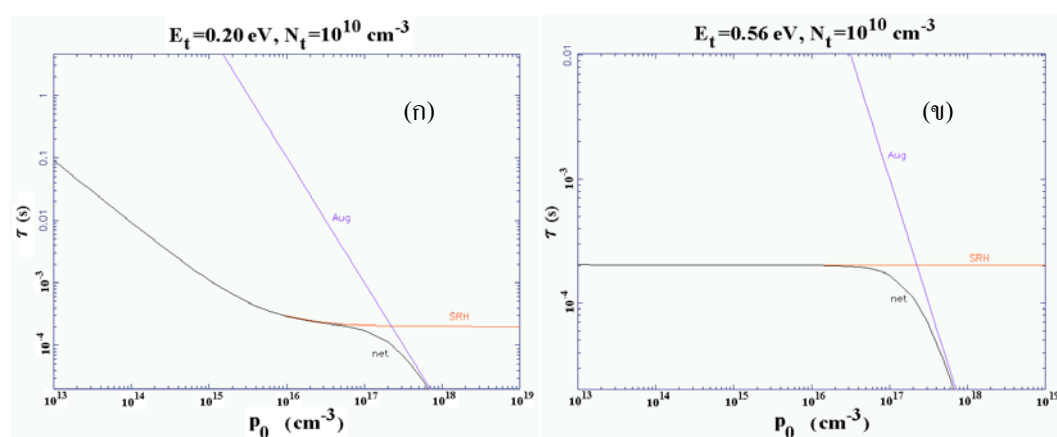
รูปที่ 6.36 แสดงความน่าจะเป็นที่จะเกิดการรวมตัวกันของพาหะที่บริเวณต่างๆของช่องว่างพลังงาน

$P_c(E_T)$ คือความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชันจะเกิดการรวมตัว

$P_v(E_T)$ คือความน่าจะเป็นที่โฮลจากแถบวาเลนซ์จะเกิดการรวมตัว

$P_c(E_T)P_v(E_T)$ คือความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดการรวมตัวกัน ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

สำหรับระดับพลังงานแตรปที่มีต่อเวลาอายุการรวมตัวของพาหะ จะมีผลมากเมื่อมีการโดปน้อยๆ (น้อยกว่า $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) ดังรูปที่ 6.37 (ก) และ (ข) ระดับพลังงานแตรปที่อยู่ตื้น (shallow trap) จะเกิดกระบวนการ SRH มากกว่าระดับพลังงานแตรปที่อยู่ลึก (deep trap)



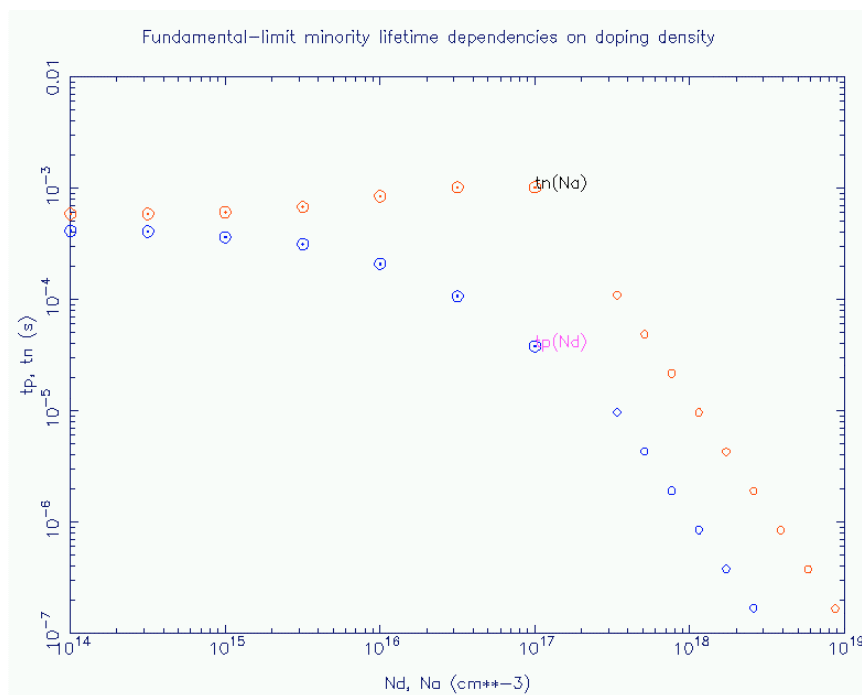
รูปที่ 6.37 แสดงผลของพลังงานแตรปที่มีต่อเวลาอายุการรวมตัวของพาหะเมื่อมีการโดปน้อยๆ

ก) ระดับพลังงานแตรปที่อยู่ตื้น ($E_t - E_v = 0.2 \text{ eV}$)

ข) ระดับพลังงานแตรปที่อยู่ลึก ($E_t - E_v = 0.56 \text{ eV}$)

6.2.2.2 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะจากข้อมูลที่สับคั่นในข้อมูลที่สับคั่นมา[13]

ดังรูปที่ 6.38 มาคำนวณหาชุดสมการโดยวิธี Spline Interpolation



รูปที่ 6.38 แสดง Fundamental-limit ของเวลาอายุของพาหะข้างน้อยโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ($\tau_p(N_D)$) และเวลาอายุของพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($\tau_n(N_A)$) ใน nondegenerate silicon.

สำหรับ nondegenerately doped silicon นั้น กระบวนการ SRH จะมีอิทธิพลมากและเวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะถูกควบคุมด้วยความหนาแน่นของความบกพร่อง(defects)ที่อยู่ในซิลิกอน ได้มีการทดลองวัดค่าเวลาอายุของพาหะในสารกึ่งตัวนำซิลิกอน แต่จะมีสิ่งรบกวนมาจากสารเจือปน ทำให้ค่าที่วัดได้ยังมีข้อผิดพลาดอยู่ จึงได้มีการเสนอแบบจำลองขึ้นมา โดยการใส่สารเจือปนลงไปในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี แล้ววัดค่าเวลาอายุของพาหะ เมื่อมีความหนาแน่นของสารที่เติมลงไปค่าต่าง ๆ กัน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี ก็จะได้ค่าเวลาอายุของพาหะที่นานที่สุด(longest carrier lifetime) อยู่ในระดับ 1 ms สำหรับซิลิกอน เรียกค่าที่ได้นี้ว่า fundamental-limit minority lifetime

จากรูปที่ 6.38 จะเห็นได้ว่า เมื่อความหนาแน่นของโดเนอร์และเอกเซ็ปเตอร์(donor and acceptor densities)มีค่ามากกว่า 10^{17} cm^{-3} เวลาอายุของการรวมตัวของพาหะจะขึ้นอยู่กับกระบวนการแบบออเจอร์ ซึ่งจะมีอิทธิพลมากเมื่อความหนาแน่นของพาหะข้างมากมีค่าสูงๆ โดยที่อายุเวลาของพาหะข้างน้อยจะแปรผกผันกับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

เมื่อใช้วิธี Spline Interpolation แล้ว จะได้ชุดสมการที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุการรวมตัวของพาหะข้างน้อยกับความหนาแน่นของพาหะข้างมากดังตารางที่ 6.7 และ 6.8

ตารางที่ 6.7 แสดงค่าของตัวแปรต่างๆในชุดสมการ(3.77)สำหรับ $\tau_n(N_a)$

j	x_j	$a(j,0)$ (10^{-6} s)	$a(j,1)$ (10^{-6} s)	$a(j,2)$ (10^{-6} s)	$a(j,3)$ (10^{-6} s)
0	0.0000e+00	0.5760e+03	0.0000e+00	-.2322e+02	0.4645e+02
1	0.5000e+00	0.5760e+03	0.1161e+02	0.4645e+02	0.1265e+02
2	0.1000e+01	0.5950e+03	0.6755e+02	0.6542e+02	0.1590e+03
3	0.1500e+01	0.6650e+03	0.2522e+03	0.3039e+03	-.2965e+03
4	0.2000e+01	0.8300e+03	0.3337e+03	-.1408e+03	0.3069e+03
5	0.2500e+01	0.1000e+04	0.4230e+03	0.3195e+03	-.2331e+04
6	0.3000e+01	0.1000e+04	-.1006e+04	-.3177e+04	0.3177e+04
7	0.3500e+01	0.1000e+04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

ตารางที่ 6.8 แสดงค่าของตัวแปรต่างๆในชุดสมการ(3.77)สำหรับ $\tau_p(N_d)$

j	x_j	$a(j,0)$ (10^{-6} s)	$a(j,1)$ (10^{-6} s)	$a(j,2)$ (10^{-6} s)	$a(j,3)$ (10^{-6} s)
0	0.0000e+00	0.4050e+03	-.1000e+02	0.8064e+02	-.1613e+03
1	0.5000e+00	0.4000e+03	-.5032e+02	-.1613e+03	0.1638e+03
2	0.1000e+01	0.3550e+03	-.8872e+02	0.8447e+02	-.1901e+03
3	0.1500e+01	0.3080e+03	-.1468e+03	-.2006e+03	0.1644e+03
4	0.2000e+01	0.2050e+03	-.2241e+03	0.4600e+02	0.4397e+01
5	0.2500e+01	0.1050e+03	-.1748e+03	0.5260e+02	0.5160e+02
6	0.3000e+01	0.3720e+02	-.8350e+02	0.1300e+03	-.1300e+03
7	0.3500e+01	0.1170e+02	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

จากตารางที่ 6.7 และ 6.8 มีข้อมูล 8 จุด โดยค่าคงที่ $a(j,0)$, $a(j,1)$, $a(j,2)$ และ $a(j,3)$ มีหน่วยเป็น 10^{-6} s ในตารางที่ 6.7 ตัวแปร x_j แทนความหนาแน่นของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพี (N_a) และในตารางที่ 6.8 ตัวแปร x_j แทนความหนาแน่นของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N_d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ(6.9) และ (6.10) ตามลำดับ

$$N_a = 10^{x_j} \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \quad (6.9)$$

$$N_d = 10^{x_j} \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \quad (6.10)$$

6.2.2 อัตราการรวมตัวของพาหะ(Recombination Rate : R)

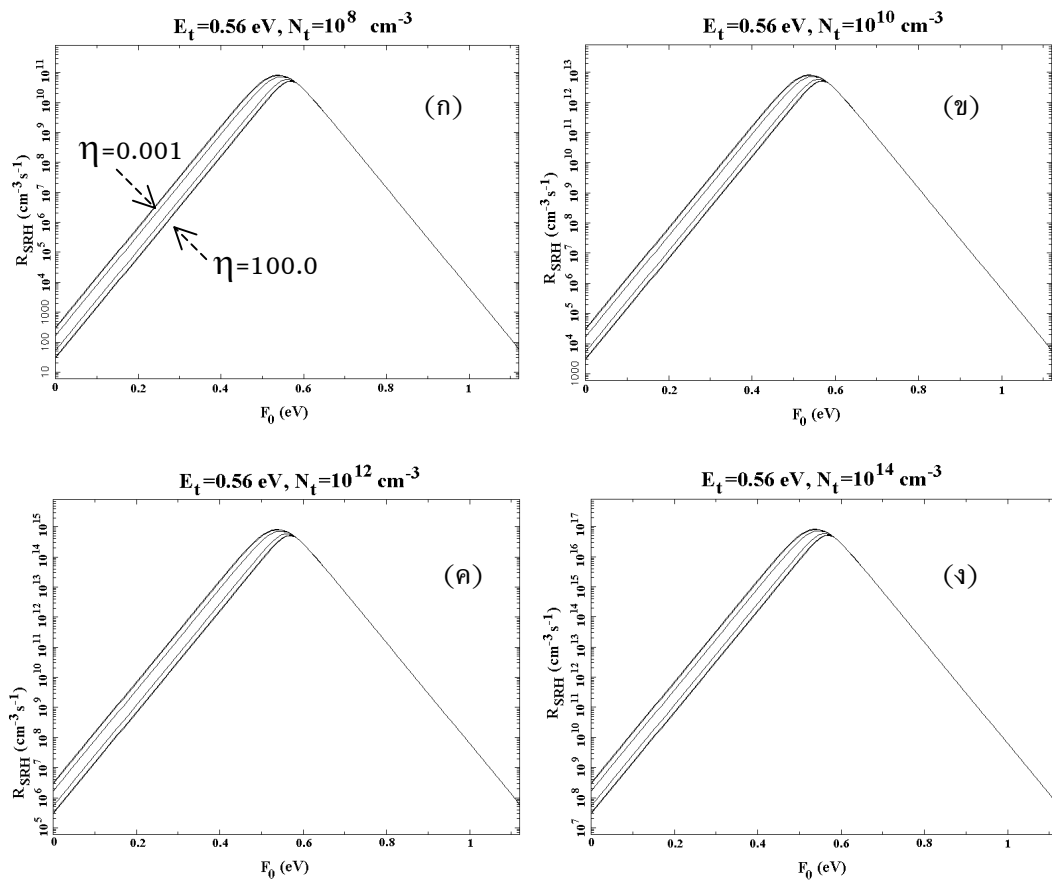
อัตราการรวมตัวของพาหะ มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ จะพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ

6.2.2.1 อัตราการรวมตัวรวมของพาหะจากทฤษฎี

6.2.2.2 อัตราการรวมตัวของพาหะจากข้อมูลที่สืบค้น

6.2.2.1 อัตราการรวมตัวรวมของพาหะจากทฤษฎี

จากหัวข้อ 6.2.1.1 ซึ่งเป็นกระบวนการ SRH และอัตราการรวมตัวของพาหะจากสมการ(4.78) ได้ผลการจำลองแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรวมตัวของพาหะและระดับพลังงานเฟอร์มิดังรูปที่ 6.39



รูปที่ 6.39 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $E_t = 0.56 \text{ eV}$

ก) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$

ข) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

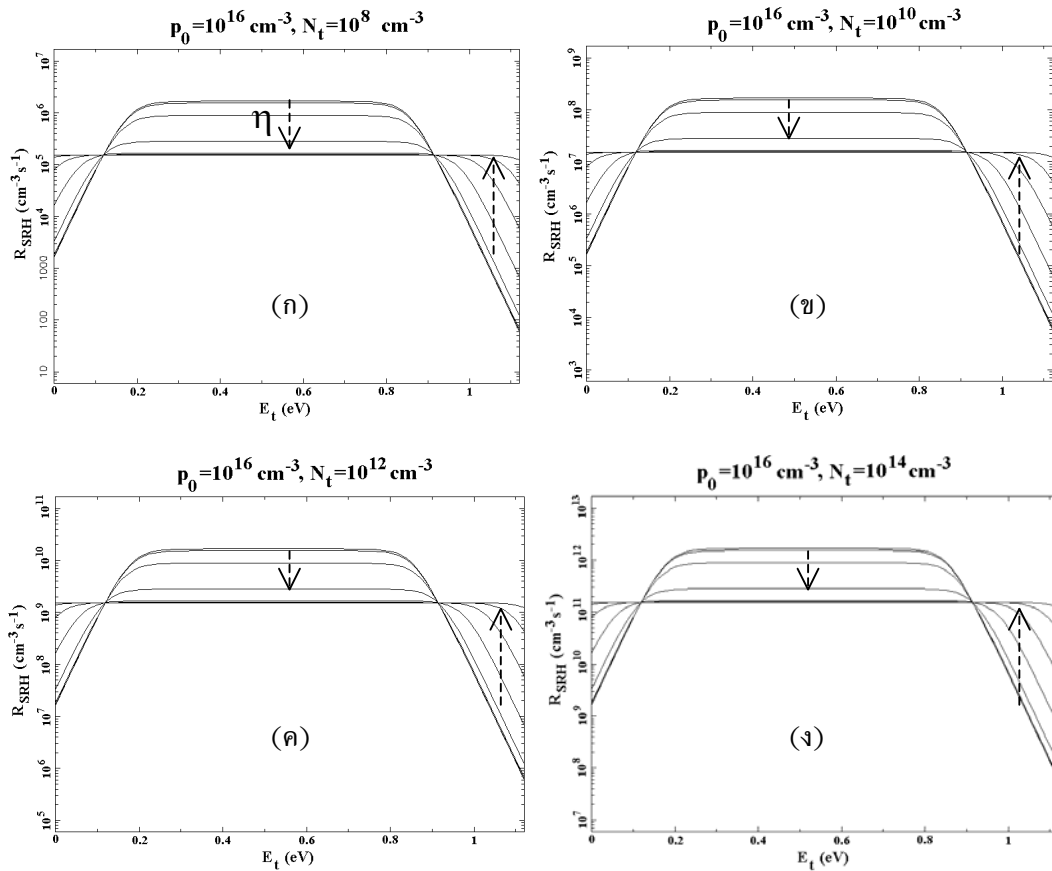
ค) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ง) $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

จะเห็นได้ว่า ในกระบวนการ SRH จะมีขอบเขตการฉีดพาหะอย่างต่ำ ($\eta < 0.001$) และขอบเขตการฉีดพาหะอย่างสูง ($\eta > 100.0$) ทำให้อัตราการรวมพาหะไม่เกินขอบเขตนี้เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิมีน้อยกว่าบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน และจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิมากกว่าบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานไม่ว่าจะมีการฉีดพาหะมากหรือน้อยก็ตาม

อัตราการรวมตัวของพาหะจะมีค่ามากที่สุดเมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานและจะมีค่าลดลงเมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ห่างออกจากบริเวณกึ่งกลางไปยังขอบของช่องว่างพลังงาน แสดงว่าความน่าจะเป็นอิเล็กตรอนและโฮลจะมารวมตัวกันที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานมีมากที่สุด

เมื่อความหนาแน่นของสารเจือปนมีมากขึ้น โอกาสที่จะเกิดการรวมตัวกันของพาหะก็สูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 6.39 ก)-ง) ตามลำดับ หรืออาจจะแสดงได้ดังรูปที่ 6.40 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระดับพลังงานของสารเจือปนอยู่ในบริเวณกลางของช่องว่างพลังงานตั้งแต่ 0.2-0.8 eV ที่ความหนาแน่นเดียวกัน จะเกิดอัตราการรวมตัวของพาหะเท่า ๆ กัน เมื่อการเจือปนพาหะสูงขึ้นถึง $\eta > 100.0$ อัตราการรวมตัวของพาหะจะมีค่าเกือบเท่ากันตลอดช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 6.40 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

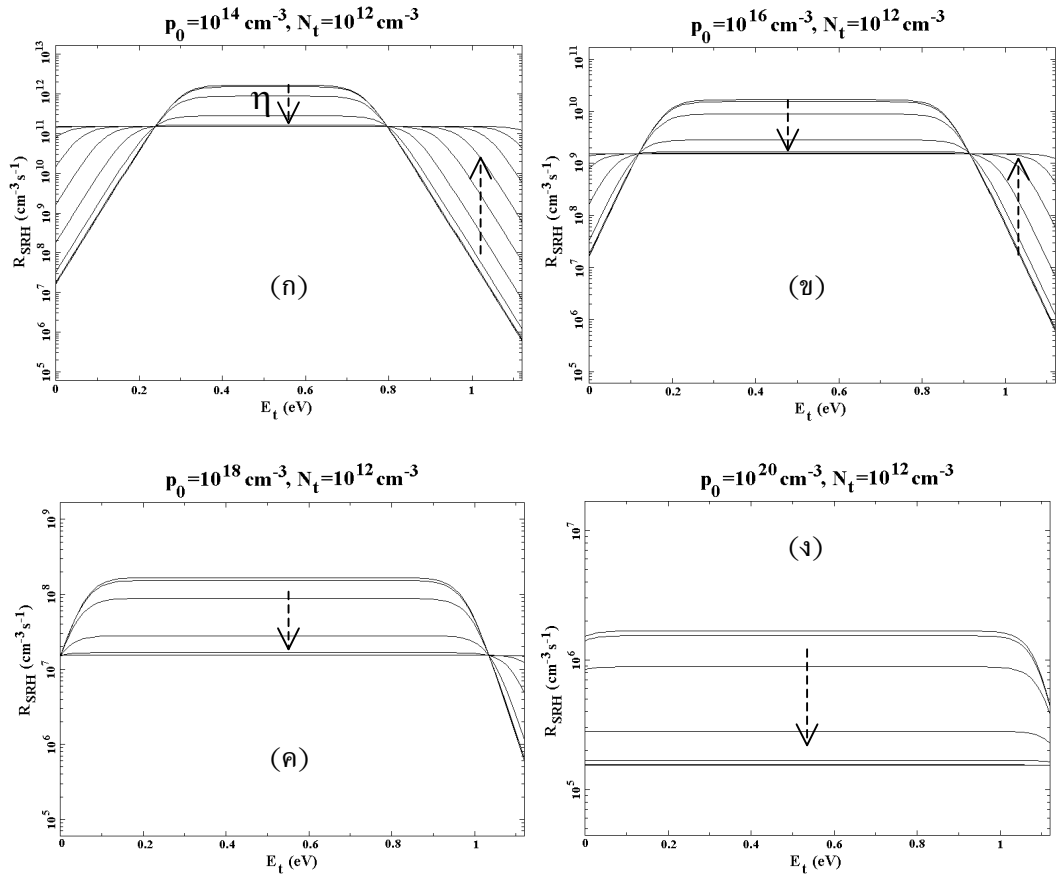
ก) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$

ข) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ค) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ง) $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือปนชนิดเดียวกันและความหนาแน่นของสารเจือปนเท่ากัน แต่มีปริมาณการโดปต่างกัน จะเกิดอัตราการรวมตัวของพาหะดังรูปที่ 6.40 เมื่อมีการโดปสูงขึ้น ในกระบวนการ SRH จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะน้อยลงไปเรื่อย ๆ



รูปที่ 6.41 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

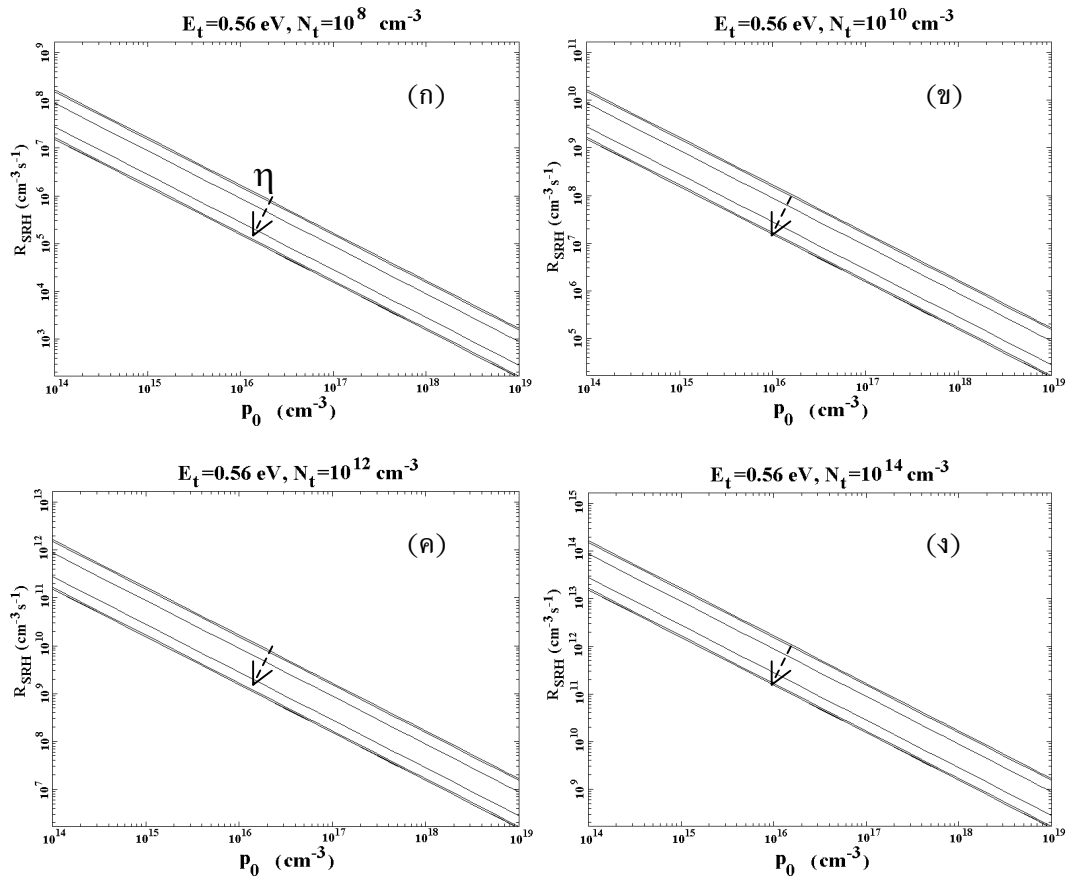
ก) $p_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

ข) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

ค) $p_0 = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

ง) $p_0 = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

เมื่อนำผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่ออัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มาเขียนกราฟ จะได้ผลดังรูปที่ 6.42 อัตราการรวมตัวของพาหะที่ความหนาแน่นของพาหะข้างมากใดๆ จะมีขอบเขตน้อยที่สุดและมากที่สุดสำหรับการฉีดพาหะมากและน้อย ตามลำดับ และผลของความหนาแน่นของสารเจือปนที่มาก จะทำให้มีอัตราการรวมตัวของพาหะมากขึ้นด้วย



รูปที่ 6.42 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $E_t = 0.56$ eV

ก) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$

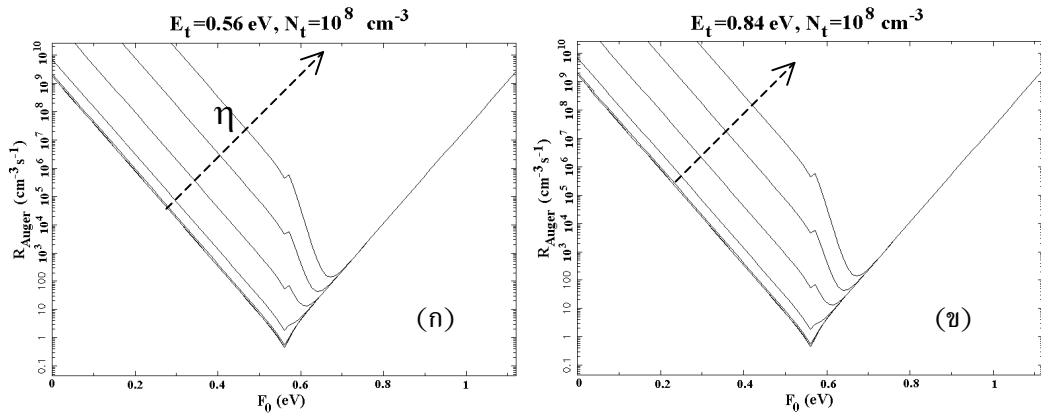
ข) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ค) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ง) $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

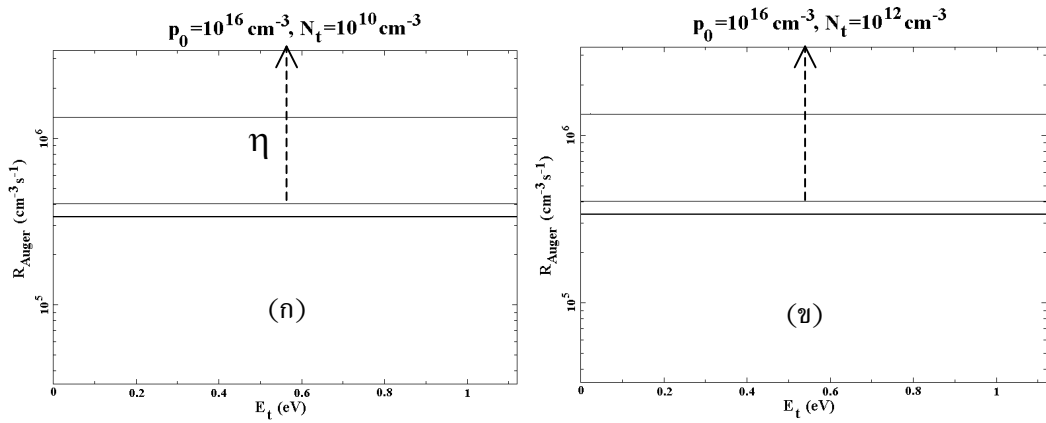
สำหรับอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการแบบอเจอร์ จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งระดับพลังงานเฟอร์มิ ดังรูปที่ 6.43

จากรูปที่ 6.44 อัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการแบบอเจอร์ จะไม่ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานและความหนาแน่นของสารเจือปน แต่จะขึ้นอยู่กับระดับการฉีดพาหะ(η)



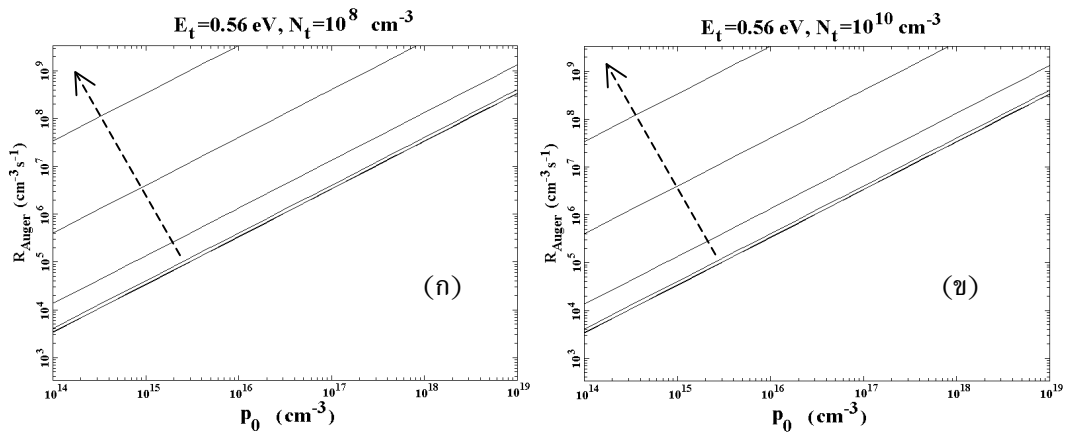
รูปที่ 6.43 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์

ก) $E_t = 0.56 \text{ eV}$, $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ข) $E_t = 0.84 \text{ eV}$, $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 6.44 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์

ก) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ข) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

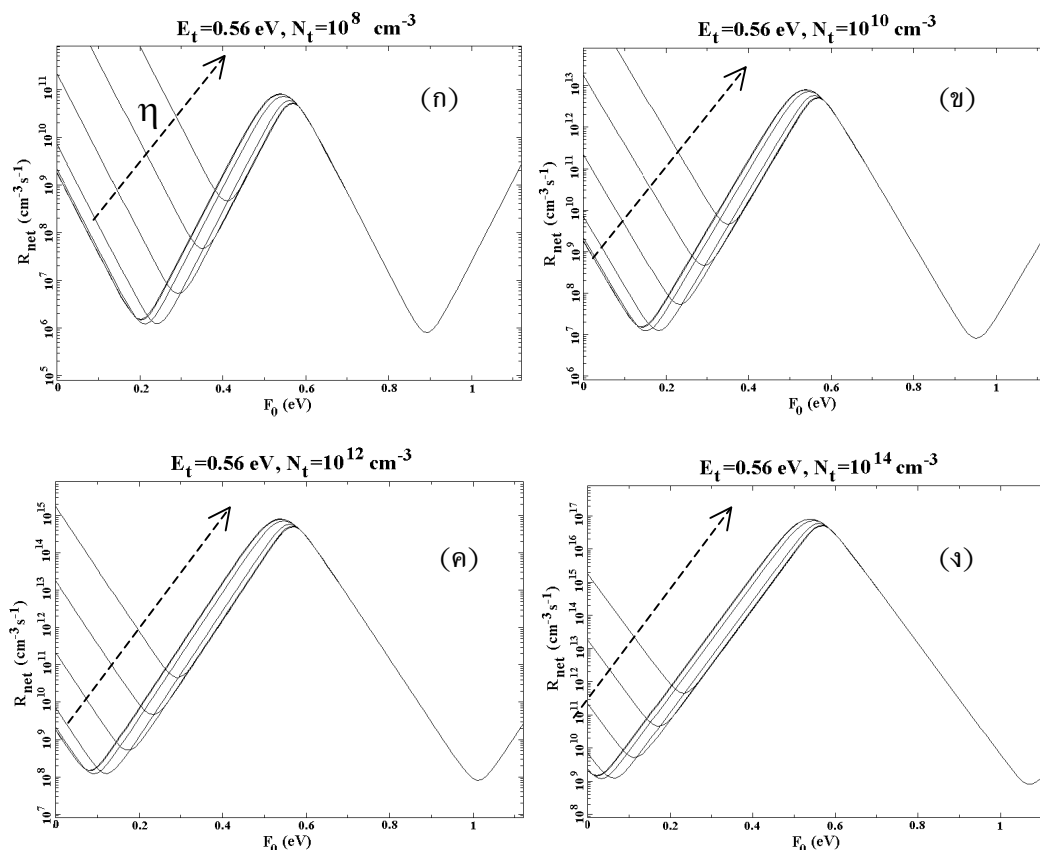


รูปที่ 6.45 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์ ที่ $E_t = 0.56 \text{ eV}$

ก) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ข) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

จากรูปที่ 6.45 อัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์จะไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของสารเจือปน แต่จะเพิ่มขึ้นตามการฉีดพาหะ

จากกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งสองกระบวนการ จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะรวมดังรูปที่ 6.46



รูปที่ 6.46 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะรวม มี $E_t = 0.56$ eV

ก) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$

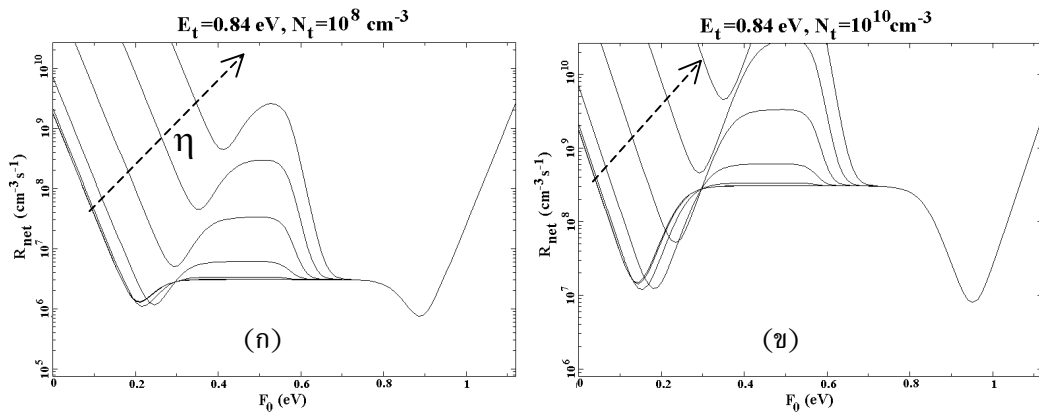
ข) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ค) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ง) $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

หลังจากพิจารณาทั้งสองกระบวนการที่เกิดขึ้นแล้ว เมื่อมีการฉีดพาหะต่ำ ๆ ($\eta < 0.001$) จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะมากที่สุดในบริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน และจะมีค่าลดลงเมื่อระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่ห่างออกไปจากบริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน และถ้ามีการฉีดพาหะมากขึ้น อัตราการรวมตัวของพาหะบริเวณใกล้ๆ แถววาเลนซ์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

สำหรับสารเจือปนที่มีระดับพลังงานอื่นเช่น $E_t = 0.84$ eV เป็นต้น จะมีผลการจำลองแบบดังรูปที่ 6.47 เมื่อสารเจือปนที่มีระดับพลังงานเข้าใกล้ขอบของช่องว่างพลังงานมากขึ้น การฉีดพาหะต่ำ ๆ จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะในบริเวณ 0.3–0.8 eV เท่า ๆ กัน แต่ถ้ามีการฉีดพาหะสูงขึ้นอัตราการรวมตัวของพาหะในแต่ละบริเวณจะแตกต่างกันไป



รูปที่ 6.47 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะรวม มี $E_t = 0.84$ eV

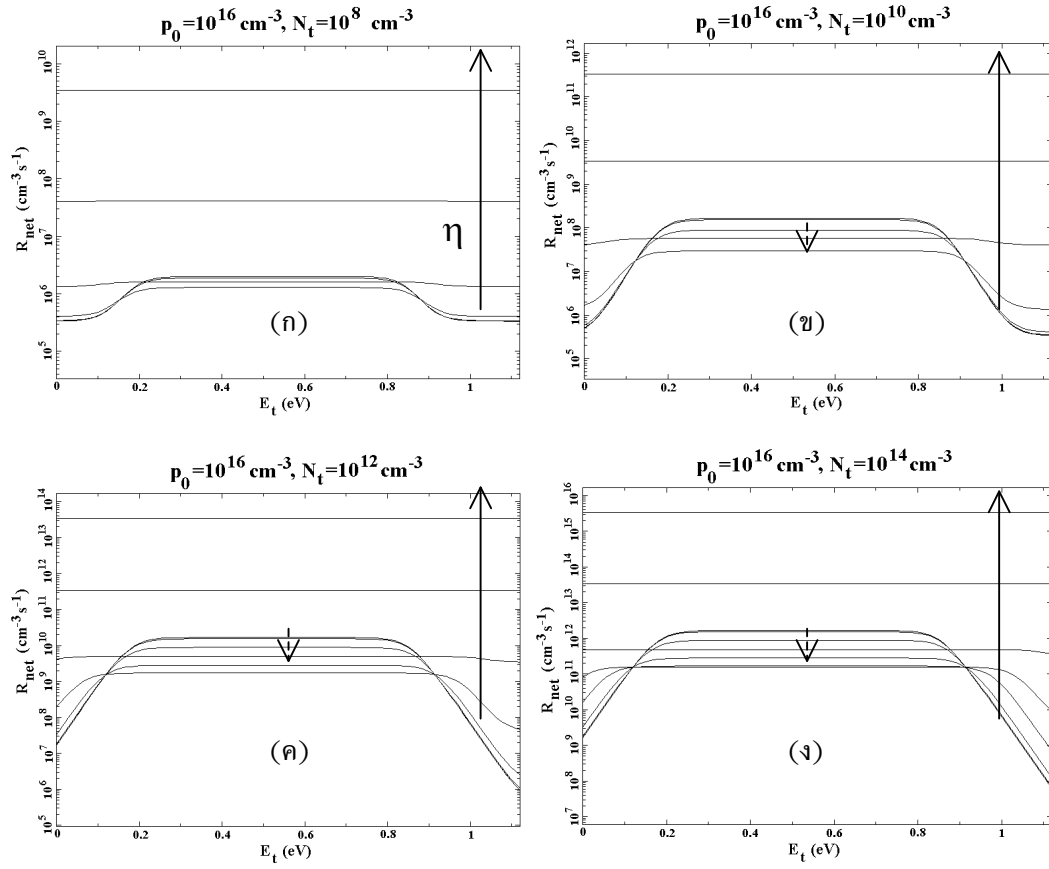
ก) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ข) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่ออัตราการรวมตัวของพาหะ เมื่อ $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ดังรูป 6.51 จะเห็นได้ว่า อัตราการรวมตัวของพาหะจะมีค่าเท่าๆกัน เมื่อระดับพลังงานสารเจือปนอยู่ระหว่าง 0.2–0.8 eV โดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีการฉีดพาหะต่ำๆ ($\eta < 0.001$) และจะมีค่าน้อยลงเมื่อมีการฉีดพาหะสูงขึ้นจนกระทั่งไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อ $\eta > 100.0$ เมื่อระดับพลังงานสารเจือปนเข้าใกล้ขอบของช่องว่างพลังงาน อัตราการรวมตัวของพาหะก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว

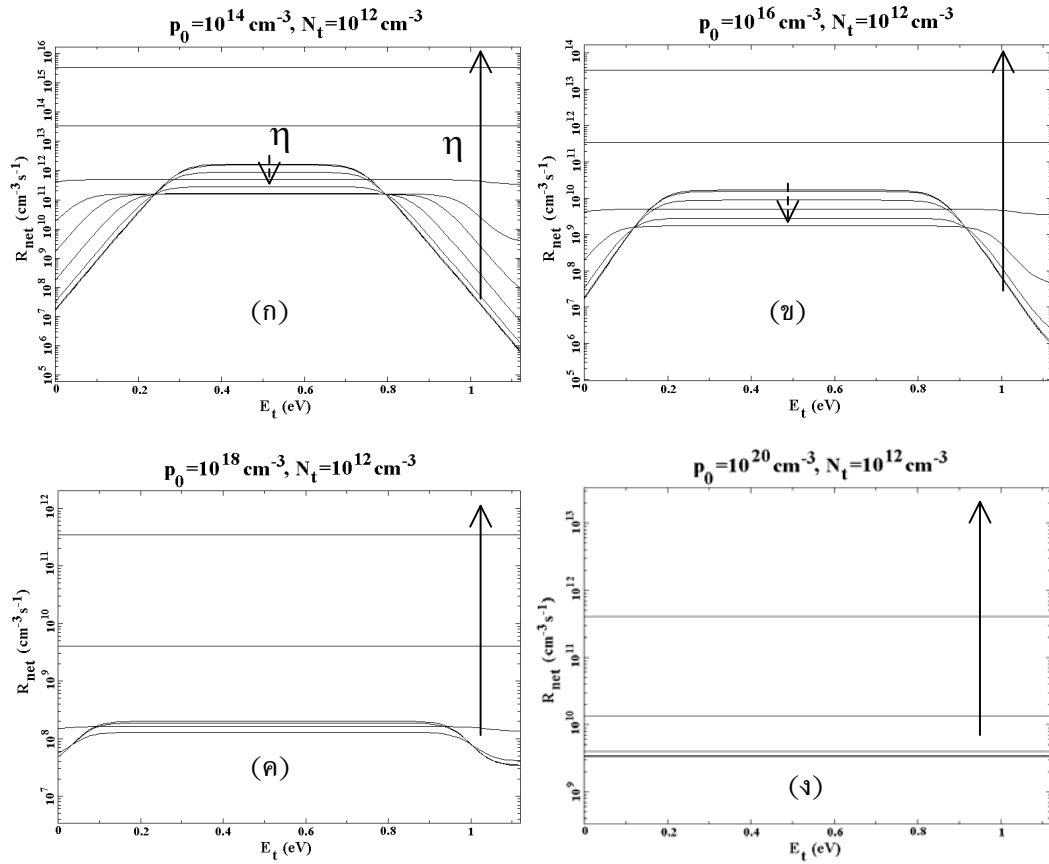
จากรูปที่ 6.48 ก)–ง) เมื่อสารเจือปนมีความหนาแน่นมากขึ้น อัตราการรวมตัวของพาหะก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

เมื่อมีการฉีดพาหะน้อยๆ ในบริเวณกลางช่องว่างพลังงานจะมีอัตราการรวมตัวของพาหะเท่าๆกัน เมื่อการฉีดพาหะเพิ่มขึ้น อัตราการรวมตัวของพาหะจะลดตามทฤษฎีเส้นประ และเมื่อการฉีดพาหะสูงๆ ($\eta > 100.0$) อัตราการรวมตัวของพาหะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามทฤษฎีเส้นทึบ สาเหตุเนื่องมาจากกระบวนการออเจอร์ที่มีพาหะส่วนเกินมากนั่นเอง

และเช่นเดียวกัน เมื่อมีการโด๊ปด้วยพาหะข้างมากให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น และกำหนดให้สารเจือปนมีความหนาแน่น $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ปรากฏผลดังรูปที่ 6.49

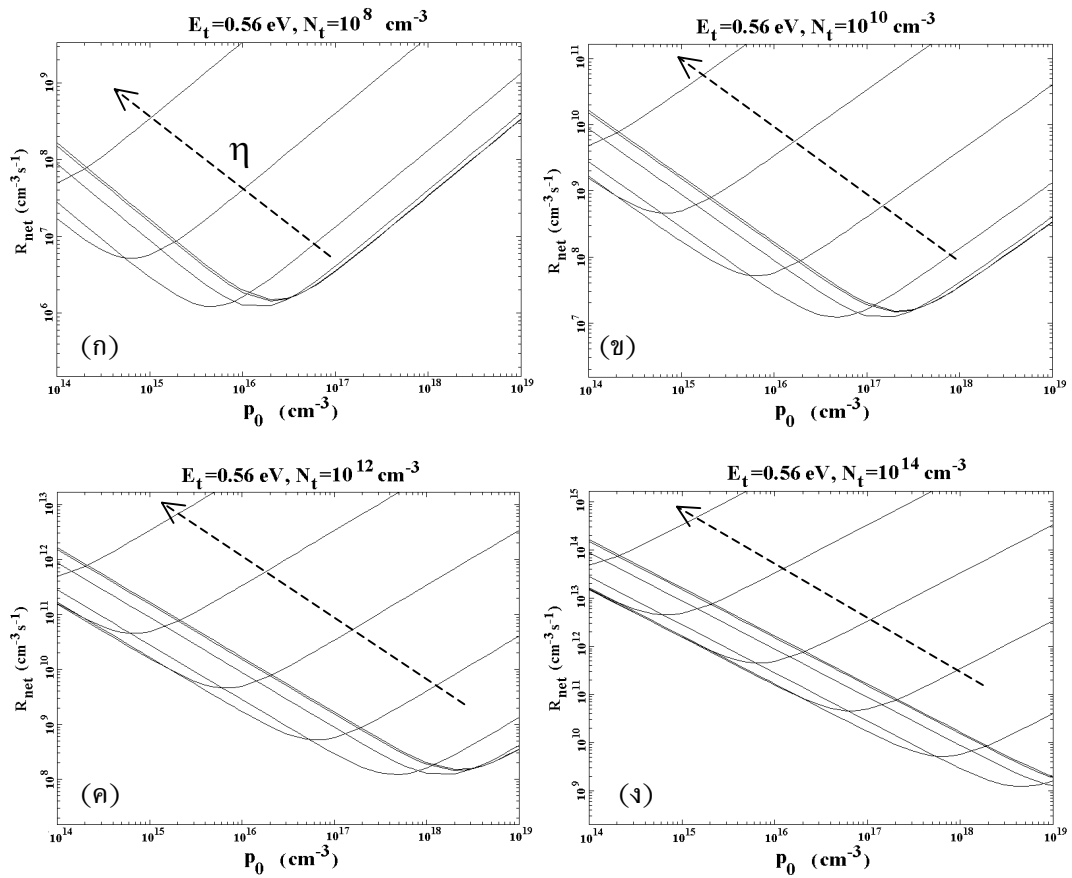


รูปที่ 6.48 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่ออัตราการรวมตัวของพาหะรวม ที่ $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 ก) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ข) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ค) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ง) $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 6.49 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่ออัตราการรวมตัวของพาหะรวม ที่ $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
 ก) $p_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ข) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ค) $p_0 = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ง) $p_0 = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

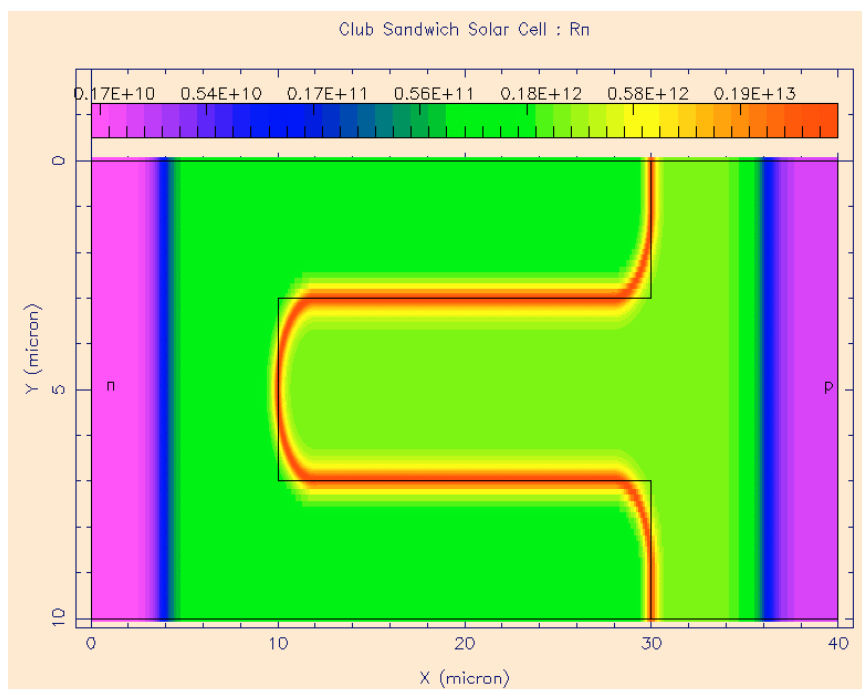
เมื่อพาหะข้างมากเพิ่มขึ้นและสารเจือปนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการรวมตัวของพาหะรวมเปลี่ยนไปดังรูปที่ 6.50



รูปที่ 6.50 แสดงผลของความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่ออัตราการรวมตัวของพาหะรวม ที่ $E_t = 0.56$ eV
 ก) $N_t = 10^8$ cm $^{-3}$ ข) $N_t = 10^{10}$ cm $^{-3}$ ค) $N_t = 10^{12}$ cm $^{-3}$ ง) $N_t = 10^{14}$ cm $^{-3}$

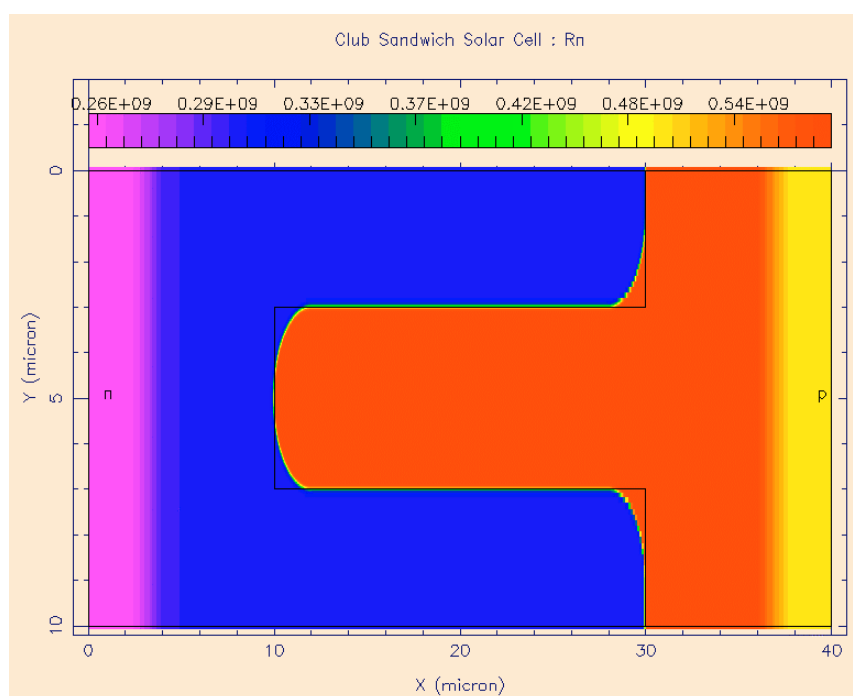
ความหนาแน่นของพาหะข้างมากจะมีผลทำให้อัตราการรวมตัวของพาหะเปลี่ยนแปลงและความหนาแน่นของสารเจือปนจะทำให้อัตราการรวมตัวของพาหะมีค่าน้อยลงด้วย นอกจากนี้เมื่อมีพาหะส่วนเกินมาก ๆ อัตราการรวมตัวของพาหะก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามทิศทางของลูกศร

เมื่อทราบอัตราการรวมตัวของพาหะจากทฤษฎีที่คำนวณได้จากสมการ(4.78) และเวลาการรวมตัวรวมจากสมการ(4.70)แล้ว จะนำผลที่ได้มาคำนวณหาอัตราการรวมตัวของพาหะในแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะกำหนดให้สารเจือปนมีระดับพลังงาน $E_t = 0.56$ eV, ความหนาแน่น $N_t = 10^{10}$ cm $^{-3}$ และสารเจือปนมีระดับพลังงาน $E_t = 0.84$ eV, ความหนาแน่น $N_t = 10^{10}$ cm $^{-3}$ ได้ผลจากแบบจำลองดังรูปที่ 6.51 และ 6.52 ตามลำดับ



รูปที่ 6.51 แสดงค่าอัตราการรวมตัวรวมของพาหะจากทฤษฎี มี $E_t=0.56$ eV

แสดงอัตราการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลในแบบจำลอง โดยจะมีค่าจากน้อยไปหามากตามระดับสีม่วง, น้ำเงิน, เขียว, เหลือง, ส้ม และแดง ตามลำดับ ทางด้านซ้ายคือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ด้านขวาคือสารกึ่งตัวนำชนิดพี



รูปที่ 6.52 แสดงค่าอัตราการรวมตัวรวมของพาหะจากทฤษฎี $E_t=0.84$ eV

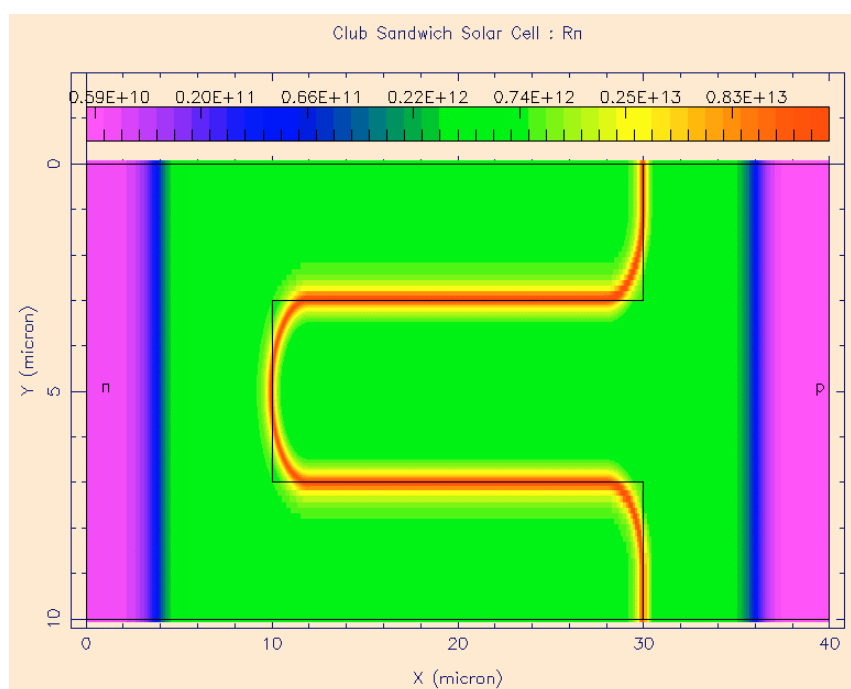
ที่ระดับความหนาแน่นของสารเจือปนเท่า ๆ กัน สารเจือปนที่มีระดับพลังงานใกล้เคียงของแถบพลังงาน จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะน้อยกว่าสารเจือปนที่มีระดับพลังงานบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน

6.2.2.2 อัตราการรวมตัวของพาหะจากข้อมูลที่สืบค้น

จากนิยามของการรวมตัวกันของพาหะ จะมีอิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ดังนั้นการรวมตัวของพาหะในปริมาตรหนึ่ง ณ เวลาใดเวลาหนึ่งจะมีจำนวนของอิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันในปริมาณที่เท่ากัน นั่นคืออัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอน(R_n)และอัตราการรวมตัวของโฮล(R_p) จะเท่ากันตามสมการ

$$R_n = R_p \quad (6.13)$$

เมื่อทำการคำนวณทุก ๆ จุดแล้ว ผลปรากฏดังรูปที่ 6.53

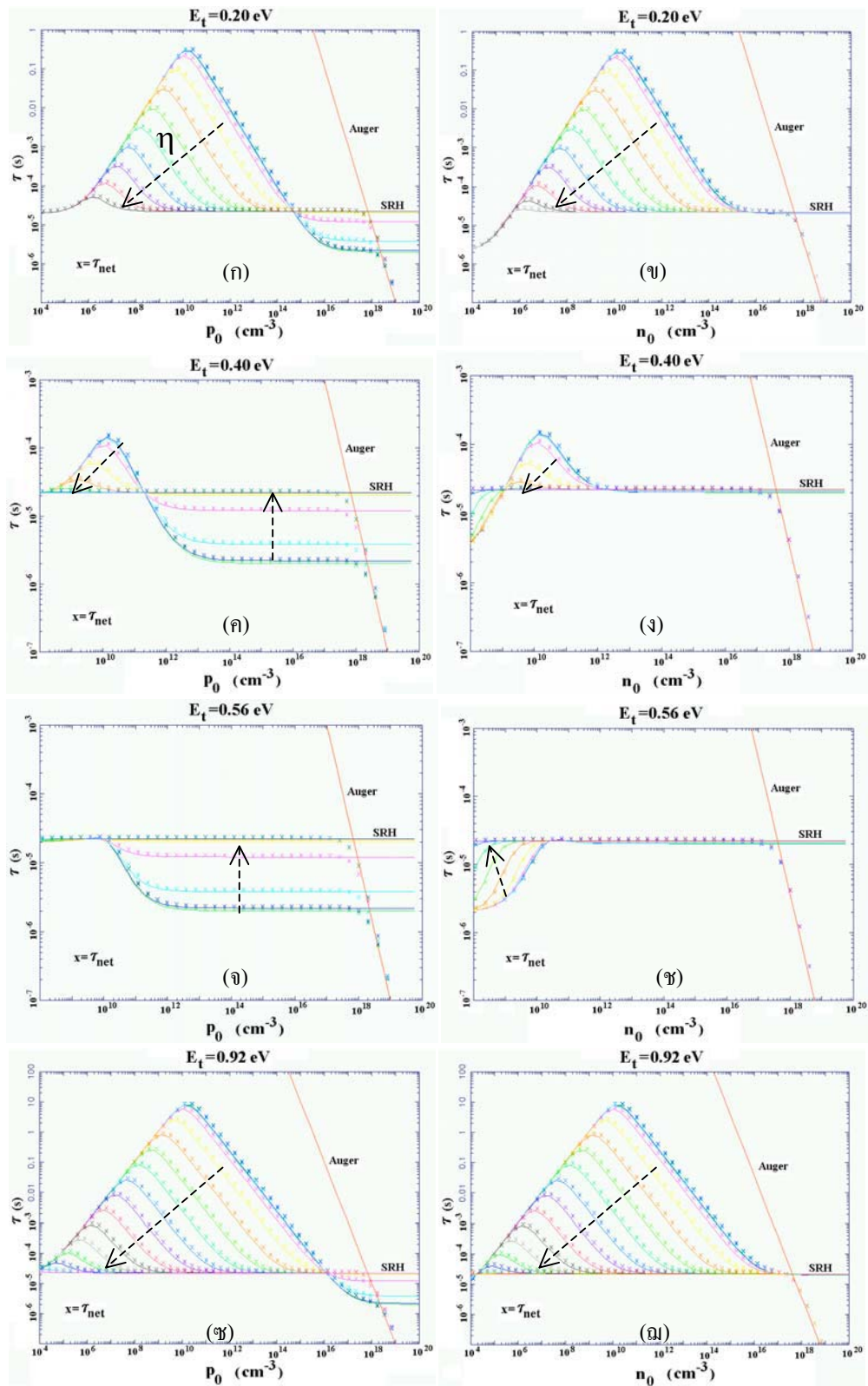


รูปที่ 6.53 แสดงค่าอัตราการรวมตัวรวมของพาหะจากข้อมูลที่สืบค้น

เมื่อใช้สารในคอลัมน์(column)เดียวกันในตารางธาตุมาโด๊ปในซิลิกอน เช่น ในชนิดพี เมื่อโด๊ปด้วยแกลเลียม(Ga) $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จะมีค่า $\tau_n = 25 \text{ } \mu\text{sec}$ เมื่อโด๊ปด้วยอลูมิเนียม(Al) $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จะมีค่า $\tau_n = 8.5 \text{ } \mu\text{sec}$ [20]

เมื่อโด๊ปด้วย Ga จะทำให้ค่าอัตราการรวมตัวของพาหะน้อยลง(τ มากขึ้น)

6.2.3 สารเจือปน (Impurities)



รูปที่ 6.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อยและความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

ระดับพลังงานสารเจือปนจะมีผลต่อเวลาอายุของพาหะข้างน้อยแล้ว ดังรูปที่ 6.54 ด้านซ้ายจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี รูป (ก) มี $E_T=0.2$ eV, (ค) มี $E_T=0.4$ eV, (จ) มี $E_T=0.56$ eV, และ (ช) มี $E_T=0.92$ eV ด้านขวาจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รูป (ข) มี $E_T=0.2$ eV, (ง) มี $E_T=0.4$ eV, (ฉ) มี $E_T=0.56$ eV, และ (ซ) มี $E_T=0.92$ eV ลูกศรเส้นประจะแสดงทิศทางการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาอายุของพาหะข้างน้อยเมื่อค่า η เพิ่มขึ้นจาก 0.001 ถึง 100.0 จะเห็นได้ว่าเวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะเริ่มคงที่เมื่อมีการฉีดพาหะมาก ๆ ($\eta > 100.0$)

แสดงว่าระดับพลังงานของสารเจือปนจะมีผลต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปต่ำ ๆ เท่านั้น เมื่อมีการฉีดพาหะมากขึ้น (η มากขึ้น) ก็จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาอายุของพาหะจนมีค่าคงที่

ส่วนความหนาแน่นของสารเจือปนที่มากขึ้นจะทำให้เวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH มีค่าลดลง นั่นคือพาหะจะถูกรวมตัวมากขึ้นนั่นเอง เมื่อการฉีดพาหะต่ำ ๆ ($\eta < 0.001$) เวลาอายุของพาหะจะมีค่าไม่ต่ำกว่า $\tau_{(H)}$ และการฉีดพาหะสูง ๆ ($\eta > 100.0$) เวลาอายุของพาหะจะมีค่าไม่เกิน $\tau_{(h)}$

บทที่ 7

สรุปผลการจำลองแบบและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการจำลองแบบ ออกเป็น 3 ส่วนคือ

7.1 การจำลองแบบของอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง

7.2 การจำลองแบบของอัตราการรวมตัวของพาหะ

7.3 ข้อเสนอแนะ

7.1 การจำลองแบบของอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง

อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Generation rate)ที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำมาจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คือ โฟตอนฟลักซ์(Photon flux), สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Light absorption coefficient), อัตราการสะท้อนกลับ(Reflectivity) และความลึก(depth)จากผิวบนลงไปเนื้อสาร โดยข้อมูลเหล่านี้สามารถเตรียมไว้ในชุดสมการโพลีโนเมียลที่ได้จากวิธี Spline Interpolation ทำให้สามารถนำใช้คำนวณได้ทุก ๆ ความยาวคลื่นแสง

7.1.1 โฟตอนฟลักซ์ที่มากตกกระทบแล้วมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น จะประกอบไปด้วยโฟตอนฟลักซ์ที่ AM0 ซึ่งอยู่บริเวณนอกบรรยากาศของโลก จะมีพลังงานในการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ 1353 W/m^2 , และโฟตอนฟลักซ์ที่เข้ามาในบรรยากาศของโลกแล้วเช่น AM1, AM1.5 และ AM2 จะมีพลังงานในการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ $925, 844$ และ 691 W/m^2 ตามลำดับ

7.1.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ สำหรับซิลิกอนซึ่งมีช่องว่างพลังงาน 1.12 eV จะดูดกลืนแสงในช่วงที่สเปกตรัมมีความยาวคลื่นแสงน้อยกว่า $1.109 \mu\text{m}$ แล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นมา แต่เนื่องจากซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง อิเล็กตรอนจะกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบคอนดักชันได้ จะต้องมีการรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมกับผลึกที่กำลังสั่นอยู่ เพื่อเป็นการรักษาโมเมนตัมของระบบให้คงที่ การรับหรือคายพลังงานกับโครงผลึกนั้นจะอยู่ในรูปของโฟนอน สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีค่ามากที่ความยาวคลื่นแสงสั้นและจะมีค่าน้อยที่ความยาวคลื่นแสงยาว

7.1.3 อัตราการสะท้อนกลับ สามารถลดอัตราการสะท้อนกลับได้โดยการเคลือบผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำด้วยสารป้องกันการสะท้อนกลับ(anti-reflection coating) การเคลือบหลาย ๆ ชั้นซ้อนทับกัน(multi-reflection coating)จะช่วยลดการสะท้อนแสงในช่วงสเปกตรัมที่กว้าง ๆ ได้ดีกว่าการเคลือบเพียงชั้นเดียว(single reflection coating) หรือการกัดผิวหน้า(textured)สารกึ่งตัวนำให้ขรุขระเป็นรูปปิรามิด(pyramid)เพื่อให้แสงที่สะท้อนจากผิวปิรามิดอันหนึ่งเดินทางไปยังอีกผิวปิรามิดหนึ่งที่อยู่ข้าง ๆ และเกิดการหักเหเข้าไปในเนื้อสารได้ สำหรับในแบบจำลองนี้สมมติให้แสงที่มากตกกระทบถูกดูดกลืนทั้งหมด ดังนั้นจะมีอัตราการสะท้อนกลับเป็นศูนย์

7.1.4 อัตราการเกิดของพาหะจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ โดยมีค่าเท่ากับ 1.04912×10^{22} , 4.17650×10^{21} , 2.56377×10^{21} และ $2.27795 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 ตามลำดับ

7.1.5 อัตราการเกิดของพาหะจะลดลงแบบฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล(Exponential Function)ตามระยะทางจากผิวของสารกึ่งตัวนำ โดยอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงของสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นสั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงของสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นยาว ที่ความลึกไม่เกิน

100 μm อัตราการเกิดของพาหะลดลงเหลือ 1.76688×10^{18} , 1.18109×10^{18} , 1.12686×10^{18} และ $1.04482 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 ตามลำดับ และที่ความลึกมากกว่า 100 μm อัตราการเกิดของพาหะจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางตามความลึก ดังนั้นในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จะออกแบบให้ใช้ซิลิกอนมีความลึกไม่เกิน 100 μm และเป็นการลดต้นทุนการผลิตด้วย

7.1.6 อัตราการเกิดของพาหะรวมซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา เมื่อความลึกจากผิว 0.01 μm ที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 อัตราการเกิดของพาหะรวมมีค่า 1.161×10^{16} , 4.665×10^{15} , 3.599×10^{15} และ $3.229 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.05% ที่ความลึก 20 μm โดยมีค่า 2.59111×10^{17} , 1.87270×10^{17} , 1.80312×10^{17} และ $1.60127 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 ตามลำดับ

7.1.7 อัตราการเกิดของพาหะอิเล็กตรอน(G_n)จะมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดของพาหะโฮล(G_p) เนื่องจากการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นจะให้อิเล็กตรอน 1 ตัวและโฮล 1 ตัว อัตราการเกิดของพาหะที่ได้จากแบบจำลองนี้จะเป็นข้อมูลสำหรับ “แบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบคลับแซนวิช” (Club Sandwich Solar Cell) ต่อไป

7.2 การจำลองแบบของอัตราการรวมตัวของพาหะ

อัตราการรวมตัวของพาหะ(Recombination rate) จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ ความหนาแน่นของพาหะ(carrier density) และเวลาอายุของพาหะ(carrier lifetime) ซึ่งข้อมูลนี้ได้จากการสืบค้น นำมาเตรียมไว้ในชุดสมการโพลีโนเมียลโดยวิธี Spline Interpolation

7.2.1 ความหนาแน่นของพาหะตามสมการ(3.71) จะมีอยู่ 2 เทอมคือ เทอมที่หนึ่งซึ่งเป็นผลต่างของผลคูณของความหนาแน่นของพาหะทั้งสองชนิดขณะที่มีแสงและไม่มีแสงมาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ และเทอมที่สองจะเป็นผลรวมของความหนาแน่นของพาหะทั้งสองชนิด

7.2.2 เวลาอายุของพาหะ จะแปรผกผันกับอัตราการรวมตัวของพาหะ ถ้าพาหะมีเวลาอายุสั้นอัตราการรวมตัวของพาหะก็จะมีค่ามาก และกระบวนการรวมตัวของพาหะที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนที่สำคัญคือ กระบวนการแบบ SRH (Shockley-Read-Hall recombination) และกระบวนการแบบออเจอร์(Auger recombination) กระบวนการทั้งสองชนิดนี้จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน โดยที่กระบวนการ SRH จะเกิดขึ้นมากเมื่อมีการโด๊ปน้อยและมีการฉีดพาหะน้อย กระบวนการออเจอร์จะเกิดขึ้นมากเมื่อมีการโด๊ปมากและมีการฉีดพาหะมาก ดังนั้นการสร้างแบบจำลองโดยอาศัยทฤษฎีของกระบวนการเหล่านี้มาศึกษาพฤติกรรมการรวมตัวของพาหะเพื่อที่จะคำนวณค่าอัตราการรวมตัวของพาหะได้

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อเวลาอายุของพาหะดังนี้คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี(Fermi level), ระดับพลังงานของสารเจือปน(impurity energy level), ความหนาแน่นของสารเจือปน(impurity density), ความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน(excess carrier density) และความหนาแน่นของการโด๊ป(doping density)

7.2.2.1 ระดับพลังงานเฟอร์มี เมื่อมีการฉีดพาหะต่ำๆ(η) เวลาอายุของพาหะในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีจะไม่เท่ากัน จะมีค่ามากที่สุดเมื่อระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อมีการฉีดพาหะสูงๆ เวลาอายุของพาหะในสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะเท่ากันเมื่อระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่ระหว่างบริเวณ 0.3–1.0 eV

7.2.2.2 ระดับพลังงานของสารเจือปน สำหรับกระบวนการ SRH เมื่อมีการฉีดพาหะสูงขึ้น เวลาอายุของพาหะจะมีค่าคงที่และเท่ากันเมื่อระดับพลังงานของสารเจือปนอยู่ระหว่างบริเวณ 0.0–1.12 eV แต่สำหรับกระบวนการออเจอร์ เมื่อมีการฉีดพาหะสูงขึ้น เวลาอายุของพาหะจะมีค่าน้อยลงไปเรื่อย ๆ

7.2.2.3 ความหนาแน่นของสารเจือปน จะมีผลต่อเวลาอายุของพาหะเฉพาะกระบวนการ SRH เท่านั้น เมื่อความหนาแน่นของสารเจือปนมีค่ามากขึ้นเวลาอายุของพาหะก็จะน้อยลงไปเรื่อย ๆ

7.2.2.4 ความหนาแน่นของการโด๊ป ในกระบวนการ SRH เมื่อมีการฉีดพาหะต่ำ ๆ เวลาอายุของพาหะมีค่าจำกัดที่ค่าต่ำสุดค่าหนึ่ง และเมื่อมีการฉีดพาหะสูงขึ้น เวลาอายุของพาหะมีค่าจำกัดที่ค่าสูงสุดค่าหนึ่ง โดยที่ค่าจำกัดที่ค่าสูงสุดจะมากกว่าค่าจำกัดที่ค่าต่ำสุดประมาณ 10 เท่าเสมอ ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นของการโด๊ปหรือความหนาแน่นของสารเจือปนเท่าไรก็ตาม สำหรับกระบวนการแบบออเจอร์ เมื่อความหนาแน่นของการโด๊ปมีค่ามากขึ้น เวลาอายุของพาหะในกระบวนการนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว

ดังนั้นเวลาอายุของพาหะโดยรวมจะมีค่าคงที่เมื่อความหนาแน่นของการโด๊ปมีค่าน้อยเนื่องจากการรวมตัวของพาหะในกระบวนการแบบ SRH เกิดขึ้นมาก และเมื่อความหนาแน่นของการโด๊ปมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ เวลาอายุของพาหะโดยรวมจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการรวมตัวของพาหะในกระบวนการแบบออเจอร์เกิดขึ้นมาก

7.2.3 ระดับพลังงานของสารเจือปนที่อยู่ในซิลิกอนนั้นมีอยู่หลายชนิดเช่นทอง(Au), เหล็ก(Fe) เป็นต้น เป็นการยากที่จะจัดสารเจือปนเหล่านี้ออกไปให้หมด จึงทำให้สารเจือปนมีผลต่อการรวมตัวของพาหะด้วย สารเจือปนที่มีระดับพลังงานอยู่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงานของซิลิกอนจะเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะทำให้เกิดอัตราการรวมตัวของพาหะสูงกว่าสารเจือปนที่มีระดับพลังงานอยู่บริเวณใกล้ขอบของช่องว่างพลังงาน ความหนาแน่นของสารเจือปนที่อยู่ในซิลิกอนที่มีมาก จะทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะมากขึ้นด้วย

7.2.4 อัตราการรวมตัวของพาหะอิเล็กตรอน(R_n)จะมีค่าเท่ากับอัตราการรวมตัวของพาหะโฮล(R_p) เนื่องจากอิเล็กตรอน 1 ตัวจะไปรวมตัวกับโฮล 1 ตัวเท่านั้น

7.2.5 ในแบบจำลองการหาค่าอัตราการรวมตัวของพาหะจากทฤษฎี จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมการรวมตัวของพาหะที่มีพารามิเตอร์ต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องดังที่กล่าวข้างต้นแล้ว และในแบบจำลองการหาค่าอัตราการรวมตัวของพาหะจากข้อมูลที่ได้จากการสืบค้น โดยสร้างสมการโพลีโนเมียลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุของพาหะและความหนาแน่นของการโด๊ปเพื่อนำมาคำนวณหาค่าอัตราการรวมตัวของพาหะที่ตำแหน่งต่าง ๆ คือ $R(x,y)$ เก็บไว้สำหรับแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ“คลับแซนวิช” ต่อไป

7.3 ข้อเสนอแนะ

เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดของพาหะให้มากขึ้น จะต้อง

7.3.1) ลดการสะท้อนกลับที่ผิวบน โดยการเคลือบวัสดุป้องกันการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าซึ่งมีหลายชนิดเช่น ซิลิกอนออกไซด์(SiO_2), ไททาเนียมออกไซด์(TiO_2) เป็นต้น หรือทำให้ผิวหน้าขรุขระ(textured surface)มีรูปร่างแบบปิรามิด เพื่อเพิ่มระยะทางเดินของแสงในสารกึ่งตัวนำให้ยาวขึ้น นอกจากนี้การเคลือบหลายชั้นซ้อนทับกัน(multi-layer)จะช่วยลดการสะท้อนแสงในช่วงสเปกตรัมที่กว้าง ๆ ได้ดีกว่าการเคลือบเพียงชั้นเดียว

7.3.2) เพิ่มการสะท้อนกลับที่ผิวล่าง โดยการเคลือบวัสดุที่สะท้อนแสงได้

7.3.3) เพิ่มปริมาณโฟตอนมาตกกระทบให้มากขึ้น โดยใช้กระจกสะท้อนแสงเข้ามาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลถูกผลิตขึ้นมาแล้วกลับมารวมตัวกันทันทีทันใดก็จะไม่เกิดประโยชน์ขึ้นในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องมีการนำพาหะที่เกิดขึ้นนี้ออกไปใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด โดยการเพิ่มเวลาการรวมตัวของพาหะให้นานขึ้นเพื่อที่พาหะข้างน้อยจะได้มีโอกาสข้ามรอยต่อ ไปยังฝั่งตรงกันข้ามได้มากขึ้น

การโดปด้วยพาหะข้างมากที่ระดับสูงๆ (มากกว่า 10^{17} – 10^{18} cm⁻³) ก็จะทำให้เกิดกระบวนการรวมตัวแบบอเจอร์ (Auger recombination) ขึ้น เวลาอายุการรวมตัวของพาหะข้างน้อยจะลดลงอย่างรวดเร็ว นั่นคือจะเกิดอัตราการรวมตัวของพาหะมากขึ้น การลดปัญหานี้คือ ไมโดปสารกึ่งตัวนำให้สูงจนเกินไป

การเกิดระดับพลังงานแตร็ปเนื่องจากสารเจือปนต่าง ๆ ขึ้นในช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ อาจจะมีการรวมตัวของพาหะขึ้นที่ระดับพลังงานนี้โดยเฉพาะที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน จะมีโอกาสเกิดการรวมตัวของพาหะมากที่สุด และปริมาณของสารเจือปนเหล่านี้จะดักจับทั้งอิเล็กตรอนและโฮลไว้ เมื่อสารเจือปนเหล่านี้มีปริมาณมาก เวลาอายุของพาหะข้างน้อยก็จะลดลง เกิดการรวมตัวกันมากขึ้น จำเป็นต้องลดปริมาณของสารเจือปนให้เหลือน้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากที่จะขจัดสารเจือปนเหล่านี้ออกไปให้หมด การเกิดระดับพลังงานแตร็ปจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการสูญเสียพาหะเนื่องจากการรวมตัวเช่นเดียวกัน

เมื่อมีการผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้มาก ๆ จากการปรับปรุงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนให้สูงขึ้นโดยการลดการสะท้อนกลับที่ผิวโดยการเคลือบวัสดุป้องกันการสะท้อนกลับหลาย ๆ ชั้น เพิ่มการสะท้อนกลับที่ผิวล่างโดยการเคลือบวัสดุสะท้อนกลับได้ และเพิ่มปริมาณโฟตอนที่มาตกกระทบโดยใช้กระจกสะท้อนแสงหรือเลนส์นูนทำให้มีแสงเข้ามาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากขึ้น ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น และการเพิ่มเวลาของการรวมตัวกันของพาหะให้นานขึ้นโดยการโดปสารกึ่งตัวนำไม่ใหสูงจนเกินไปและลดปริมาณของสารเจือปนที่ไม่ต้องการลงให้มากที่สุด ก็จะช่วยลดอัตราการรวมตัวกันของพาหะให้น้อยลงได้

ดังนั้น ความสำคัญของแบบจำลองนี้จะช่วยให้ทราบค่าอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงโดยการใส่ข้อมูลต่าง ๆ ของสารที่นำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเตรียมไว้ในรูปของสมการโพลีโนเมียลและได้ข้อมูลเบื้องต้นเก็บเอาไว้สำหรับใส่เข้าไปในแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์, และแบบจำลองการหาค่าอัตราการรวมตัวของพาหะจะเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่จะเตรียมไว้ใช้ในแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกัน เมื่อมีแบบจำลองดังกล่าวแล้ว จะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนที่จะมีการผลิตจริงต่อไป นั่นคือเป็นการลดต้นทุนการผลิตไปในตัวด้วย รวมทั้งสามารถคำนวณประสิทธิภาพของสารตัวใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. Tantraporn W. Proposed Computer Simulation Study of the "Club Sandwich" Solar Cell. *TDO Quarterly* 1995 Apr; 4(2): 43-45.
2. Chopra KL, Das SR. *Thin Film Solar Cells*. New York: Plenum; 1983.
3. Bouazzi AS, Abaab M, Rezig B. A New Model of Very High Efficiency Buried Emitter Silicon Solar Cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1997; 46: 29-41.
4. Marques FC. Sprayed SnO₂ Antireflection Coating on Textured Silicon Surface for Solar Cell Applications. *IEEE Transaction on Electron Devices*. 1998 Jul; 45(7): 1619-1622.
5. Fossum JG. Sprayed SnO₂ Computer-Aided Numerical Analysis of Silicon Solar Cells. *Solid-State Electronics*. 1976; 19: 269-277.
6. Hall RN. Electron-Hole in Germanium. *Physical Review*. 1952; 87(2): 387.
7. Shockley W, Read WT. Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons. *Physical Review*. 1952; 87(5): 835-842.
8. Bemski G. Lifetime of Electron in p-Type Silicon. *Physical Review*. 1955; 100(2): 523-524.
9. Hornbeck JA, Haynes JR. Trapping of Minority Carrier in Silicon. I. P-Type Silicon. *Physical Review*. 1955; 97(2): 311-321.
10. Tyagi MS. Minority Carrier Recombination in Heavily Doped Silicon. *Solid-State Electronics*. 1983; 26(6): 577-597.
11. Dzierwior J, Schmid W. Auger Coefficients for Highly Doped and Highly Excited Silicon. *Applied Physics Letters*. 1977 Sep; 31(5): 346-348.
12. Haug A. Recombination Mechanism in Heavily Doped Silicon. *Solid-State Electronics*. 1982; 25(7): 665-667.
13. Fossum JG, Lee DS. A Physical Model for the Dependence of Carrier Lifetime on Doping Density in Nondegenerate Silicon. *Solid-State Electronics*. 1982; 25(8): 741-747.
14. Haynes JR, Hornbeck JA. Trapping of Minority Carrier in Silicon. II. N-Type Silicon. *Physical Review*. 1955; 100(2): 606-615.
15. Pang SK, Smith AW, Rohatgi A. Effect of Trap Location and Trap-Assisted Auger Recombination on Silicon Solar Cell Performance. *IEEE Transaction on Electron Devices*. 1995 Apr; 42(4): 662-668.
16. Sze SM. *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 1981.
17. Schroder DK. Carrier Lifetimes in Silicon. *IEEE Transaction on Electron Devices*. 1997 Jan; 44(1): 160-170.
18. Fossum JG, Mertens RP, Lee DS, Nus JF. Carrier Recombination and Lifetime in Highly Doped Silicon. *Solid-State Electronics*. 1983; 26(6): 569-576.
19. Zambuto M. *Semiconductor Devices*. New York: McGraw-Hill.

20. Shi Z, Zhang W, Zheng GF, Chin VL, Stephens A, Green MA. The Effects of Solvent and Dopant Impurities on the Performance of LPE Silicon Solar Cells. *IEEE Transaction on Electron Devices*. 1994 Dec: 1339-1342.
21. Mckelvey JP. *Solid State and Semiconductor Physics*. New York: Harper & Row; 1966.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การหาจุดสมการด้วยวิธีแบบ Cubic Spline Interpolation

การหาชุดสมการด้วยวิธีแบบ Cubic Spline Interpolation

การหาชุดสมการเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลที่ได้จากการสืบค้นเป็นคู่อันดับ (x_i, f_i) เมื่อ $i=0, 1, 2, \dots, n$ โดยที่ x คือตัวแปรต้น และ f คือตัวแปรตามซึ่งเป็นฟังก์ชันของ x จะหาชุดสมการด้วยวิธีแบบ Cubic Spline Interpolation ซึ่งเป็นการประมาณค่าฟังก์ชันของ x ที่อยู่ระหว่างข้อมูล x_i และ x_{i+1} ซึ่งทราบค่าฟังก์ชันคือค่า f_i และ f_{i+1} ตามลำดับ และใช้วิธีนี้เนื่องจากเป็นการแก้ปัญหาคณิตที่แต่ละจุด x_i มีความต่อเนื่องเป็นฟังก์ชันเส้นตรง (linear function) จะไม่ทำให้ฟังก์ชันที่ได้จากการแบ่งโหนด (node) เพิ่มขึ้น เกิดการออสซิลเลต (oscillate) มากขึ้น และจะใช้สมการโพลีโนเมียลไม่เกินดีกรี 3 จึงจะไม่เกิดการออสซิลเลตของฟังก์ชันขึ้น

การหาชุดสมการโพลีโนเมียลที่เป็นตัวแทนของข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งอยู่ในรูปของ (x_i, f_i) ชุดสมการนี้สามารถหาค่า f ใดๆ จากค่า x ที่สนใจได้ โดยมีเงื่อนไขว่าช่องว่าง (h) ระหว่างข้อมูล x_i จะต้องห่างเท่าๆ กัน แต่ก็สามารถแก้ไขปัญหานี้ด้วยการแบ่งข้อมูลที่มีช่องว่างเท่าๆ กันออกเป็นชุดๆ แล้วแต่ละชุดข้อมูลจะมีชุดสมการโพลีโนเมียลเป็นตัวแทน จากนั้นจึงนำชุดสมการโพลีโนเมียลมารวมกัน

ชุดสมการที่ได้มาจากวิธี Cubic Spline Interpolation จะเป็นชุดสมการ (ก.1)

$$p_j(x) = a_{j0} + a_{j1}(x - x_j) + a_{j2}(x - x_j)^2 + a_{j3}(x - x_j)^3 \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่ p_j คือชุดสมการโพลีโนเมียลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า x กับค่า f เมื่อ $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$

จะต้องหาค่าคงที่ a_{j0}, a_{j1}, a_{j2} และ a_{j3}

ขั้นตอนมีดังนี้

1. กำหนดให้ $a = x_0$ และ $b = x_n$ โดยมีข้อมูลเรียงจากน้อยไปหามากดังนี้

$$a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$$

เมื่อ $h = x_{j+1} - x_j$ เป็นความกว้างระหว่างข้อมูลที่อยู่ติดกัน

2. จาก $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ กำหนดให้เท่ากับ $g_0, g_1, g_2, \dots, g_n$ ดังนั้น $g(x) = f(x)$
3. กำหนดให้อนุพันธ์อันดับที่ 1 ของค่า g คือ $k_0 = g'(x_0)$ และ $k_n = g'(x_n)$
4. กำหนดค่า epsilon คือค่าที่เป็นผลต่างน้อยที่สุด, และ maxloop คือจำนวนรอบที่มากที่สุดในการวนซ้ำ (iteration)
5. หาค่า $k_1, k_2, k_3, \dots, k_{n-1}$ จากสมการ

$$k_{j-1} + 4k_j + k_{j+1} = (3/h)(f_{j+1} - f_{j-1}) \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ $j = 1, 2, 3, \dots, n-1$

5.1 ประมาณค่า k_j จาก k_{j-1} ที่รู้ค่าโดยประมาณแล้ว(ยังไม่ใช่ค่า k_{j+1} เพราะยังไม่ทราบค่า) จากสมการ(ก.2) โดยเริ่มจาก k_0 ตามสมการข้างล่าง

$$k_j = [(3/h)(f_{j+1} - f_{j-1}) - k_{j-1}]/4 \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ $j = 1, 2, 3, \dots, n-1$

5.2 คำนวณค่า k_j ย้อนกลับจาก k_{j+1} ที่รู้ค่าโดยประมาณจากข้อ 5.1 แล้ว โดยใช้สมการข้างล่างที่ได้มาจากสมการ(ก.2)

$$k_j = [(3/h)(f_{j+1} - f_{j-1}) - k_{j+1} - k_{j-1}]/4 \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ $j = n-1, \dots, 3, 2, 1$

5.3 คำนวณค่า k_j โดยใช้สมการ(ก.2)อีกครั้ง เรียกวิธีนี้ว่า วิธีของเกาส์(Gauss method) ดังนี้

MainLOOP:

LOOP1: $j=1, n-1$

$kold_j = k_j$

$k_j = [(3/h)(f_{j+1} - f_{j-1}) - k_{j+1} - k_{j-1}]/4$

END LOOP1

MaxERROR=0.0

LOOP2: $j=1, n-1$

IF $ABS(k_j - kold_j) > \text{MaxERROR}$ THEN

MaxERROR = $ABS(k_j - kold_j)$

END LOOP2

IF MaxERROR < epsilon THEN EXIT MainLOOP

END MainLOOP

เมื่อกำหนดค่า k_j โดยใช้สมการ(ก.2)ในรูปที่ 1 แล้ว ทำการเช็คค่าผลต่างค่า k_j อันใหม่(k_j)กับค่า k_j อันเดิม($kold_j$) ถ้าผลต่างค่า k_j ทุกตัวน้อยกว่าค่าที่กำหนด(epsilon) ก็จะได้ค่า k_j ที่ต้องการ

6. หาค่าคงที่ a จากสมการ

$$a_{j0}(x) = f_j \quad (\text{ก.5})$$

$$a_{j1}(x) = k_j \quad (\text{ก.6})$$

$$a_{j2}(x) = (3/h^2)(f_{j+1} - f_{j-1}) - (1/h)(k_{j+1} + 2k_j) \quad (\text{ก.7})$$

$$a_{j3}(x) = (2/h^3)(f_j - f_{j+1}) + (1/h^2)(k_{j+1} + k_j) \quad (\text{ก.8})$$

เมื่อ $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$

7. ดังนั้น จะได้ชุดสมการที่เป็นตัวแทนแสดงค่าข้อมูลเป็น

$$p_j(x) = a_{j0} + a_{j1}(x - x_j) + a_{j2}(x - x_j)^2 + a_{j3}(x - x_j)^3 \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อ $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$

ภาคผนวก ข
ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิกอนที่ 300 °K
และปริมาณโฟตอนฟลักซ์ที่ AM ต่าง ๆ

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิกอนที่ 300 °K และปริมาณโฟตอนฟลักซ์
ที่ AM ต่างๆ

λ (μm)	α (cm^{-1})	$F (\times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$			
		AM0	AM1	AM1.5	AM2
0.300	10^6	8.2074	6.76		
0.305	10^6	8.4898	1.559	0.009979	
0.310	10^6	9.9872	3.239		
0.315	9.5×10^5	11.4143	8.633	0.1740	0.0708
0.320	9.1×10^5	12.7223	2.2508		
0.325	8.7×10^5	14.6332	3.8273	1.084	1.016
0.330	8.0×10^5	16.7043	4.9454		
0.335	7.5×10^5	17.8453	5.9763	2.459	2.04
0.340	6.5×10^5	18.2834	6.8583	3.569	3.18
0.345	5.8×10^5	18.5856	7.5809	3.569	3.18
0.350	5.1×10^5	18.8862	8.1214		
0.355	4.5×10^5	19.2821	8.6707	4.590	4.02
0.360	4.2×10^5	19.3309	9.0921		
0.365	3.7×10^5	20.0478	9.7961	5.823	4.96
0.370	3.2×10^5	21.3682	10.7608		
0.375	2.6×10^5	21.8930	11.3576	6.924	6.14
0.380	2.3×10^5	21.6080	11.5528		
0.385	1.9×10^5	21.3269	11.7096	7.359	6.72
0.390	1.6×10^5	21.3914	12.0127		
0.395	1.3×10^5	22.5653	12.9709	8.589	7.84
0.400	1.1×10^5	26.1603	15.3994		
0.405	9.0×10^4	31.0931	18.6447	12.593	10.76
0.410	7.5×10^4	34.7778	21.1689		
0.415	6.0×10^4	36.5526	22.5869	16.264	14.74
0.420	5.2×10^4	36.9537	23.1819		
0.425	4.5×10^4	36.5359	23.2651	17.619	15.70
0.430	4.0×10^4	35.8077	23.1525		
0.435	3.3×10^4	35.9003	23.6690	18.777	16.44
0.440	2.8×10^4	38.1960	25.5659		
0.445	2.3×10^4	41.5136	28.0973	21.817	20.20
0.450	2.0×10^4	44.1875	30.3598		
0.455	1.9×10^4	46.2169	32.1141	25.396	23.80
0.460	1.8×10^4	47.4176	32.8922		

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิกอนที่ 300 °K และปริมาณโฟตอนฟลักซ์
ที่ AM ต่างๆ (ต่อ)

λ (μm)	α (cm^{-1})	$F (\times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$			
		AM0	AM1	AM1.5	AM2
0.465	1.7×10^4	47.9475	33.7504	27.161	25.40
0.470	1.6×10^4	48.0780	34.1035		
0.475	1.52×10^4	48.4260	34.7011	28.347	26.60
0.480	1.45×10^4	49.4305	35.6949		
0.485	1.39×10^4	48.7594	35.7411	28.948	27.80
0.490	1.35×10^4	48.1127	35.2757		
0.495	1.29×10^4	48.4081	35.7651	30.058	28.40
0.500	1.25×10^4	48.7995	36.3283		
0.505	1.17×10^4	48.7846	36.5228	31.451	29.40
0.510	1.10×10^4	48.5047	36.4474		
0.515	1.07×10^4	47.8617	36.0953	31.530	29.36
0.520	1.05×10^4	47.6912	36.0988		
0.525	1.00×10^4	48.4015	36.7707	32.182	30.16
0.530	9.5×10^3	48.9840	37.3467		
0.535	5.92×10^4	48.9932	37.4878	33.983	31.02
0.540	4.90×10^4	48.6560	37.3588		
0.545	8.7×10^3	48.2359	37.1745	35.013	30.99
0.550	8.5×10^3	47.8822	37.0340		
0.555	8.1×10^3	47.8472	37.1132	35.338	31.22
0.560	7.8×10^3	47.8598	37.2073		
0.565	7.5×10^3	48.0769	37.4604	36.040	31.68
0.570	7.0×10^3	48.7468	38.0673		
0.575	6.8×10^3	49.3058	38.6459	36.919	32.86
0.580	6.6×10^3	48.7800	39.1039		
0.585	6.3×10^3	50.2075	39.4483	37.666	33.70
0.590	6.0×10^3	50.3909	39.6983		
0.595	5.85×10^3	50.3729	39.7696	37.870	34.18
0.600	5.7×10^3	50.2873	39.7883		
0.605	5.55×10^3	50.1780	39.8425	38.169	34.46
0.610	5.4×10^3	50.1210	39.9945		
0.615				38.695	34.82
0.620	5.0×10^3	50.0441	40.2285		
0.625				38.992	35.44

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิกอนที่ 300 °K และปริมาณโฟตอนฟลักซ์
ที่ AM ต่างๆ (ต่อ)

λ (μm)	α (cm^{-1})	$F (\times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$			
		AM0	AM1	AM1.5	AM2
0.630	4.6×10^3	49.8366	40.4585		
0.635				39.436	36.04
0.640	4.3×10^3	49.7018	40.7530		
0.645				39.664	36.70
0.650	4.0×10^3	49.5343	41.0089		
0.655				39.677	37.23
0.660	3.8×10^3	49.3473	41.1853		
0.665				40.195	37.65
0.670	3.6×10^3	49.1812	41.3076		
0.675				41.171	37.97
0.680	3.3×10^3	48.9197	41.2466		
0.685				41.210	38.28
0.690	3.1×10^3	48.7146	41.3307		
0.698		48.4300	38.4910	37.755	34.83
0.700	2.9×10^3	48.1990	38.4046	37.731	35.00
0.710	2.7×10^3	48.0811	41.3412	41.324	38.90
0.720	2.5×10^3	47.7745	41.2051	41.199	38.90
0.728		47.9846	38.9118	38.455	35.97
0.730	2.3×10^3	47.3813	38.8672	38.299	36.04
0.740	2.1×10^3	47.1154	40.8869	40.700	38.80
0.750	1.9×10^3	46.4128	40.6716	40.493	38.80
0.762		46.3710	35.5879	34.361	32.04
0.770	1.65×10^3	46.0216	35.3384	34.152	31.90
0.780	1.50×10^3	45.6662	40.1060	40.103	38.54
0.790	1.35×10^3	45.2490	39.8558	39.850	38.50
0.800	1.25×10^3	44.8262	39.6601	39.804	38.4
0.806		44.4900	37.4572	37.402	35.59
0.810	1.15×10^3				
0.820	1.05×10^3				
0.825		43.9320	37.0235	36.846	35.29
0.830	950	43.3512	38.5543	38.716	37.60
0.835		43.1213	38.3854		
0.840	850				

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิกอนที่ 300 °K และปริมาณโฟตอนฟลักซ์
ที่ AM ต่างๆ (ต่อ)

λ (μm)	α (cm^{-1})	$F (\times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$			
		AM0	AM1	AM1.5	AM2
0.846		42.7350	29.3393		
0.850	760				
0.860	700	42.1590	21.0698	27.190	16.22
0.870	650	41.6409	20.8792	37.067	16.20
0.875		41.3001	19.8056	36.896	15.04
0.880	580				
0.887		40.9384	19.8834	36.692	15.26
0.900	480	40.5085	20.1588	36.598	15.58
0.907		40.2873	20.5343	36.477	16.05
0.910	420				
0.915		40.2438	20.9933	36.117	16.57
0.920	370				
0.925		40.1951	17.1465	23.093	12.63
0.930	320	40.1380	11.6975	8.880	7.26
0.940	280	40.0748	12.5795	9.727	8.13
0.950	260	40.0045	14.4886	11.441	9.84
0.955		39.8791	14.7879	11.68	10.14
0.960	230				
0.965		39.5777	16.0603	12.950	11.47
0.970	205				
0.975		39.1487	22.4651	19.783	18.89
0.980	180				
0.985		38.6777	27.6287	25.345	24.90
0.990	150				
1.000	130				
1.018		37.6431	29.2570	27.299	26.94
1.050	43				
1.082		35.3484	29.8371	28.345	27.66
1.094		33.4222	26.8937	25.634	24.58
1.098		33.0067	26.6644	25.837	24.83
1.101	8	32.8302	27.8745	27.355	26.50

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิกอน [3]

F คือ โฟตอนฟลักซ์ [2]

ประวัติผู้เขียน

นายอนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์ เกิดเมื่อวันศุกร์ที่ 1 พฤษภาคม 2513 ที่อำเภอประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นบุตรคนที่ 1 ของนายประดิษฐ์และนางดุชนิ ศรีธีระวิโรจน์ ได้เข้ารับการศึกษาระดับอนุบาล 2 เมื่อปีการศึกษา 2518 และจบการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านประโคนชัย(อำนวยการราษฎร์วิทยาคาร) จังหวัดบุรีรัมย์ เมื่อปีการศึกษา 2525, จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาต้นจากโรงเรียนประโคนชัยพิทยาคม จังหวัดบุรีรัมย์ เมื่อปีการศึกษา 2528, จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลายจากโรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย จังหวัดขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2531, จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2535 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2541