



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การปลูกผลึกอินเดียมฟอสไฟด์และการเจือซิลิกอนบนแผ่นผลึกฐาน
แกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีผิวหน้าในระนาบ (411)A โดยการ
ปลูกผลึกอีพิแทกซ์จากล่ำโมเลกุลที่ใช้วัตถุดิบรูปของแข็ง”

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และคณะ

กันยายน 2548

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การปลูกผลึกอินเดียมฟอสไฟด์และการเจือซิลิกอนบนแผ่นผลึกฐาน
แกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีผิวหน้าในระนาบ (411)A โดยการ
ปลูกผลึกอีพิแทกซ์จากลอมเบกุลที่ใช้วัตถุดิบรูปของแข็ง”

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|------------------------------|-----------------------|
| 1. รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. รศ.ดร.ชุมพล อันตรเสน | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. นายศุภโชค ไทน้อย | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. นายพรชัย ช่างม่วง | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัยจากสภาวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ
แผ่นดินปี พ.ศ. 2543 ส่วนหนึ่งจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ส่วนหนึ่งจากกองทุนวิจัย
รัชดาภิเษกสมโภช ปี พ.ศ. 2544 ในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้จากสนับสนุน ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้วที่ให้การช่วยเหลือและ
คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ คุณสุวิทย์ กิระวิทยา และคุณฤดีสันต์ ส่องเมือง ที่ได้ให้ความ
ช่วยเหลืองานวิจัยนี้สามารถดำเนินงานได้ตามเป้าหมาย

บทคัดย่อ

ได้ทำการวิจัยการปลูกผลึกอีพิแทกซ์ InP บนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs และ (411)A GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอีพิแทกซ์จากลำโมเลกุล โดยใช้แหล่งจ่ายฟอสฟอรัสจากการสลายตัวของ GaP ที่อยู่ในรูปโพลีคริสตัลไลน์ การตรวจสอบการเรียงตัวของผลึก InP ขณะที่ปลูกด้วยเทคนิค RHEED ซึ่งคุณภาพผิวผลึกที่ได้มีลักษณะเรียบมันเงา โดยอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกและค่าอัตราส่วน V/III ที่มีผลต่อคุณสมบัติของชั้นผลึกอีพิแทกซ์ InP ชั้นผลึกอีพิแทกซ์ InP ที่ไม่มีการเจือมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและแสดงค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 4×10^{16} - $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และค่าความคล่องตัวพาหะอยู่ในช่วง 237 - $1,761 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ จากการวัดด้วยวิธี van der PAUW ที่อุณหภูมิห้อง จากผลที่ได้ในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าคุณสมบัติของชั้นผลึกอีพิแทกซ์ InP ที่ปลูกได้ขึ้นกับเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก สำหรับการเจือ Si ในผลึกอีพิแทกซ์ InP ค่าความเข้มข้นพาหะขึ้นกับค่าอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si ซึ่งอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si ในช่วง 860 - 940°C ได้ค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง 1×10^{17} - $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และค่าความคล่องตัวพาหะอยู่ในช่วง $1,020$ - $1,989 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ โดยค่าความเข้มข้นพาหะที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความคล่องตัวพาหะที่ได้มีค่าลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น

Abstract

The growth of InP layers on (100) GaAs and (411)A GaAs substrates by molecular beam epitaxy (MBE) using polycrystalline gallium phosphide (GaP) as a phosphorus source was investigated. The surface reconstruction during the growth was monitored by reflection high energy electron diffraction (RHEED), the high quality InP layers on GaAs substrates with specular surface morphology could be obtained. The effects of growth temperatures and V/III ratios on the properties of InP epi-layers were studied. The undoped layers showed n-type conduction behavior with a background carrier concentration of 4×10^{16} - $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and mobility of 237-1,761 $\text{cm}^2/\text{V-s}$, both at room temperature, as measured by van der Pauw method. Our results showed a strong dependence of growth quality on growth conditions such as growth temperatures and P_2/In flux ratios. The Si-doped InP epilayers and (100) GaAs and (411)A GaAs substrates also showed n-type conduction. The carrier concentration depends on the Si-cell temperature. The temperature of Si-cell in the range of 860-940°C give the concentration in the range of 1×10^{17} - $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and mobility of 1,020-1,989 $\text{cm}^2/\text{V-s}$. The mobility was decreased while the increasing of the carrier concentration.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	II
บทคัดย่อภาษาไทย.....	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน.....	5
2.1 การปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล.....	5
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล.....	5
2.1.2 Effusion Cell.....	8
2.1.2.1 Knudsen Cell.....	8
2.1.2.2 Cracker Cell.....	10
2.1.2.3 Valved Cracker Cell.....	11
2.1.2.4 Gas Injector Cell.....	12
2.1.3 อุปกรณ์วิเคราะห์.....	13
2.1.3.1 Reflection High Energy Diffraction Electron (RHEED).....	14
2.1.3.2 Residual Gas Analyzer.....	16
2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าในระบบ MBE.....	16
2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์วิธี MBE.....	17
2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....	20
2.3.1 โครงสร้างของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....	20
2.3.2 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....	22
2.4 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	23
2.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW.....	24
2.5.1 ปรากฏการณ์การขนส่งฮอลล์ (Hall Effect).....	25
2.5.2 วิธีการวัดของ van der PAUW.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3 การวัด van der PAUW ในทางปฏิบัติ.....	29
2.5.3.1 การกำหนดนิยามการวัดหาค่าสภาพต้านทาน.....	29
2.5.3.2 การวัดหาค่าสภาพต้านทาน.....	29
2.5.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์.....	31
2.5.3.4 การวัดหาค่าแรงดันฮอลล์.....	31
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	34
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น.....	34
3.2 การปลูกผลึก Buffer GaAs.....	34
3.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก.....	35
3.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In	36
3.5 การศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si.....	37
3.6 การวิเคราะห์ผล.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	39
4.1 การตรวจสอบค่าความหนาของชั้นผลึกอีพิแทกซ์ InP ที่ปลูกได้.....	39
4.2 RHEED patterns.....	39
4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก InP.....	41
4.3.1 Surface Morphology.....	42
4.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	43
4.4 อิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In	44
4.4.1 Surface Morphology.....	44
4.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	45
4.5 การเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลงานของนักวิจัยอื่นๆ.....	46
4.6 คุณสมบัติทางแสง.....	47
4.7 อิทธิพลอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si.....	48
บทที่ 5 สรุป.....	50
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ผลงานการเผยแพร่ของงานวิจัยนี้.....	57
การประยุกต์ใช้ผลงานวิจัย.....	68

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ตารางเปรียบเทียบชนิดของ Effusion Cell และชนิดของลำโมเลกุล ที่ได้จากวัสดุชนิดต่างๆ.....	13
ตารางที่ 2.2	รายการส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth Chamber ของระบบ MBE.....	17
ตารางที่ 2.3	อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ.....	18
ตารางที่ 2.4	ตัวแปรกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ธาตุ.....	21
ตารางที่ 2.5	ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ.....	22
ตารางที่ 4.1	การเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้และผลงานของนักวิจัยอื่นๆ.....	47

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P.....	7
รูปที่ 2.2	ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	7
รูปที่ 2.3	แผนภาพโครงสร้าง Knudsen Cell.....	8
รูปที่ 2.4	ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap.....	10
รูปที่ 2.5	แผนภาพโครงสร้างของ Cracker Cell.....	11
รูปที่ 2.6	ภาพของ As Valve Cracker Cell.....	12
รูปที่ 2.7	ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector Cell.....	13
รูปที่ 2.8	แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในขณะทำการปลูกผลึก..	15
รูปที่ 2.9	แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer.....	15
รูปที่ 2.10	ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₂ -(100) GaAs.....	19
รูปที่ 2.11	ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₄ -(100) GaAs.....	20
รูปที่ 2.12	แผนภาพโครงสร้างแบบ Zincblende.....	21
รูปที่ 2.13	แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว.....	23
รูปที่ 2.14	แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	24
รูปที่ 2.15	แผนภาพปรากฏการณ์ฮอลล์.....	25
รูปที่ 2.16	ภาพโครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW....	27
รูปที่ 2.17	แผนภาพการวัดค่าสภาพต้านทานในวิธีการวัดของ van der PAUW.....	28
รูปที่ 2.18	แผนภาพการวัดค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW.....	28
รูปที่ 3.1	ภาพรูปแบบ RHEED แบบ c(2x4) ที่ได้จากแผ่นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิ 580°C.....	35
รูปที่ 3.2	โครงสร้างของตัวอย่างที่สร้างในการทดลอง.....	37
รูปที่ 3.3	แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและ Shutter ในการทดลองนี้....	37
รูปที่ 4.1	ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่างชั้นผลึกอพิเทกซ์ InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs...	40
รูปที่ 4.2	รูปแบบ RHEED ที่เกิดขึ้นในขณะปลูกผลึก InP บนแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ได้ขณะเวลาปลูกผลึก.....	42
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ของตัวอย่างจากการปลูกที่ปลูกที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยค่าอัตราส่วน BEP ของ P ₂ /In มีค่าเท่ากับ 10.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัว และค่าอุณหภูมิในการปลูกผลึก.....	44
รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ของตัวอย่างจากการปลูกที่อุณหภูมิ 450°C โดยมีค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าต่างๆ.....	45
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัว และค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In	46
รูปที่ 4.7	สเปกตรัมของตัวอย่างจากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 450°C โดยอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 20.....	48
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ และส่วนกลับของสามบุรณ์ของอุณหภูมิ แหล่งจ่าย Si และค่า BEP ของ $In = 4 \times 10^{-7}$ torr และ $P_2 = 8 \times 10^{-6}$ torr อุณหภูมิแผ่นผลึก 500°C.....	49
รูปที่ 4.8	รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ และค่าความคล่องตัวพาหะที่ได้ จากผลตามรูปที่ 4.8.....	49

สารบัญสัญลักษณ์

AlAs	: Aluminium Arsenide
AlP	: Aluminium Phosphide
AlSb	: Aluminium Antimonide
AlInAs	: Aluminium Indium Arsenide
AlGaInAs	: Aluminium Gallium Indium Arsenide
d	: Thickness
E_g	: Bandgap Energy
GaAs	: Gallium Arsenide
GaP	: Gallium Phosphide
GaSb	: Gallium Antimonide
GaInAsP	: Gallium Indium Arsenide Phosphide
InAs	: Indium Arsenide
InP	: Indium Phosphide
InSb	: Indium Antimonide
MBE	: Molecular Beam Epitaxy
MOCVD	: Metal-organic Chemical Vapor Deposition
MOVPE	: Metal-organic Vapor Phase Epitaxy
μ	: Carrier Mobility
N_d	: Electron Concentration
RHEED	Reflection High Energy Electron Diffraction
UHV	: Ultra-high vacuum

บทที่ 1

บทนำ

InP เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V (III-V Compound Semiconductor) ที่มีความสำคัญอย่างมากและมีบทบาทต่อการพัฒนาการของระบบสื่อสารทางแสง (Optical Communication) เนื่องจาก InP เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้เป็นผลึกฐานเริ่มต้น (Substrate) ของการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ โดยเฉพาะแหล่งกำเนิดแสงในย่านช่วงความยาวคลื่น 1.3 และ 1.5 μm [1] [2] อันเป็นหัวใจสำคัญของระบบสื่อสารทางแสงความเร็วสูงพิเศษ (Ultra-high Speed) และระยะไกล (Long hual) เนื่องจากสารประกอบกึ่งตัวนำที่เปล่งแสงในย่านดังกล่าวนี้ ได้แก่ สารประกอบของกลุ่ม InGaAsP, AlInGaAs และ InGaAs ซึ่งมีค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) เข้ากับ (Match) ผลึก InP และสารประกอบที่เปล่งแสงในย่านดังกล่าวก็มีค่าความคล่องตัวของพาหะ (Mobility) สูงกว่าของ GaAs [3][4] นอกจากนี้ InP ยังเป็นแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นสำหรับสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้งานในย่านความถี่สูงพิเศษอีกเช่นกัน [5] ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบของ InP จึงได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างมากมายเพื่อรองรับการพัฒนาไปของการสื่อสารทางแสงในยุคปัจจุบัน ดังตัวอย่างเช่น ไดโอดเลเซอร์โครงสร้าง DR [6] สำหรับระบบสื่อสารในย่าน 1.5 μm เป็นต้น แต่เนื่องจากแผ่นผลึกฐาน InP นั้นมีตลาดเฉพาะในด้านสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงสำหรับระบบสื่อสารเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีขนาดของการบริโภคหรือตลาดที่มีขนาดเล็กมากจึงทำให้มีราคาแพง ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ที่ผลิตจากแผ่นผลึกฐานของ InP จึงราคาแพงตามไปด้วย ซึ่งแตกต่างไปจากกรณีของ GaAs ที่มีตลาดกว้างกว่าจึงทำให้สิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนผลึกฐาน InP มีราคาแพงกว่าสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนผลึกฐานของ GaAs ถึงแม้ว่าต้นทุนในการผลิตไม่แตกต่างกันมากนัก โดยตลาดของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ครอบคลุมตลาดของไดโอดเลเซอร์ในเครื่องเล่น CD เครื่องเล่น LD เครื่องเล่น DVD ระบบสื่อสารทางแสงระยะสั้นและสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ในอุปกรณ์สื่อสารย่านความถี่สูงซึ่งมีมูลค่าของตลาดสูงมากหรือในอีกความหมายหนึ่งก็คือปริมาณการบริโภคผลึก GaAs ที่มีมากกว่า InP ทำให้ราคาผลึก GaAs จึงมีราคาถูกกว่า แนวความคิดของการวิจัยของการเตรียมผลึก InP บนผลึกฐานของ GaAs จึงเกิดขึ้นในปี 1976 โดยกลุ่มของ Prof. M. Kimata แห่งมหาวิทยาลัยวาเซดา (Waseda University) ประเทศญี่ปุ่น [7] ซึ่งประสบความสำเร็จในการปลูกผลึก InP บนผลึกฐานของ GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) แต่การวิจัยดังกล่าวนี้อาจได้มีการพัฒนาต่อไป เนื่องจากระบบ MBE ในยุคนั้นมีปัญหาเนื่องจากลำโมเลกุลของ P (Phosphorous) ที่ได้จากการเผา P นั้นมีความดันของไอ (Vapor Pressure) สูงมากจึงไม่สามารถควบคุมได้ง่ายและ P ส่วนที่เหลืออยู่ภายในระบบจะกลายสภาพเป็นสารหรือวัสดุที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในการติดไฟได้ง่ายเมื่อถูกอากาศ [8] รวมถึงวิธีการเผาสารประกอบ InP ให้สลายตัวเพื่อให้ได้ลำโมเลกุลของ P [9] ก็ไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากสารประกอบ InP ที่เป็นวัสดุดิบที่ใช้มีราคาแพงมาก จนกระทั่งเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากสถานะไอของสาร

ประกอบอินทรีย์โลหะได้ถูกพัฒนาขึ้น (Metal-organic Vapor phase Epitaxy: MOVPE) แนวความคิดของการวิจัยการปลูกผลึก InP บนผลึกฐานของ GaAs และการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากสารประกอบที่มีค่าคงตัวผลึกเข้ากับ InP โดยวิธี MOVPE ก็ได้กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง [10][11] แต่เนื่องจากระบบ MOVPE เป็นระบบที่ใช้ก๊าซต่างๆ ที่เป็นอันตราย จึงทำให้การวิจัยในเรื่องดังกล่าวจะอยู่ในเฉพาะกลุ่มของบริษัทๆ ซึ่งมีสถานที่ตั้งของระบบเครื่องมืออยู่ในที่ห่างไกลจากชุมชน เพื่อความปลอดภัยและหลีกเลี่ยงความสูญเสียในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุขึ้น

อย่างไรก็ดีเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลก็ได้มีการพัฒนาวิธีการสำหรับการปลูก InP แต่ก็ยังใช้ก๊าซ PH_3 เป็นวัตถุดิบ [12][13] ซึ่งก๊าซดังกล่าวก็มีอันตรายไม่น้อยกว่าก๊าซในระบบ MOVPE เช่นกัน ต่อมาได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่เรียกว่า Cracker Value [14] สำหรับการกำเนิดไอของ P_2 ในระบบ MBE โดยการเผาฟอสฟอรัสให้กลายเป็นไอของ P_4 และให้ไอดังกล่าวนี้นี้ผ่านหลอดที่มีความร้อนสูงและแตกตัวกลายเป็นไอ P_2 แต่เนื่องจากชุดอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีราคาแพง การบำรุงรักษาสามารถทำได้ยากเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนอย่างมาก เมื่อไม่นานมานี้เทคนิคของการเผาสารประกอบ GaP ใน K-Cell ให้สลายตัวออกเป็น Ga และ P_2 และทำการการกักไอของ Ga ไว้ภายในและปล่อยไอของ P ออกมา โดยใช้ Cap [15] ที่มีลักษณะพิเศษเป็นอุปกรณ์ให้เกิดเงื่อนไขดังกล่าวนี้ ในประมาณต้นปี พ.ศ. 2540 ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ความช่วยเหลือทางจาก Dr. K. Eberl แห่งสถาบัน Max Plank, Studdgart ประเทศเยอรมัน ซึ่งเป็นผู้ประดิษฐ์และพัฒนาอุปกรณ์ Ga-trapping cap ในการติดตั้งชุดอุปกรณ์ดังกล่าวเข้าในระบบ MBE ที่มีอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อเป็นการเริ่มต้นการศึกษาเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์ของสารประกอบกึ่งตัวนำของ InP, GaP และ InGaP และทางคณะผู้วิจัยก็ได้ประสบความสำเร็จในการปลูกผลึกของ GaP บนผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ด้วย MBE แต่สารประกอบ GaP นี้มีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารทางแสงน้อยกว่าสารประกอบ InP

ตามปกติแล้วแผ่นผลึกฐานที่ใช้ในการผลิตสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ใช้นิยมใช้ผลึกฐานที่มีผิวหน้าอยู่ในระนาบ (100) เนื่องจากข้อดีของผลึกฐานที่มีผิวหน้าในระนาบ (100) มีข้อดีหลายประการคือ เทคโนโลยีของการกัดขึ้นรูปของผลึกฐานที่มีผิวหน้าในระนาบ (100) สามารถควบคุมรูปร่างได้อย่างง่ายกว่าระนาบอื่นๆ และการตัดชิ้นตัวอย่างของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนผลึกฐานที่มีผิวหน้าระนาบ (100) สามารถทำได้ง่ายกว่าผลึกฐานที่มีผิวระนาบอื่นๆ แต่อย่างไรก็ดีสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนผลึกฐานเริ่มต้นที่มีผิวหน้าในระนาบ (n11) นั้นก็มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่ดีกว่าสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนผลึกฐานที่มีผิวหน้าในระนาบ (100) [16][17] นอกจากนี้คุณสมบัติพิเศษในการกำหนดตำแหน่งอะตอมของสารเจือปนที่มีคุณสมบัติเป็นแบบคู่ (Amphoteric) [18][19][20] ให้มีคุณสมบัติของอะตอมสารเจือ

ปนเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน (Donor) หรืออะตอมสารเจือปนเป็นผู้รับอิเล็กตรอน (Acceptor) ก็ได้ โดยการกำหนดตำแหน่งการแทรกตัว (Site addressing) ของอะตอมสารเจือปนในโครงร่างผลึกได้ง่ายกว่าผลึกที่มีผิวหน้าในระนาบ (100) ซึ่งสามารถกำหนดได้จากเงื่อนไขในการปลูก อันได้แก่ตัวแปรต่อไปนี้อุณหภูมิในการปลูก ค่าอัตราส่วนของโมเลกุล V/III ค่าอัตราส่วนของโมเลกุลของ V ที่เป็น Dimer/ Tetramer และระนาบผิวของผลึกฐาน ซิลิกอน (Silicon) เป็นธาตุหมู่ที่ 4 ในตารางธาตุ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารเจือปนที่มีคุณสมบัติเป็นคู่ที่มีความเป็นไปได้ในการสร้างหัวต่อพี-เอ็นด้วยการใช้สารเจือปน Si เพียงอย่างเดียว สำหรับกรณีของ GaAs ที่มี ระนาบผิว (111) (211) (311) (411) (511) ได้มีการศึกษาคุณสมบัติของ Si อย่างกว้าง[30][31][32][33][34] แต่ในกรณีของ InP ยังมีการศึกษาอยู่ในวงจำกัดหรือน้อยมาก สำหรับแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ได้ถูกเสนอใน ปี ค.ศ. 1996 [21] ซึ่งเป็นผลที่ได้จากรวบรวมและวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง แบบจำลองที่ได้เสนอขึ้นมานี้สามารถอธิบายผลดังกล่าวและได้เป็นแบบจำลองที่สามารถเกิดขึ้นได้ในสารประกอบกลุ่ม III-V อื่นๆ เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ไรก็ดีการทดลองสำหรับสารประกอบ III-V ส่วนใหญ่ที่ผ่านมาเป็นการศึกษาในสารประกอบ GaAs และ AlGaAs เป็นส่วนใหญ่ สำหรับกรณีของสารประกอบ InP และสารประกอบที่เกี่ยวข้องนั้นยังการศึกษาน้อยมากและการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการศึกษาในกรณีที่ไม่ได้เป็นระนาบผิวเรียบ (Flat Surface)[22]

ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นต้นกำเนิดของแนวความคิดของการศึกษาเทคนิคการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์ของ InP บนผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ด้วยวิธี MBE โดยใช้ GaP ที่อยู่ในรูปโพสิทริสโตลีน คุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของชั้นผลึก InP ที่ปลูกบนผลึกฐานเริ่มต้น (411)A GaAs และผลของการเจือปน Si ต่อคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของชั้นผลึก InP ที่ปลูกบนผลึกฐานเริ่มต้น (411)A GaAs ผลที่ได้จากการวิจัยจะเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของหัวต่อเฮเทอโร (Heterojunction) จาก InP และ GaAs รวมถึงกลไกทางกายภาพต่างๆ ได้แก่ กลไกการเปล่งแสง กลไกการนำไฟฟ้า ฯลฯ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะเป็นข้อมูลสำคัญต่อการพัฒนาสร้างสิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่

สำหรับโครงการวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุลในการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์ InP บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs และ (411)A GaAs และ การปลูกผลึกอิมพิแทกซ์ InP บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs และ (411)A GaAs ที่มีการเจือซิลิกอน โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึกและค่าอัตราส่วน Beam Equivalent pressure (BEP) ของ P_2/In ที่มีต่อคุณสมบัติของผลึก InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs และ (411)A GaAs พร้อมทั้งการเปรียบเทียบคุณภาพของผลึกที่ได้กับผลึกชนิดเดียวกันที่ได้จากวิธีการปลูกผลึกวิธีการอื่นๆ โดยเนื้อหาสาระของรายงานฉบับนี้มีดังนี้ ในบทที่ 2 เป็นการกล่าวถึง ความรู้พื้นฐานของการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล โดยเป็นรายละเอียดของโครงสร้างของชุดระบบการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล กลไกการปลูก

ผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล โครงสร้างและคุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V วิธีการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์และการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี Van der PauW ในบทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึก ค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In ที่มีต่อคุณสมบัติของผลึก InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs และ (411)A GaAs และค่าอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si มีต่อคุณสมบัติของผลึก InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs และ (411)A GaAs ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้ ในบทที่ 5 เป็นการสรุปของโครงงานนี้ และในบทที่ 6 ข้อเสนอแนะจากผลงานวิจัยนี้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

สำหรับในบทนี้เป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยสังเขป ซึ่งมีเนื้อหาสาระเกี่ยวกับเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ความรู้พื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) และการวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าวิธี Van der Pauw

2.1 การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE)

การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลหรือ MBE เป็นเทคนิคการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำบนผิวของแผ่นผลึกฐาน (Substrate) ที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) โดยการพ่นลำโมเลกุลของก๊าซหรืออะตอมของธาตุที่เป็นวัตถุดิบลงบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบสารกึ่งตัวนำ โมเลกุลเหล่านั้นได้จากการระเหยหรือระเหิด (Evaporation) วัสดุที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบ (Constituent species) ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (Ultra-high Vacuum) ปฏิกิริยาของการเกิดเป็นสารประกอบนี้เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ค่าอัตราส่วนของสารประกอบและคุณสมบัติกายภาพของชั้นผลึกอพิแทกซ์ที่ปลูกได้นั้นขึ้นกับเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ อัตราส่วนค่าความดันไอของลำโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูก ฯลฯ เป็นต้น นอกจากนี้อัตราการปลูกนี้ขึ้นค่าความดันไอขององค์ประกอบที่มีคุณสมบัติการเกาะติด (impinging) ผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน สำหรับข้อดีของการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ได้แก่ การเตรียมผิวแผ่นผลึกฐานสามารถทำได้ง่าย โดยวิธีการทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความสามารถในการตรวจสอบ (Monitoring) โครงสร้างผิว (Surface structure) ที่สามารถกระทำได้ตลอดเวลาตั้งแต่ก่อนเริ่มต้นการปลูกผลึกจนถึงสิ้นสุดกระบวนการปลูกผลึก นอกจากนี้การปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ที่ดำเนินการในระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษ ทำให้ผลึกที่ปลูกได้นั้นมีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากก๊าซต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลึก ได้แก่ H_2O , O_2 , CO และ CO_2 เป็นต้น มีปริมาณที่ต่ำมาก ในสภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ จึงให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของผลึกได้ตามที่เราต้องการ

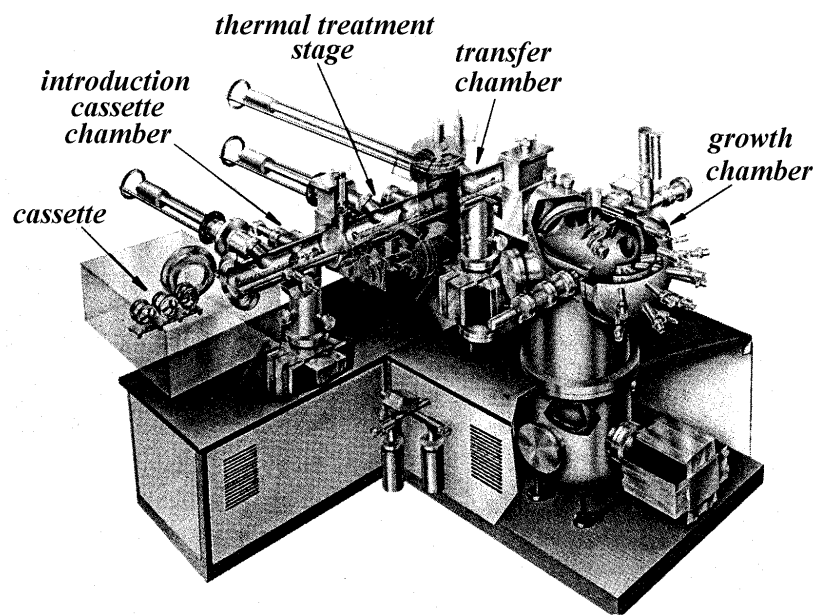
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล

ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชุดระบบ MBE ของบริษัท RIBER รุ่น 32 P ซึ่งมีลักษณะเป็นโมดูล (Module) โดยประกอบด้วยส่วน Introduction Chamber ส่วน

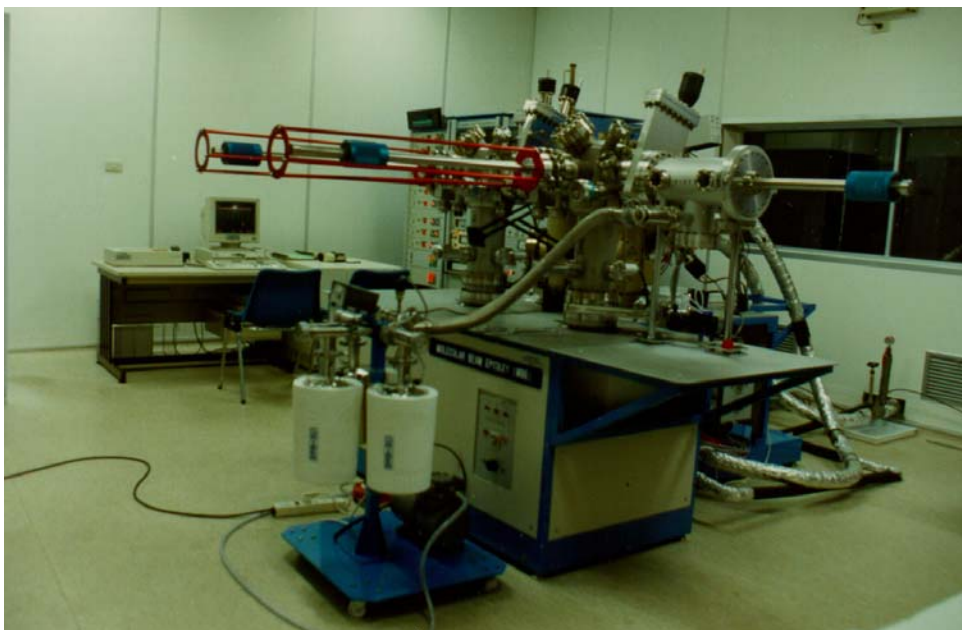
Thermal Treatment Stage ส่วน Transfer Buffer Chamber และส่วน Growth Chamber ดังแผนภาพตามรูปที่ 2.1 โมดูลแต่ละส่วนที่ต่อกันนี้มี Gate Valve ต่อชั้นกลางระหว่างโมดูล โดยจะเปิด Gate Valve ให้ Cassette ที่เป็น Carrier ในการบรรจุ Substrate holder ผ่านเข้าออกจากโมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่ง และเพื่อปิดแยกให้โมดูลแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกันและให้การรักษาภาวะสุญญากาศในแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกัน ส่วน introduction chamber เป็นส่วนติดต่อระหว่างภายนอกที่มีสภาวะความดันบรรยากาศปกติ (760 torr) และส่วน Thermal treatment stage ซึ่งมีสภาวะสุญญากาศในระดับ 10^{-10} torr โดยส่วน Introduction chamber นี้มีปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) จำนวน 2 ชุดคือ Rotary Pump และ Sorption Pump ทำหน้าที่ปั๊มเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศระดับปานกลาง (10^{-4} torr) Cassette จากภายนอกสามารถลำเลียงผ่านโมดูลส่วนนี้ เพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบ MBE ต่อไป ในทำนองกลับกันการลำเลียง Cassette ออกจากระบบ MBE ก็ดำเนินการผ่านส่วน Introduction chamber เช่นเดียวกัน และทำการปรับสภาวะจากสุญญากาศสู่สภาวะบรรยากาศปกติด้วยการเติมก๊าซไนโตรเจนสะอาด ส่วน Thermal treatment stage เป็นส่วนที่ใช้ในการทำ Outgassing แผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกผลึก เพื่อไล่ความชื้นและขจัดออกไซด์ (บางส่วน) ที่ผิวของแผ่นผลึกฐาน ในส่วนนี้มีปั๊มสุญญากาศจำนวน 2 ชุดคือ Ion Pump และ Ti sublimation Pump ส่วน Transfer buffer chamber เป็นส่วนที่ใช้ในการลำเลียง Substrate Holder เข้าหรือออกจากส่วน Growth Chamber และส่วน Growth Chamber เป็นส่วนที่กระบวนการปลูกผลึกอิพิแทกซ์ดำเนินการในโมดูลส่วนนี้ โดยแผนภาพของส่วน Growth Chamber ดังรูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ มีดังนี้ ส่วน Cyopanel เป็นช่องเปิดสำหรับรับไนโตรเจนเหลวจากภายนอก เพื่อทำหน้าที่หล่อเย็นระบายความร้อนที่เกิดจาก Effusion Cell ให้แก่ Growth chamber นอกจากนี้ไนโตรเจนเหลวยังช่วยทำให้สภาวะสุญญากาศในส่วน Growth Chamber ดีขึ้น เนื่องจากความเย็นของไนโตรเจนเหลวทำให้มวลของบรรยากาศภายในมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ระบบปั๊มสุญญากาศสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในระบบของคณะผู้วิจัยได้แก่ Ga, Al, In, As, P (ได้จากการสลายตัวของ GaP ใน Knudsen cell ที่มี Ga-trapping Cap) และ Si (สารเจือปนชนิดเอ็น : n-type Dopant)

นอกจากนี้ในส่วน Growth Chamber ยังมีอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ชุด Reflection High Energy Electron Diffraction หรือ RHEED, Gas Analyzer หรือ Quadupole Mass Spectrometry และ Ionization Gauge เป็นอุปกรณ์หลักพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อระบบ MBE โดย RHEED นี้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างผิว นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกได้จากปรากฏการณ์ RHEED Intensity oscillation ที่เกิดขึ้นในเทคนิค Phase-locked epitaxy หรือ PLE [23] และ Migration Enhanced epitaxy หรือ MEE [24] ที่สามารถควบคุมค่าความหนาได้ในระดับ Monolayer ของผลึกที่ปลูก ส่วน Gas Analyzer เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสภาวะบรรยากาศภายใน Growth Chamber และ Ionization Gauge เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเทียบค่าความดันไอของลำโมเลกุลต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึกแต่ละครั้ง เพื่อปรับแต่งเงื่อนไขค่าความดันไอขององค์ประกอบต่างๆ ในการปลูกผลึกแต่

ละครั้งให้ได้เงื่อนไขตามที่ต้องการ ในปัจจุบันระบบ MBE ได้มีการพัฒนาให้สามารถใส่อุปกรณ์อื่นๆ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์เข้าไปในระบบ MBE ได้แก่ Ellipsometer ที่ใช้ในการควบคุมค่าความหนา (Thickness) ซึ่งทำให้เกิดความคล่องตัวและความต่อเนื่องในการทำงาน อันช่วยให้สามารถควบคุมการปลูกผลึก การวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การดำเนินการสามารถทำได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P



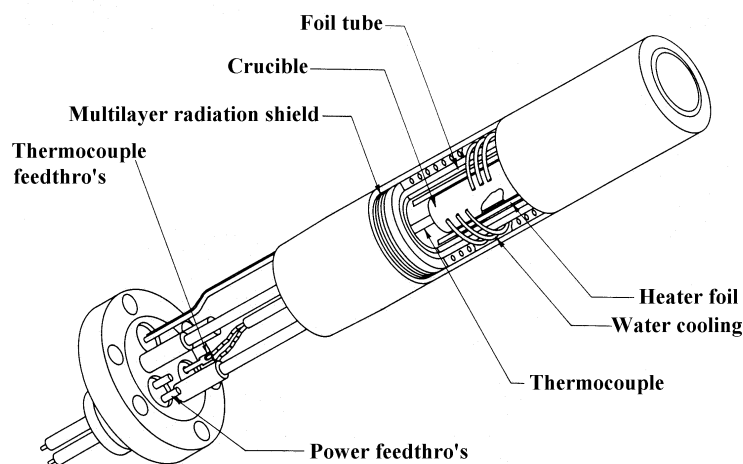
รูปที่ 2.2 ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 Effusion Cell

Effusion Cell เป็นอุปกรณ์หลักสำคัญของระบบ MBE ในการผลิตลำโมเลกุลขององค์ประกอบจากวัตถุดิบที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งวัตถุดิบนี้เป็นธาตุบริสุทธิ์หรือสารประกอบที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบก็ได้ และความสำคัญของ Effusion Cell นั้นเป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้การปลูกผลึกวิธี MBE มีข้อดีเด่นที่เหนือกว่าเทคนิคอื่นๆ โดย Effusion Cell แต่ละชนิดนั้นมีความเหมาะสมสำหรับวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ซึ่งในรายงานวิจัยนี้นำเสนอเฉพาะ Effusion Cell ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกผลึกอิมแพกซ์ของ GaAs และ InP เท่านั้น

2.1.2.1 Knudsen Cell

Knudsen Cell หรือ K-cell เป็น Effusion Cell แบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งใช้ในการระเหยหรือระเหิด (Evaporate) วัตถุดิบให้เป็นลำโมเลกุลโดยใช้พลังงานจากความร้อน สำหรับโครงสร้างของ Knudsen Cell ดังในรูปที่ 2.3 วัตถุดิบที่ใช้ถูกบรรจุไว้ในเบ้าหลอม (Crucible) ซึ่งทำจากวัสดุ Pyrolytic boron nitride หรือ PBN โดยเบ้าหลอมนี้ถูกล้อมรอบด้วยขดลวดความร้อน (Heating elements) ขดลวดความร้อนเป็นตัวกำเนิดความร้อนให้แก่เบ้าหลอมจากการผ่านกระแสไฟฟ้าและที่ใต้เบ้าหลอมนี้มีเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) ติดตั้งอยู่ เพื่อใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิและในการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ โดยอาศัยสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ลต่อเข้ากับเครื่องควบคุมแบบ PID ที่ทำหน้าที่ควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดความร้อนของ Effusion cell เพื่อให้เบ้าหลอมมีอุณหภูมิตามที่กำหนด สำหรับ K-Cell ที่มีเบ้าหลอมขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีท่อนำระบายความร้อนอยู่ภายใน เพื่อให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ไปรบกวนส่วนอื่นๆ อีกด้วย



รูปที่ 2.3 แผนภาพ โครงสร้าง Knudsen Cell

สำหรับการควบคุมปริมาณของจำนวนโมเลกุลที่พ่นออกจาก Knudsen Cell ควบคุมได้จากอุณหภูมิของขดลวดความร้อนภายใน Knudsen Cell ซึ่งปริมาณของจำนวนโมเลกุลของสารที่พ่นออกจาก Knudsen Cell สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$J = 1.118 \times 10^{22} \frac{pA}{l^2 \sqrt{MT}} \quad \text{molecules/cm}^2\text{-s} \quad (2.1)$$

โดย p คือค่าความดันไอของธาตุที่อุณหภูมิกำหนดมีหน่วยเป็นทอร์รี่ (Torr)

A คือพื้นที่บริเวณปากช่องเปิดของ Knudsen Cell (Cell orifice area) มีหน่วยเป็น ตร. ซม.

l คือค่าระยะห่างจากปากช่องเปิดของ Knudsen Cell ถึงผิวหน้าของผลึกฐานมีหน่วยเป็น ซม.

M คือค่ามวลโมเลกุลขององค์ประกอบที่เป็นวัตถุดิบมีหน่วยเป็น AMU

T คือค่าอุณหภูมิจากสมบรูณ์ของภาชนะบรรจุใน Knudsen Cell มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

สำหรับอัตราการเกิดผลึก (Growth rate) ของการปลูกผลึกวิธี MBE สำหรับสารประกอบกลุ่ม III-V นี้ขึ้นกับจำนวนโมเลกุลของธาตุหมู่ III เช่นกรณีของ GaAs อัตราการเกิดผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R = \alpha J_{\text{Ga}} \quad (2.2)$$

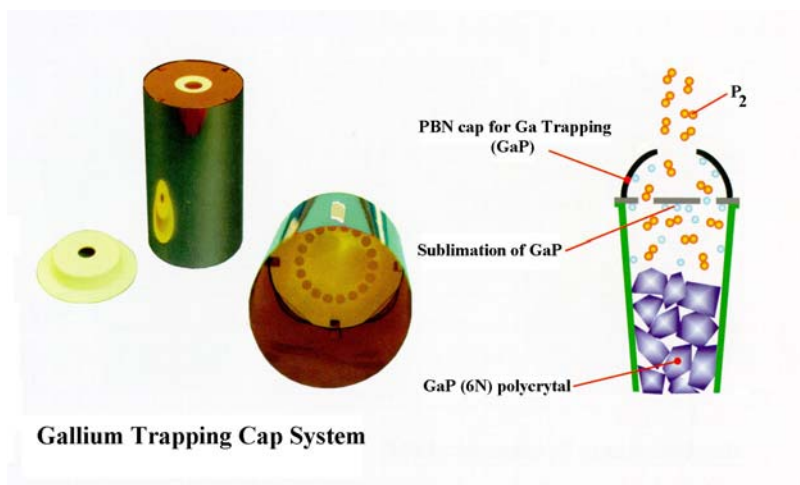
โดย R คืออัตราการเกิดผลึกมีหน่วยเป็น ไมครอน/ชั่วโมง

α คือค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่นี้ขึ้นกับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกและทิศทางผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน

กลไกการเกิดผลึกของสารประกอบกลุ่ม III-V นั้นถูกกำหนดโดยอะตอมของธาตุหมู่ III ในสถานะของก๊าซที่ถูกพ่นไปยังผิวหน้าของผลึกแผ่นฐานเป็นหลัก เนื่องจากอะตอมของธาตุหมู่ III มีค่าสัมประสิทธิ์การเกาะติด (Sticky coefficient) สูงกว่าอะตอมของธาตุหมู่ V โดยกลไกการเกิดผลึกขึ้นกับอัตราการพ่นของธาตุ III จาก K-cell ที่เกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน จากนั้นจะจับตัวรวมตัวกับอะตอมของธาตุหมู่ V ในรูปของสารประกอบเรียงตัวกันเป็นผลึกตามโครงสร้างของแผ่นผลึกฐาน ตัวอย่างเช่น In-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ In และ As₄ หรือ As₂ และ Ga-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ Ga และ As₄ หรือ As₂ ทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของผลึกแผ่นฐาน แล้วจึงก่อให้เกิดพันธะขึ้นเป็นโครงผลึก โดยกระบวนการเกิดผลึกนี้ขึ้นกับพลังงานกระตุ้นที่ให้แก่มอเลกุลเหล่านั้น ได้แก่ ความร้อนจากอุณหภูมิของผลึกแผ่นฐานและพลังงานจลน์ที่ได้จาก Knudsen cell

อย่างไรก็ตาม Knudsen cell นั้นมีขีดจำกัดสำหรับสารหรือธาตุบางชนิด เนื่องจากไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตลำโมเลกุลของสารหรือธาตุที่มีค่าความดันไอสูงได้ ตัวอย่างเช่น P, S, Se เป็นต้น เนื่องจากการควบคุมค่าความดันไอทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนา Knudsen Cell ที่มีคุณสมบัติพิเศษ

ได้แก่ Valved Cracker Cell สำหรับสารเหล่านี้ แต่อย่างไรก็ดี Valved Cracker Cell นั้นมีราคาแพงและโครงสร้างซับซ้อน สำหรับสิ่งประดิษฐ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้ร่วมกับ Knudsen cell แบบธรรมดา นี้ เพื่อใช้ในการผลิตลัมโมเลกุลชนิด Dimer ของ As (As_2) และ P (P_2) ได้แก่ Ga-trapping cap วัสดุที่ใช้ในการนี้เป็นสารประกอบ GaAs และ GaP เนื่องจากมีราคาถูกและอุณหภูมิของการสลายตัวมีค่าไม่สูงเกินไป และค่าความแตกต่างของค่าความดันไอของสารประกอบในสถานะสมดุลที่มีค่าต่ำกว่าไอของ P_2 ที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยอุณหภูมินี้มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ Ga-trapping cap นั้นทำหน้าที่กักไอของสารประกอบ GaP ไว้ภายในภาชนะหรือ Crucible ของ Knudsen cell โดย Ga-trapping cap ช่วยในการรักษาสภาวะสมดุลของไอในสถานะที่เกิดการสลายตัว (Decomposition) ของสารประกอบ สำหรับการสลายตัวของสารประกอบดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากพลังงานความร้อนหรือการทำให้สารประกอบอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งในสภาวะสมดุลนี้สารประกอบกลุ่ม III-V มีจำนวนหรือปริมาณของอะตอมธาตุหมู่ III จำนวนมากกว่าธาตุหมู่ V และในสภาวะอุณหภูมิสูงนี้ธาตุหมู่ V อยู่ในรูปของ Dimer (V_2) เป็นส่วนใหญ่ แต่เนื่องจากค่าความดันไอของโมเลกุล Dimer ของหมู่ V นั้นมีค่าสูงกว่า ทำให้โมเลกุลของ Dimer ที่เกิดขึ้นถูกพ่นออกมาเป็นโมเลกุลหลักเพียงอย่างเดียว โครงสร้างของ Ga-trapping cap ตามรูปที่ 2.4

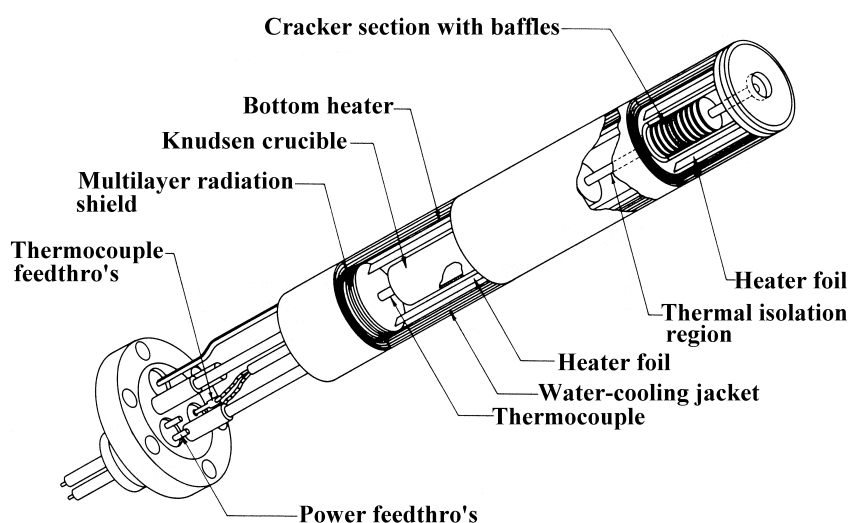


รูปที่ 2.4 ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap [25]

2.1.2.2 Cracker Cell

Cracker Cell มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Dissociation Cell เป็น Effusion Cell ที่ออกแบบเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดลัมโมเลกุลของธาตุหมู่ V ชนิด Dimer (V_2) ซึ่งตามปกติลัมโมเลกุลของธาตุหมู่ V ที่ได้จาก Effusion Cell ตามปกติเป็นชนิด Tetramer (V_4) (ตัวอย่างเช่น As มี As_2 เป็นโมเลกุล dimer และ As_4

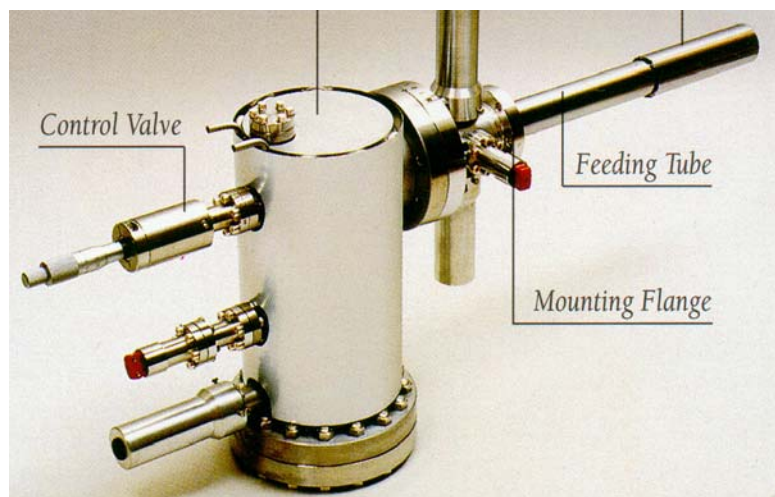
เป็นโมเลกุล Tetramer) โครงสร้างของ Cracker Cell มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Knudsen Cell แต่ Cracker Cell นั้นมี Cracking Zone ซึ่งเป็นส่วนของขดลวดความร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงในช่วง 800-1000°C เพื่อให้โมเลกุล Tetramer แตกตัวเป็นโมเลกุล Dimer และในการออกแบบนั้นมีข้อควรระวังคือต้องให้ส่วน Cracking Zone อยู่ห่างจาก Crucible หรือ Reservoir ที่บรรจุวัตถุดิบมากเพียงพอ เพื่อมิให้ความร้อนจาก Cracking Zone ซึ่งมีค่าอุณหภูมิสูงรบกวนส่วน Crucible อันมีผลต่อการควบคุมค่าความดันไอได้ ดังนั้น Effusion cell ชนิดนี้จึงมีความยาวกว่า Knudsen Cell และจำเป็นต้องมีส่วนของท่อน้ำหรือส่วนระบายความร้อนในลักษณะอื่นๆ สำหรับทำหน้าที่เป็นระบบระบายความร้อน (Cooling) เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิในส่วน Crucible สามารถทำได้



รูปที่ 2.5 แผนภาพโครงสร้างของ Cracker Cell

2.1.2.3 Valved Cracker Cell

Valved Cracker Cell เป็น Effusion Cell ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดลำโมเลกุลชนิด Dimer ของธาตุหมู่ V ซึ่ง Valved Cracker Cell มีกลไกของ Nozzle valve ที่ใช้ในการควบคุมค่าความดันไอจากการปรับตำแหน่งของ Valve รวมถึงความสามารถในการปิดกั้นไอไว้ภายใน Reservoir เพื่อไม่ให้ไอออกมาได้ในสถานะที่เราไม่มีความต้องการ ทำให้มีความคล่องตัวในการกำหนดค่าความดันไอตามเงื่อนไขได้ง่ายและความสามารถในการตัดลำโมเลกุลได้ดีกว่า Effusion Cell ชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะการปลูกผลึกของโครงสร้างเฮเทอโร (Heterostructure) ที่มีสารประกอบของธาตุหมู่ V ที่ต่างชนิดกัน ข้อดีของ Valved Cracker Cell คือสามารถใช้วัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแตกต่างจาก Knudsen Cell และ Cracker Cell ซึ่งวัตถุดิบภายในนั้นถูกทำให้กลายเป็นไอระเหยออกมาตลอดเวลา ถึงแม้ว่า Shutter อยู่ในตำแหน่งปิดก็ตาม

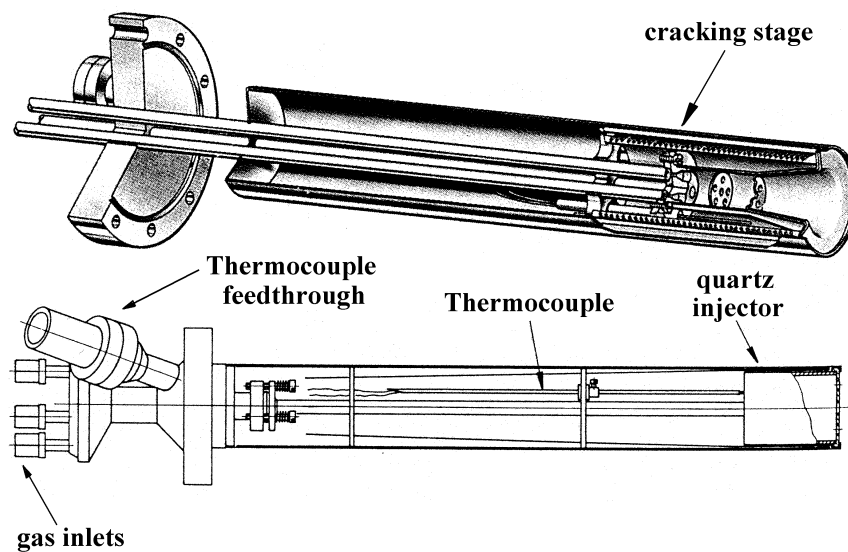


รูปที่ 2.6 ภาพของ Asenic Valve Cracker Cell [26]

2.1.2.4 Gas Injector Cell

Gas Injector Cell เป็น Effusion Cell ที่ใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบ ซึ่งอยู่ในรูปของ Hydride สำหรับแหล่งจ่ายธาตุหมู่ V เช่น PH_3 , AsH_3 และ Organic compound สำหรับแหล่งจ่ายธาตุหมู่ III ตัวอย่างได้แก่ TMGa และ TMIIn เป็นต้น โดยโครงสร้างของ Gas Injector Cell มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Knudsen Cell ต่างกันแต่ขดลวดความร้อนที่ใช้มีอุณหภูมิสูงกว่า เพื่อให้ก๊าซที่ไหลผ่านแตกตัวออกเป็นโมเลกุลแบบ Dimer หรือ Tetramer สำหรับโมเลกุลธาตุหมู่ V และอะตอมเดี่ยวสำหรับธาตุหมู่ III ควบคุมได้จากค่าอุณหภูมิในส่วน Cracking Zone สำหรับข้อดีของการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบคือความต่อเนื่องและความสะดวกในการเติมก๊าซวัตถุดิบ โดยไม่มีความจำเป็นในการทำให้ระบบร่วก่อนการเติมวัตถุดิบเหมือนระบบ MBE ทั่วไป เนื่องจากวัตถุดิบนั้นถูกเก็บไว้ในท่อก๊าซที่ต่อเข้าระบบ MBE ซึ่งสามารถปิดท่อของระบบการป้อนก๊าซที่ต่อเข้าระบบและทำการเปลี่ยนท่อก๊าซได้ โดยไม่กระทบกับสถานะสุญญากาศของ Growth Chamber แต่อย่างไรก็ตามการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบนั้นมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งระบบปั๊มสุญญากาศที่มีขนาดกำลังสูงเพียงพอและต้องเป็นปั๊มชนิดที่คงทนต่อการกัดกร่อนของก๊าซเหล่านั้น

คุณภาพของลำโมเลกุลที่ได้จาก Effusion Cell นั้นมีผลต่อคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลึก ดังนั้นลำโมเลกุลที่ได้นั้นต้องมีเสถียรภาพ (Stable) ความสม่ำเสมอ ความสะอาดขององค์ประกอบต่างๆ ของ Effusion Cell และความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ก็มีส่วนสำคัญต่อคุณภาพของลำโมเลกุล ลำโมเลกุลชนิดต่างๆ ของธาตุหมู่ V และชนิด Effusion Cell และวัตถุดิบที่ใช้สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.7 ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector Cell [27]

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบชนิด Effusion cell และชนิดของลำโมเลกุลที่ได้จากวัสดุชนิดต่างๆ

Effusion Cell	ชนิดของลำโมเลกุล				
	P_2	As_2	As_4	Sb_2	Sb_4
Knudsen Cell	GaP	GaAs	Solid As	Solid Sb	Solid Sb
Cracking Cell	Solid P	Solid As	Solid As	Soild Sb	Soild Sb
Valve Cracking Cell	Solid P	Solid As	Solid As	Soild Sb	Soild Sb
Gas Injector Cell	PH_3	AsH_3	-----	SbH_3	-----

2.1.3 อุปกรณ์วิเคราะห์

ข้อเด่นของระบบ MBE ที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอิมพัลส์วิธีอื่นๆ ในเชิงเทคนิคก็คือสามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ เข้ากับระบบได้ ทำให้มีความต่อเนื่องในการตรวจสอบและวิเคราะห์และมีความสะดวก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิจัยและการผลิตเชิงพาณิชย์ สำหรับในรายงานนี้ขอกล่าวถึงโดยสังเขปเฉพาะอุปกรณ์วิเคราะห์หลักพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับระบบ MBE เท่านั้น

2.1.3.1 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

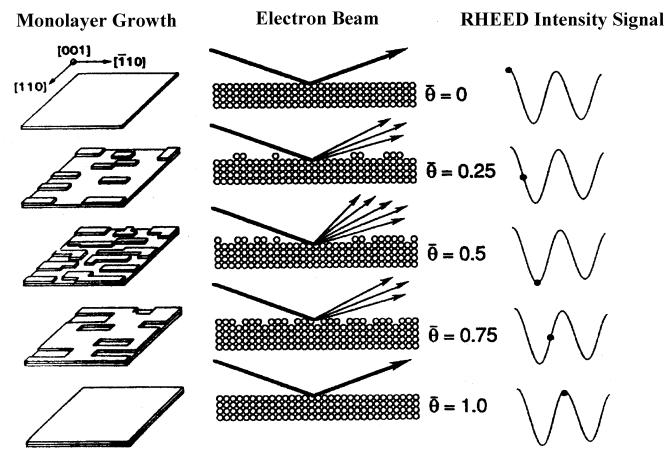
RHEED เป็นเครื่องมือหลักพื้นฐานที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบ MBE ที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างผิว (Surface Structure) โดยข้อมูลที่ได้จาก RHEED นี้บ่งบอกรูปแบบของลักษณะโครงสร้างผิวในเชิง Microstructure และความเรียบของผิว (Smoothness) ซึ่งลักษณะรูปแบบ (Pattern) ที่ได้จาก RHEED นี้ขึ้นกับลักษณะการเรียงตัวของอะตอมในโครงร่างผลึกและความเรียบของผิวที่ทำให้ลำอิเล็กตรอนเบี่ยงเบน (Diffraction) ไปในลักษณะ 3 มิติ ทำให้รูปแบบของ RHEED ที่ปรากฏขึ้นแตกต่างกันไป

สำหรับหน้าที่หลักสำคัญของ RHEED ที่สรุปได้มีดังนี้

1. การตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานในขณะที่ทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal Cleaning) ก่อนการปลูกผลึก
2. การควบคุมสถานะเริ่มต้นของการปลูกผลึก
3. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวในขณะที่ทำการปลูกผลึก

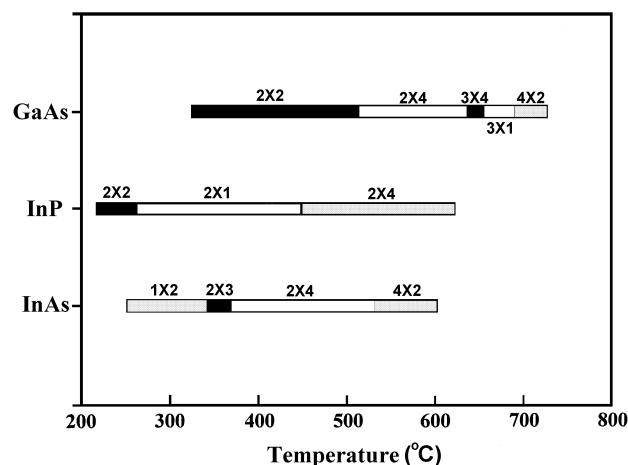
นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการสอบเทียบอัตราการปลูกผลึก (Growth Rate Calibration) ได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED ในขณะทำการปลูกผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.8 ตามปกติผิวหน้าของผลึกก่อนการปลูกผลึกมีความเรียบ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถสะท้อนผ่านผิวหน้าผลึกที่มีอะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งความเข้มของอิเล็กตรอนที่สะท้อนผ่านไปในการนี้มีค่าความเข้มสูงสุด แต่เมื่อการปลูกผลึกเริ่มต้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED มีค่าลดลงในขณะที่ทำการปลูกผลึกนี้เกิดจากการกระเจิง (Scattering) ของลำอิเล็กตรอน อันเนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหน้าของแผ่นผลึกเกิดการเรียงตัวของก้อนผลึกขนาดเล็ก (Cluster) โดยก้อนผลึกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ เป็นผลทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่าลดลง จนกระทั่งพื้นที่ของก้อนผลึกขนาดเล็กเหล่านั้นคลุมผิวหน้าของผลึกมากกว่าครึ่งหนึ่ง ความเข้มแสงของ RHEED จะกลับมามีความเข้มเพิ่มขึ้นอีก จนมีค่าสูงสุดเมื่อผลึกเรียงเต็มผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มและค่าความหนาของผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นรูปไซน์ (Sine) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มหนึ่งรอบในการเปลี่ยนแปลงความหนาหนึ่งชั้น โมเลกุล (Monolayer) ด้วยเหตุนี้เองทำให้สามารถควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ได้ในระดับชั้นโมเลกุล โดย RHEED เป็นเครื่องมือสำคัญในเทคนิค PLE และ MEE ซึ่งเป็นนิยมนำกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นเทคนิคสำคัญในการสร้างโครงสร้าง Quantum Dot แต่อย่างไรก็ดีเทคนิคนี้มีขีดจำกัดคือการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงไม่ชัดเจนในการปลูกผลึกของสารประกอบบางชนิดและ

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขในสถานะที่แตกต่างกันอีกด้วย สำหรับรายละเอียดต่างๆ จะขอไม่กล่าวถึงในที่นี้



รูปที่ 2.8 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก

นอกจากนี้รูปแบบ (Pattern) ของ RHEED ที่ได้ของผลึกแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกถึงช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ด้วยดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกผลึกวิธี MBE และสามารถใช้ได้กับสารประกอบเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำที่ค่าแถบพลังงานมีค่าน้อยมาก อันเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการวัดด้วย Pyrometer ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ในกรณีนี้ [28] แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C และมีความยุ่งยากในการอ่านรูปแบบของ RHEED ในการวัดเทียบอุณหภูมิ โดยขึ้นกับความชำนาญมากของผู้อ่านเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.9 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึก

(100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer [29]

2.1.3.2 Residual Gas Analyzer

Residual Gas Analyzer หรือ Quadrupole Mass Spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่เป็นก๊าซภายในส่วน Growth Chamber ซึ่งทำให้เราสามารถรู้สภาพบรรยากาศภายในส่วน Growth Chamber นอกจากนี้ Residual Gas Analyzer ยังสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Composition) ของสารประกอบในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้เช่นกัน [30] โดยข้อดีของ Residual Gas Analyzer ที่เหนือกว่าการใช้ Ionization gauge คือ Residual Gas Analyzer มีความละเอียดและความแม่นยำสูงกว่า อีกทั้งไม่มีผลของการเสื่อมของความไว (Sensitivity) เช่นเดียวกับ Ionization gauge เมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง

2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าในระบบ MBE

นอกจาก RHEED, Ionization Gauge และ Residual Gas Analyzer ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักพื้นฐานที่ติดตั้งในส่วน Growth Chamber ของระบบ MBE อุปกรณ์อื่นๆ ที่ติดตั้งเพื่อช่วยในการปลูกผลึกสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น Pyrometer เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน Ellipsometer เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความหนาและอัตราส่วนของสารประกอบได้แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยลักษณะของระบบ MBE ที่เป็นโมดูลที่มีสถานะสุญญากาศระดับพิเศษทำให้สามารถต่อระบบ MBE เข้ากับเครื่องมือวิเคราะห์อื่นๆ ได้แก่ Auger Electron Spectroscopy (AES), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Secondary Ion Microscopic Spectroscopy (SIMS), Scanning Tunnelling Microscope (STM) ได้อีกด้วย จึงทำให้เราสามารถวิเคราะห์สมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยเฉพาะ STM เป็นเครื่องมือที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ที่ช่วยให้เราสามารถเข้าใจกลไกต่างๆ ในระดับขนาดของอะตอม [31] ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของเครื่องมือเหล่านั้นสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอื่นๆ สำหรับรายการของส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth chamber สรุปไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รายการส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth Chamber ของระบบ MBE

ส่วน (Facilities)	รายการเครื่องมือ (Component)	หน้าที่ (Function)
Beam Generators	Knudsen Cell Cracker Cell Valved Cracker Cell Gas Injector Cell	แหล่งจ่ายลำโมเลกุลหรืออะตอม
Beam Interruptors	Shutter	ทำหน้าที่เปิด-ปิดลำโมเลกุลที่ผ่านสู่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการปลูกผลึก
Beam and Growth Monitors	RHEED Quadupole mass spectrometer Ionization gauge	วิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างผิว ข้อมูลค่าความดันไอของลำโมเลกุล และค่าอัตราส่วน
Process Environment	Multichamber UHV system	ระบบ Multichamber ช่วยให้สามารถลดปริมาณของ residual gas ที่ active (ได้แก่ O_2 , CO_2 , H_2O , C_2O) ทำให้สามารถปลูกผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูง

2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอิพิแทกซ์วิธี MBE

กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอิพิแทกซ์จากลำโมเลกุลสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นเกิดจากอะตอมของธาตุหมู่ III เป็นหลัก เนื่องจากความสามารถของการเกาะติดผิวแผ่นผลึกฐานของธาตุหมู่ III ซึ่งตามปกติแล้วผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกถูกปกคลุมด้วยบรรยากาศของโมเลกุลธาตุหมู่ V เพื่อลดความเสี่ยงการสูญเสียในขณะที่แผ่นผลึกฐานมีค่าอุณหภูมิสูง อันเป็นผลทำให้ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเป็นชั้นของอะตอม V ดังนั้นอะตอมของธาตุหมู่ III จึงเรียงตัวเกาะลงบนชั้นของอะตอม V จนกลายเป็นชั้นของอะตอม III จากนั้นอะตอมของธาตุหมู่ V ทำปฏิกิริยาเกาะบนอะตอมของธาตุหมู่ III หรือถูกดูดซับ (Adsorp) จากอะตอมของธาตุหมู่ III โดยลักษณะของการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V นั้นเรียงตัวสลับกันไปตลอดการปลูกผลึก ซึ่งอะตอมของธาตุหมู่ V ได้จากการแตกตัวของ

โมเลกุลที่อยู่ในรูป Dimer หรือ Tetramer ทำให้กระบวนการเกิดผลึกเป็นลักษณะได้สัดส่วนตามโครงสร้าง (Stoichiometric) โดยโมเลกุลส่วนเกินของธาตุหมู่ V นั้นถูกปล่อยคายออก (Desorp) จากผิวของแผ่นผลึกฐาน แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีความสำคัญสำหรับการปลูกผลึกวิธีนี้ ดังนั้นหากอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงทำให้เกิดผลดังต่อไปนี้

ก) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ V ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ V ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ข) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ III ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ III ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ [32]

สารประกอบ	$T_{CS}(^{\circ}C)$	$T_{max(V4)}(^{\circ}C)$	$T_{max(V2)}(^{\circ}C)$	J_{V4}/J_{III}
AlP	>700	640	700	~1.0/1
GaP	670	490	750	~1.0/1
InP	363	>450	>500	~3.0/1
AlAs	>750	630	750	~1.5/1
GaAs	~620	480	>760	~1.0/1
InAs	~370	~450	~550	~5.0/1

T_{CS} หมายถึงอุณหภูมิของการระเหิด (Congruent Sublimation Temperature)

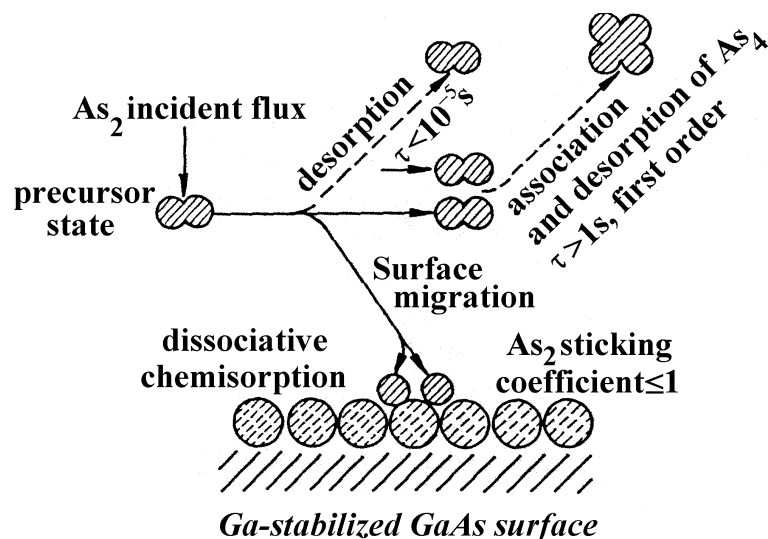
$T_{max}(V_4)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดภายใต้บรรยากาศ tetramer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

$T_{max}(V_2)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดภายใต้บรรยากาศ dimer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

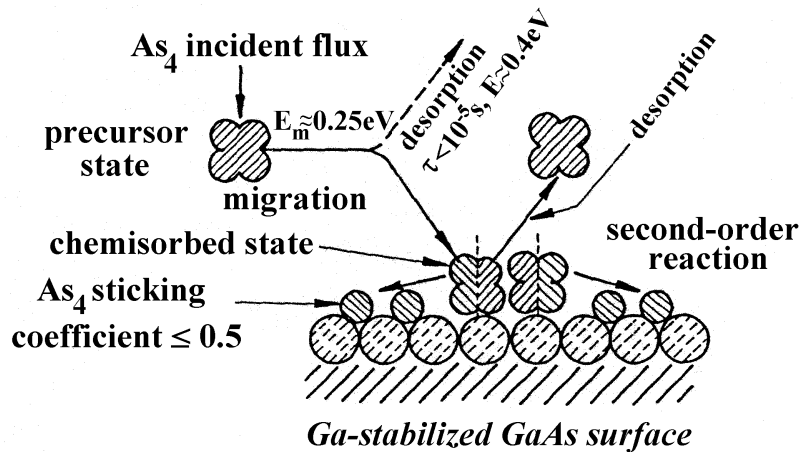
J_{V4}/J_{III} หมายถึงค่าอัตราส่วน flux ของ V/III ที่เกิดจากการสลาย (Decomposition)

ดังนั้นอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานจึงควรอยู่ในระดับที่ไม่เกิดสาเหตุในข้อ ข) จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการชดเชยอะตอมธาตุของหมู่ V ที่สูญเสียไป เนื่องจากผลในข้อ ก) ซึ่งค่าอุณหภูมิการระเหิดของสารประกอบชนิดต่างๆ มีค่าตามตารางที่ 2.3

การอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึกอีพิแทกซ์จากลำโมเลกุลนั้นเราสามารถใช้แบบจำลองตามรูปที่ 2.10 และ 2.11 อันเป็นตัวอย่างของ GaAs ซึ่งปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือกรณีของ Ga-As₂-(100) GaAs และกรณีของ Ga-As₄-(100) GaAs สำหรับในกรณี Ga-As₂-(100) GaAs ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากอะตอมของ Ga เกาะติดบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเรียงตัวเป็นชั้น (layer) จากนั้นโมเลกุล As₂ ทำปฏิกิริยากับอะตอมของ Ga โดยแตกตัวเป็นอะตอม As และเกาะตัวบนชั้นอะตอม Ga สำหรับอัตราการเกาะของโมเลกุล As₂ ที่ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานขึ้นกับค่า Flux ของ Ga สำหรับโมเลกุล As₂ ส่วนเกินนั้นจะระเหิดไปในรูปของโมเลกุล As₂ และ As₄ ทำให้การเกิดผลึกเป็นแบบ Stoichiometric Growth ดังในรูปที่ 2.10 สำหรับกรณี Ga-As₄-(100) GaAs นั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนกว่าโดยโมเลกุล As₄ คู่หนึ่งทำปฏิกิริยากับอะตอม Ga ที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งอะตอม Ga ได้เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโมเลกุล As₄ แต่ละโมเลกุลแตกตัวให้อะตอม As จำนวน 2 อะตอม เกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานด้วยการดูดซับ (adsorp) จากอะตอมของ Ga โดยจำนวนอะตอมของ As ที่เกาะลงบนผิวหน้ามีสัดส่วนเท่ากับจำนวนอะตอมของ Ga ที่เกาะที่ผิวหน้า ส่วนอะตอม As ส่วนที่เหลือจำนวน 4 อะตอมนั้นจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุล As₄ และถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกจากผิวไป ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องให้ค่าความหนาแน่นของโมเลกุล As₄ หรือ Flux ของ As₄ (J_{As_4}) มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของโมเลกุล Ga หรือ Flux ของ Ga (J_{Ga}) เพื่อให้จำนวนโมเลกุล As₄ มีจำนวนมากเพียงพอสำหรับปฏิกิริยาที่มีส่วนที่เกาะเรียงตัวในผลึกและส่วนที่ปล่อยคายออก ในขณะที่ทำการปลูกผลึกนั้นอะตอมของ As สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนหนึ่งที่เกาะลงบนผิว (Adsorp) ของอะตอม Ga เรียงตัวเป็นโครงผลึก และอีกส่วนหนึ่งที่ถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกมา ซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียไปและการสูญเสียนี้มีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As₂-(100) GaAs



รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As₄-(100) GaAs

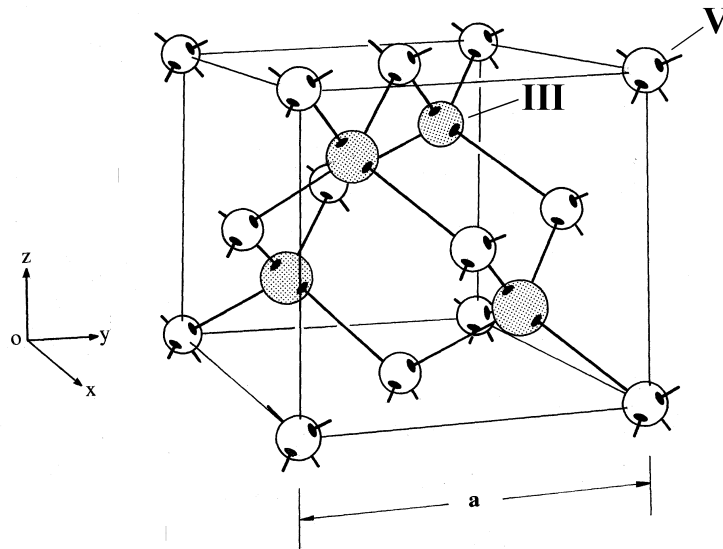
2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

นับตั้งแต่ทศวรรษที่ 50 ได้มีการค้นพบสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดสองธาตุ (Binary) ของกลุ่ม III-V และสมบัติต่างๆ ของสารประกอบเหล่านี้มีสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายตามชนิดและองค์ประกอบของสารประกอบ นับตั้งแต่ค่าแถบพลังงาน (Band Energy Gap) ในช่วง 0.18-2.42 eV ค่าดัชนีหักเห ฯลฯ เป็นต้น ต่อมาในทศวรรษที่ 60 ได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียมของสารประกอบเหล่านี้เพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ และเทคนิคการปลูกผลึกต่างๆ ได้เริ่มต้นขึ้นในช่วงนี้ การปลูกผลึกอพิแทกซีในยุคนี้ส่วนใหญ่เน้นมีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ประมาณปี 1970 สิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับ GaAs เป็นสิ่งประดิษฐ์ของสารประกอบ III-V กลุ่มแรกที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นและสิ่งประดิษฐ์ที่เกิดขึ้นในยุคนี้เป็นต้นแบบของสิ่งประดิษฐ์ในยุคต่อมา โดยเฉพาะสิ่งประดิษฐ์สำหรับระบบสื่อสารทางแสงในช่วงย่าน 1.3 และ 1.5 μm ที่สร้างจากสารประกอบ InGaAsP บนแผ่นผลึกฐาน InP ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

2.3.1 โครงสร้างของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V มีโครงสร้างแบบ Zincblende ตามรูปที่ 2.12 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงผลึกเพชร (Diamond) ได้แก่ ผลึกเพชร ผลึก Si และ ผลึก Ge โดยการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V เรียงตัวสลับกันเป็นชั้นๆ ไปตามทิศทาง (100) ในโครงผลึก ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในโครงสร้างนี้เป็นแบบโควาเลนต์ (Covalent bond) และระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นขึ้น

กับชนิดของอะตอมที่มาประกอบกันเป็นสารประกอบในโครงผลึก ดังนั้นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เป็นสมบัติเฉพาะของสารประกอบแต่ละชนิดคือ ค่าคงตัวผลึก (Lattice constant : a) ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.12 แผนภาพโครงสร้างแบบ Zincblende

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ธาตุ [33]

สารประกอบ	ค่าคงตัวผลึก ($\text{\AA}$)	ค่าแถบพลังงาน (eV)	ชนิดของแถบพลังงาน
AlP	5.451	2.45	แถบพลังงานไม่ตรง
AlAs	5.6605	2.16	แถบพลังงานไม่ตรง
AlSb	6.1355	1.58	แถบพลังงานไม่ตรง
GaP	5.4512	2.26	แถบพลังงานไม่ตรง
GaAs	5.6533	1.42	แถบพลังงานตรง
GaSb	6.0959	0.72	แถบพลังงานตรง
InP	5.8686	1.35	แถบพลังงานตรง
InAs	6.0584	0.36	แถบพลังงานตรง
InSb	6.4794	0.17	แถบพลังงานตรง

2.3.2 สมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

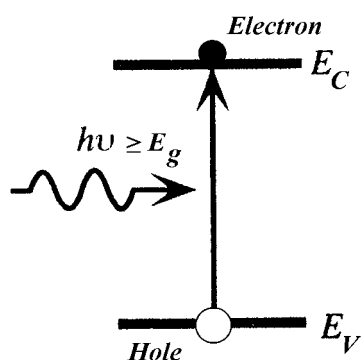
เนื่องจากสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นมีสมบัติที่หลากหลาย โดยขึ้นกับองค์ประกอบ และสัดส่วนปริมาณของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นสารประกอบ ตามปกติแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นส่วนใหญ่ นั้นเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 2 ธาตุ (Binary) ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัว เนื่องจากตัวแปร ขององค์ประกอบมีจำนวนน้อยที่สุด ดังนั้นในการสร้างแผ่นผลึกฐานจึงนิยมทำจากสารประกอบ 2 ธาตุ แต่สมบัติที่จำกัดของสารประกอบชนิด 2 ธาตุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในบางกรณี ฤๅญแจสำคัญ คือสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างหัวต่อเฮเทอโร (Heterojunction) โดยมีค่า คงตัวผลึกเข้าได้กับแผ่นผลึกฐาน เนื่องจากค่าแถบพลังงานหรือค่าดัชนีหักเหที่มีค่าแตกต่างกันไป อันเป็น ผลทำให้มีความสะดวกในการออกแบบสร้างสิ่งประดิษฐ์และสามารถกำหนดวัสดุที่มีความเหมาะสมกับ สิ่งประดิษฐ์ได้ สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ของสารประกอบกึ่งตัวนำตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ [34]

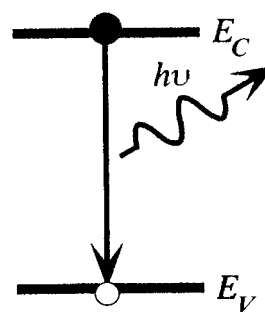
สารประกอบ	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ที่ 300 K	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ที่ 300 K ในกรณี Matching กับ InP
สารประกอบ 3 ธาตุ		
$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$	$E_g(\Gamma) = 0.36 + 2.35x + 0.24x^2$ $E_g(X) = 1.82 + 0.4x$	$E_g(\Gamma) = 1.45, x = 0.52$
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$	$E_g(\Gamma) = 0.36 + 0.505x + 0.555x^2$	$E_g(\Gamma) = 0.75, x = 0.53$
$\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$	$E_g(\Gamma) = 0.37 + 1.91x + 0.74x^2$	$E_g(\Gamma) = 0.78, x = 0.5$
สารประกอบ 4 ธาตุ		
$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$E_g(\Gamma) = 1.35 + 0.668x - 1.068y + 0.758x^2$ $+ 0.078y^2 - 0.069xy - 0.322x^2y + 0.03xy^2$ $E_g(\Gamma) = 1.35 - 0.775y + 0.149x^2$	$x = 0.47y$ $E_g(\Gamma) = 13.5 - 0.775y + 0.149y^2$
$\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$	$E_g(\Gamma) = 0.36 + 2.093x + 0.629y + 0.577x^2$ $+ 0.436y^2 + 1.013xy - 2.0xy(1-x-y)$	$(\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48})_{1-z}(\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47})_{1-z}\text{As}$ $x = 0.48z, 0.983x + y = 0.468$ $E_g(\Gamma) = 0.76 + 0.49z + 0.20z^2$

2.4 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นการวัดคุณสมบัติการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำโดยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่าพลังงานโฟตอนไม่น้อยกว่าค่าแถบพลังงาน (Energy Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ ผลของการดูดกลืนแสงทำให้เกิดพาหะส่วนเกิน (Excess carrier) ขึ้น โดยในสภาวะปกติอิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence Band) ได้รับพลังงานการกระตุ้นนี้หรือได้รับการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอน ทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปอยู่ในแถบพลังงานนำไฟฟ้า (Conduction Band) ซึ่งเป็นสเตตที่มีระดับพลังงานที่สูงกว่าเดิม ผลจากเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดสเตตว่างหรือโฮล (Hole) ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในสเตตใหม่นี้สามารถอยู่ในสภาวะดังกล่าวได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นอิเล็กตรอนและโฮลหรือพาหะส่วนเกินที่เกิดขึ้นมาจะรวมตัวกัน (Recombination) ซึ่งการรวมตัวนี้อิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีค่าประมาณค่าแถบพลังงานหรือค่าระดับพลังงานที่เกิดการเปลี่ยนระดับ เมื่อเราวัดสเปกตรัมของแสงที่ได้จากการเปล่งแสงนี้จะทำให้ทราบค่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่างๆ เช่นการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ Band to Impurity level เป็นต้น นอกจากนี้การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยังสามารถใช้ในการวัดคุณสมบัติของโครงสร้างควอนตัมได้เช่นกัน ซึ่งรายละเอียดจะไม่กล่าวในที่นี้



(ก) การดูดกลืนแสง

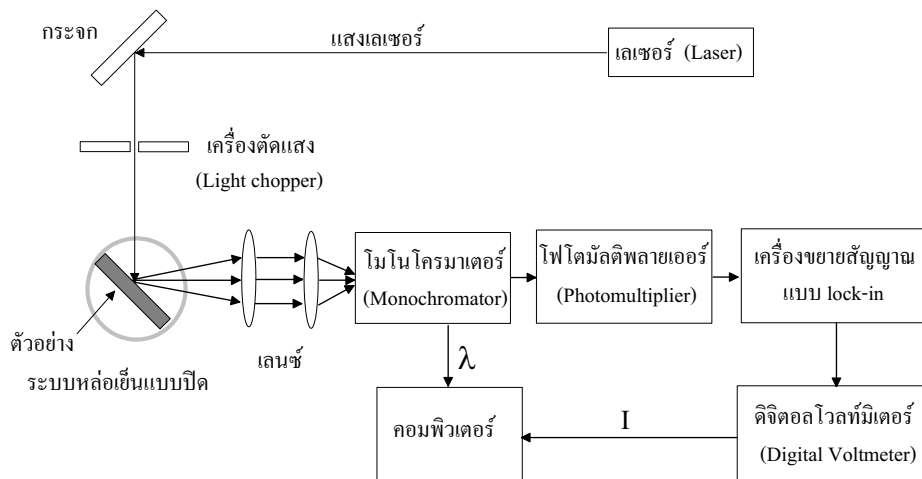


(ข) การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

รูปที่ 2.13 แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

สำหรับรายละเอียดของระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ มีการจัดระบบตามแผนภาพรูปที่ 2.14 เลเซอร์ชนิด Ar⁺ เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 488 nm ซึ่งเทียบเท่ากับโฟตอนที่มีค่าพลังงาน 2.54 eV โดยทำหน้าที่กระตุ้นตัวอย่างในการทดลอง ตัวอย่างจะถูกติดตั้งในระบบทำความเย็นชนิดไคโอโรเจนิกแบบวงจรปิด (Closed Circuit Cryogenic System) ซึ่งภายในใช้การหล่อเย็นด้วย

ฮีเลียมเหลว (Liquid Helium) และอุณหภูมิต่ำที่สุดในการทดลองนี้คือ 10 K แสงที่ได้จากตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นถูกรวบรวมด้วยเลนส์ 2 ชุด เพื่อให้แสงที่ได้มีค่าความเข้มสูงขึ้นและผ่านเข้าไปยังโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) โมโนโครมาเตอร์จะทำหน้าที่ในการแยกแสงที่มีค่าความยาวคลื่นต่างๆ ที่ได้จากตัวอย่าง และแสงจะผ่านได้เฉพาะแสงที่มีค่าตามที่มีโมโนโครมาเตอร์ได้ตั้งค่าไว้ จากนั้นแสงที่สามารถผ่านโมโนโครมาเตอร์ไปได้ก็ผ่านยังโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier : PMT) เพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณนี้อยู่ในรูปของกระแสที่มีขนาดสัญญาณเล็กมาก ดังนั้นจึงต้องให้สัญญาณผ่านเครื่องขยายสัญญาณชนิดล็อกอินแอมพลิไฟเออร์ (Lock-in Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จาก PMT และแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้นี้ผ่านมัลติมิเตอร์แบบเชิงเลข (Digital Multimeter : DMM) และส่งข้อมูลเชิงเลข (Digital format) ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการสร้างกราฟสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดสัญญาณแสงที่ได้และค่าความยาวคลื่นหรือค่าพลังงานโฟตอนของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

2.5 การวัดของ van der PAUW

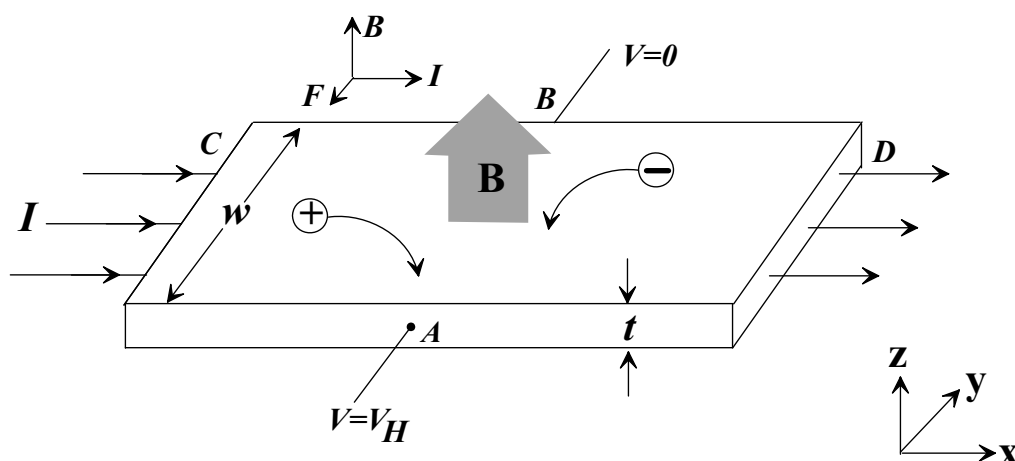
วิธีการวัดของ van der PAUW เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ได้ประยุกต์มาจากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและสามารถวัดค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ชนิดของพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ (Majority Charge Carrier) ค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Concentration) และค่าความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Mobility) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณจากการวัดวิธีดังกล่าวนี้จำเป็นที่เราจะต้องรู้ค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity)

หรือค่าสภาพต้านทาน (Resistivity) ในปัจจุบันวิธีการวัดของ van der PAUW มีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมวัสดุและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำงานเป็นที่ยอมรับให้เป็นวิธีมาตรฐาน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายสะดวกและผลการวัดที่แม่นยำ

2.5.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1879 โดย Edwin H. Hall ซึ่งพบการเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสและสนามแม่เหล็กในแผ่นโลหะบางตามรูปที่ 2.15 ซึ่งต่อมาได้มีการอธิบายปรากฏการณ์นี้ด้วยแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับแรงของลอเรนซ์ (Lorentz force) โดยแรงของสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุไฟฟ้ามีค่า

$$F_y = V_x \times B_z \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.15 แผนภาพปรากฏการณ์ฮอลล์

เนื่องจากแรงกระทำที่มีต่อประจุไฟฟ้าในสถานะสมดุล ทำให้เกิดจากสนามไฟฟ้าในแกน y ตามสมการ

$$E_y = \frac{J_x}{qP_o} B_z \quad (2.4)$$

ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดค่าสนามไฟฟ้าจากค่าแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage) ที่เกิดขึ้น ในกรณีของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลตามความสัมพันธ์

$$E_y = \frac{V_{AB}}{w} = \frac{I_x}{wt} \frac{1}{qp_o} B_z \quad (2.5)$$

สำหรับในกรณีที่พาหะส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีทิศทางในทางตรงกันข้าม ซึ่งวิธีการวัดนี้ทำให้เราสามารถรู้ชนิดของพาหะประจุไฟฟ้าได้ จากสมการข้างต้น เราสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นหรือค่าความเข้มข้นพาหะในกรณีของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลได้จาก

$$p_o = \frac{I_x B_z}{qt V_{AB}} \quad (2.6)$$

จากสมการของค่าสภาพต้านทาน (Resistivity)

$$\rho(\Omega\text{-cm}) = \frac{Rwt}{L} = \frac{V_{CD}}{I_x} \frac{wT}{L} \quad (2.7)$$

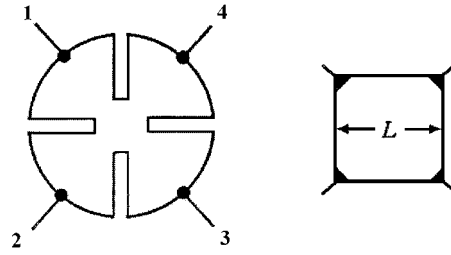
เราสามารถคำนวณหาค่าความคล่องของพาหะได้จากค่าสภาพต้านทานตามสมการ

$$\mu = \frac{1}{\rho q P_o} \quad (2.8)$$

ดังนั้นในการวัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงจำเป็นต้องมีการวัดหาค่าความต้านทานรวมอยู่ในการวัดนี้ เพื่อให้เราสามารถคำนวณหาผลได้ตามต้องการ

2.5.2 วิธีการวัดของ van der PUAUW

เนื่องจากวิธีการวัดค่าต่างๆ ด้วยปรากฏการณ์ของฮอลล์นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน มีการวัดหาค่าสภาพนำไฟฟ้าหรือสภาพต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อนำค่ามาใช้ในการคำนวณหาค่าความคล่องตัวของพาหะและค่าความหนาแน่นของพาหะ ดังนั้นวิธีการวัดของ van der PAUW [35] จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้เป็นการสะดวกและง่ายสำหรับการเตรียมตัวอย่าง โดยการวัดนี้ยังคงใช้พื้นฐานจากปรากฏการณ์ฮอลล์และวัดได้ผลละเอียดครบถ้วนไม่แตกต่างจากวิธีแบบเดิม สำหรับตัวอย่างในวิธีการวัดของ van der PAUW นั้นมีรูปร่างและลักษณะตามรูปที่ 2.16 โดยแบบ Cloverleaf ตามรูปที่ 2.16 (ก) เป็นแบบที่ดีที่สุด แต่มีความยุ่งยากในกระบวนการเตรียมตัว และในการทดลองนี้ใช้แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามรูปที่ 2.16 (ข) เนื่องจากการเตรียมทำได้ง่ายและสะดวกกว่า



(ก) แบบ Cloverleaf

(ข) แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 2.16 ภาพโครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW

โดยวิธีการวัดของ van der PAUW สามารถวัดหา Sheet resistant (R_s) จากสมการ

$$\exp\left(\frac{-\pi R_A}{R_s}\right) + \exp\left(\frac{-\pi R_B}{R_s}\right) = 1 \quad (2.9)$$

ซึ่งค่า R_A และ R_B นั้นเป็นค่าความต้านทานที่วัดตามรูปที่ 2.17 โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงที่ที่ขั้ว 1 ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 2 และทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว 3 และ 4 ในทำนองเดียวกันทำการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงที่ที่ขั้ว 2 ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 และทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว 1 และ 4 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหา R_A และ R_B ตามสมการ

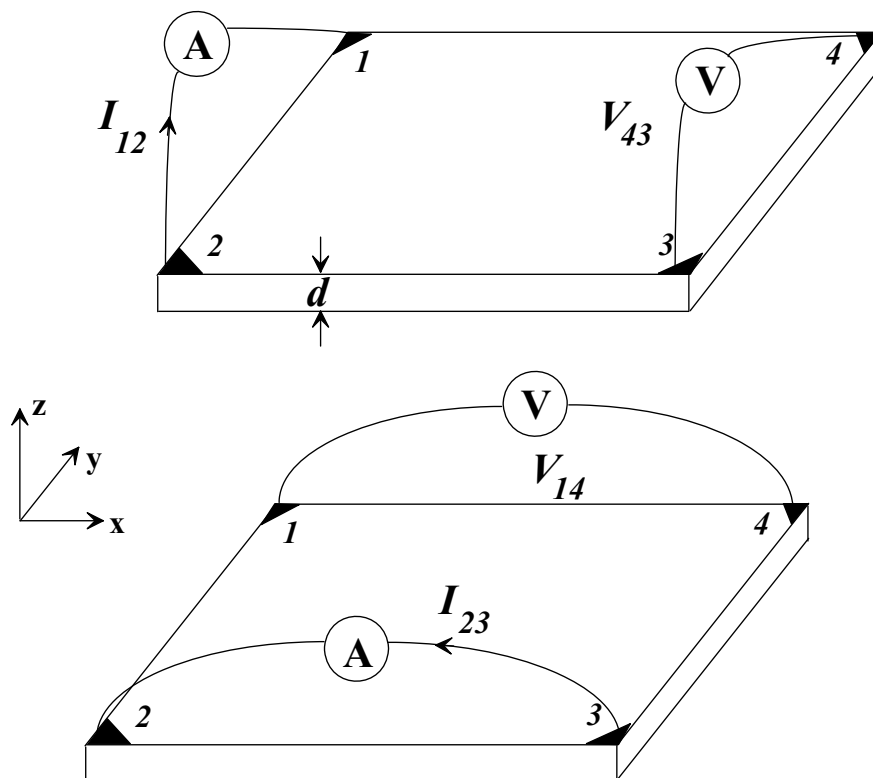
$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad \text{และ} \quad R_B = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (2.10)$$

โดยค่า R_s มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพต้านทานตามสมการ

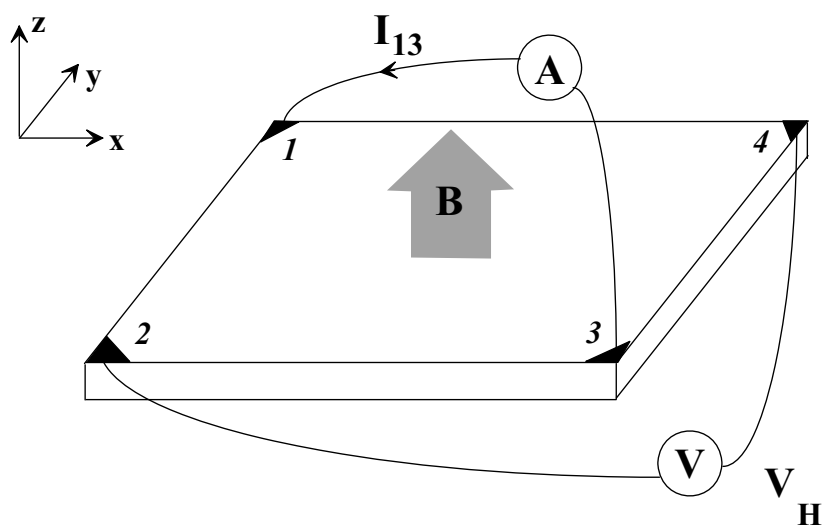
$$\rho = R_s d \quad (2.11)$$

d คือค่าความหนาของตัวอย่าง

สำหรับการวัดค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญที่นำมาใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะ ทำได้ด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงที่ที่ขั้ว 1 ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 และทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว 2 และ 4 โดยตัวอย่างอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กตามรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 แผนภาพการวัดหาค่าสภาพต้านทานในวิธีการวัดของ van der PAUW



รูปที่ 2.18 แผนภาพการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW

จากค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้นี้ เราสามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าความคล่องตัวของพาหะได้ ซึ่งวิธีการคำนวณจะได้กล่าวถึงต่อไป

2.5.3 การวัด van der PAUW ในทางปฏิบัติ

แบบจำลองของ van der PAUW ที่ได้กล่าวมานั้นเป็นแบบจำลองในอุดมคติ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นมีผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ความไม่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสในอุดมคติของรูปร่างตัวอย่าง ขนาดของขั้วโลหะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของตัวอย่าง และค่าความต้านทานของขั้วโลหะรวมถึงค่าความต้านทานของหัวรอยโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูง เป็นต้น นอกจากนี้ในขณะที่ทำการวัดนี้จำเป็นต้องป้องกันการเกิดพาหะส่วนเกินเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่าง ดังนั้นตัวอย่างต้องอยู่ในที่ไม่มีแสงและมีการควบคุมอุณหภูมิ โดยเฉพาะค่ากระแสที่ใช้ในการวัดนี้ต้องไม่มีค่าสูงเกินไปจนทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในการวัดนี้เราจะใช้ค่ากระแสในการวัดให้ที่ค่าน้อยที่สุด ดังนั้นเพื่อการวัดให้ได้ค่าที่ถูกต้องสูงสุด

2.5.3.1 การกำหนดนิยามในการวัดค่าสภาพต้านทาน

จากรูปร่างของตัวอย่างนั้นมีขั้วโลหะนำไฟฟ้าอยู่ 4 ขั้ว ซึ่งกำกับหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาตามในรูปที่ 2.17 เรากำหนดให้

I_{12} เป็นค่ากระแสไฟฟ้าตรงที่ไหลจากผ่านขั้ว 1 ผ่านตัวอย่างไปออกที่ขั้ว 2 ในทำนองเดียวกันสำหรับ I_{23} , I_{34} , I_{41} , I_{21} , I_{14} , I_{43} , I_{32} และมีหน่วยเป็นแอมแปร์

V_{12} เป็นค่าแรงดันที่วัดได้ที่ระหว่างขั้ว 1 และ 2 ในทำนองเดียวกันสำหรับ V_{32} , V_{34} , V_{41} , V_{21} , V_{14} , V_{43} , V_{32} และมีหน่วยเป็นโวลต์

2.5.3.2 การวัดหาค่าสภาพต้านทาน

สำหรับในการวัดนั้นทำการป้อนกระแส I_{12} และวัดค่าแรงดัน V_{34} และทำการกลับทิศทางกระแส I_{12} และวัดค่าแรงดัน V_{43} จากนั้นทำการวัดในทำนองเดียวกันกับ 6 ค่าที่เหลือคือ V_{41} , V_{14} , V_{12} , V_{21} , V_{23} และ

V_{32} จากนั้นนำค่าที่วัดได้ทั้ง 8 ค่าและนำมาคำนวณหาค่าความต้านทาน เพื่อให้จำแนกค่าความต้านทานได้ง่ายขึ้น เรากำหนดให้ $R_{I,V}$ เป็นค่าความต้านทานที่ได้จากการป้อนกระแสที่คู่ขั้ว I และแรงดันที่วัดได้ที่คู่ขั้ว V ตามสมการ

$$R_{21,34} = \frac{V_{34}}{I_{21}}, R_{12,43} = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad (2.12 \text{ a})$$

$$R_{32,41} = \frac{V_{41}}{I_{32}}, R_{23,14} = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (2.12 \text{ b})$$

$$R_{43,12} = \frac{V_{12}}{I_{43}}, R_{34,21} = \frac{V_{21}}{I_{34}} \quad (2.12 \text{ c})$$

$$R_{14,23} = \frac{V_{23}}{I_{14}}, R_{41,32} = \frac{V_{32}}{I_{41}} \quad (2.12 \text{ d})$$

จากการผลการวัดนี้เราสามารถตรวจสอบได้ว่า

$$R_{21,34} \approx R_{12,43} \quad (2.13 \text{ a})$$

$$R_{32,41} \approx R_{23,14} \quad (2.13 \text{ b})$$

$$R_{43,12} \approx R_{34,21} \quad (2.13 \text{ c})$$

$$R_{14,23} \approx R_{41,32} \quad (2.13 \text{ d})$$

สำหรับในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากความไม่คงที่ของกระแสหรือความแปรปรวนของอุณหภูมิ เราสามารถตรวจสอบได้จากสมการข้างต้น ซึ่งความแตกต่างของค่าในแต่ละสมการไม่ควรเกิน 3% ในทำนองเดียวกันเราจะได้

$$R_{21,34} + R_{12,43} \approx R_{43,12} + R_{34,21} \quad (2.14 \text{ a})$$

$$R_{32,41} + R_{23,14} \approx R_{14,23} + R_{41,32} \quad (2.14 \text{ b})$$

สำหรับการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานนั้นเราสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทาน 2 ค่าที่ได้จากการวัดดังนี้

$$R_A = \frac{(R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21})}{4} \quad (2.15 \text{ a})$$

$$R_B = \frac{(R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32})}{4} \quad (2.15 \text{ b})$$

จากค่า R_A , R_B เราสามารถคำนวณหาค่า Sheet Resistance (R_s) และค่าสภาพต้านทาน (ρ) ได้จากสมการ (2.9) ในกรณีที่เรารู้ค่าความหนาของตัวอย่างจากสมการ (2.11) จากนั้นเราจะนำค่าที่วัดและคำนวณในขั้นตอนนี้ไปใช้ในการหาค่าความคล่องพาหะต่อไป

2.5.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดฮอลล์

ในการวัดฮอลล์นั้นเป็นการวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุนำไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนไปภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งวิธีการนี้ทำให้เราสามารถรู้ได้ว่าพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮลและทราบค่าความเข้มข้นพาหะหรือค่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าได้

I_{13} คือค่ากระแสไฟตรงที่ป้อนเข้าที่ขั้วที่ 1 ผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 ในทำนองเดียวกันสำหรับ I_{31} , I_{42} และ I_{24}

B คือค่าสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางในแนวแกน z โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทางไปตามในแนวแกนทางบวกและมีค่าเป็นลบในกรณีตรงกันข้าม

V_{24P} คือค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้ระหว่างขั้วที่ 2 และ 4 ภายใต้สนามแม่เหล็กในทิศทางบวกในกรณีที่มีกระแสไฟฟ้า I_{13} ในทำนองเดียวกันกับ V_{42P} , V_{13P} และ V_{31P} สำหรับ V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} และ V_{31N} เป็นค่าที่วัดในทำนองเดียวกัน โดยสนามแม่เหล็กที่ทิศทางไปในทางลบ

2.5.3.4 การวัดค่าแรงดันฮอลล์

สำหรับในการวัดฮอลล์นั้นสามารถทำได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว 1 ให้ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 โดยตัวอย่างอยู่ภายในสนามแม่เหล็ก B ที่มีทิศทางในทางบวก ค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้ในที่นี้คือ V_{24P} และวัดในกรณีที่มีการกลับทิศทางการไหลของกระแสเป็น I_{31} และวัดค่าแรงดันฮอลล์ V_{42P} ด้วยวิธีการวัดในลักษณะเดียวกันจะได้ V_{13P} และ V_{31P} ด้วยกระแส I_{42} และ I_{24} ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดในทำนองเดียวกันโดยการกลับทิศทางสนามแม่เหล็ก วัดค่าแรงดัน V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} และ V_{31N} ด้วยกระแส I_{13} , I_{31} , I_{42} และ I_{24} ตามลำดับ

จากการวัดภายใต้สนามแม่เหล็ก วัดแรงดันฮอลล์ได้ 8 ค่า V_{24P} , V_{42P} , V_{13P} , V_{31P} , V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} และ V_{31N} นำค่าแรงดันฮอลล์ที่ได้มาคำนวณตามสมการ

$$V_C = V_{24P} - V_{24N} \quad (2.16 \text{ a})$$

$$V_D = V_{42P} - V_{42N} \quad (2.16 \text{ b})$$

$$V_E = V_{13P} - V_{13N} \quad (2.16 \text{ c})$$

$$V_F = V_{31P} - V_{31N} \quad (2.16 \text{ d})$$

จากค่าแรงดัน V_C , V_D , V_E และ V_F นี้เราสามารถตรวจสอบได้ว่าชนิดของพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ของตัวอย่างว่าเป็นโฮลหรืออิเล็กตรอน โดยพิจารณาจากผลบวกของ V_C , V_D , V_E และ V_F ในกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นบวก ตัวอย่างมีพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นโฮล ดังนั้นจึงเป็นชนิดพี (p-type) ส่วนในกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นลบตัวอย่างมีพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนและเป็นชนิดเอ็น (n-type)

สำหรับค่า Sheet carrier density สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$p_s = \frac{8 \times 10^{-8} IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.17)$$

ในกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นบวก หรือ

$$n_s = \left| \frac{8 \times 10^{-8} IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)} \right| \quad (2.18)$$

สำหรับกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นลบ

โดย B คือค่าสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเกาส์ (Gauss : G)

I คือค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere : A)

ค่า B และ I ในการทดลองมีค่าคงที่ (Constant) ตลอดในการวัดแต่ละครั้ง

ค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้าสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$n = \frac{n_s}{d} \quad (2.19)$$

$$p = \frac{p_s}{d} \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกันค่าคล่องตัวพาหะนำไฟฟ้าสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\mu = \frac{1}{qn_s R_s} \quad (2.21)$$

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

สำหรับในบทนี้เป็นขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิเทกซี InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs และ (411)A GaAs ในกรณีที่มีการเจือ Si และไม่มีการเจือ โดยลำโมเลกุลฟอสฟอรัสได้จากการสลายตัว (Decomposition) ของ GaP ที่อยู่ในรูปโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) ตัวแปรที่ได้ศึกษาในการทดลองนี้ได้แก่ ค่าอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก ค่าอัตราส่วน Beam-equivalent pressure (BEP) ของ P_2/In และค่าอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si

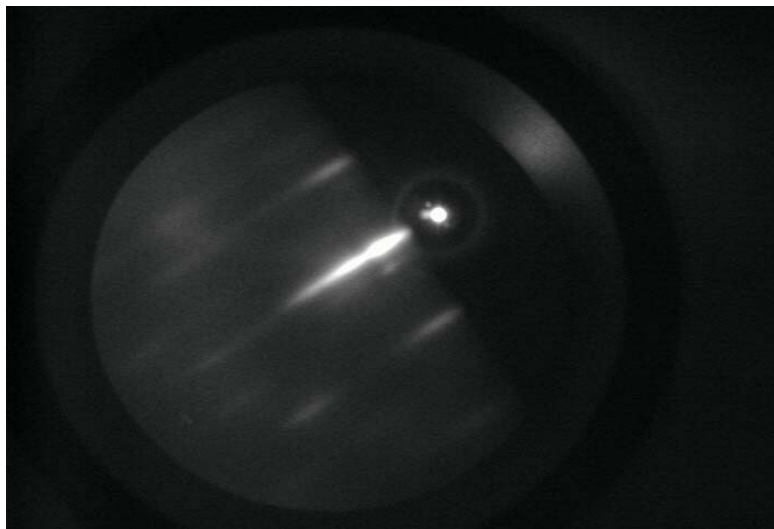
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น

แผ่นผลึกฐาน (Substrate) เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นผลึกเดี่ยว (Single Crystal Wafer) GaAs ที่มีทิศทางของผิวหน้าผลึก (Orientation) อยู่ในทิศทาง (100) และ (411)A แผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ใช้ในการทดลองนี้มีคุณสมบัติแบบกึ่งฉนวน (Semi-insulator) และมีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 มม. สำหรับ (100) แต่สำหรับ (411)A นั้นเป็นรูปร่างคล้ายตัวอักษร D ที่มีความสูงประมาณ 65 มม. และกว้าง 40 มม. โดยตัวอย่างแต่ละตัวอย่างเป็นส่วน 1 ส่วนที่ได้การตัดแบ่งแผ่นผลึกเดี่ยว GaAs ข้างต้นออกเป็น 4 ชิ้นตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางให้มีรูปร่าง 1/4 ของวงกลม จากนั้นนำไปล้างด้วย Trichloroethylene เค็ดและ Acetone เค็ดเป็นเวลาไม่น้อยกว่าอย่างละ 5 นาทีตามลำดับและล้างทำความสะอาด (Rinse) ด้วยน้ำ DI (Deionized Water) จนสะอาด หลังจากนั้นแช่ตัวอย่างในสารละลาย $HCl : H_2O$ (1:1 โดยปริมาตร) เป็นเวลานานไม่น้อยกว่า 10 นาที สุดท้ายทำการล้าง (rinse) ด้วยน้ำ DI และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ จากนั้นนำแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ผ่านการล้างแล้วไปติดตั้งบน Mo Block ด้วย In ที่หลอมเหลวด้วยความร้อน ทั้งไว้จนกระทั่ง Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เย็นลง ซึ่งพร้อมจะนำเข้าสู่ระบบ MBE ต่อไป

3.2 การปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs

หลังจากนั้นนำ Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่บรรจุใส่ใน Cassette เพื่อใช้ Cassette เป็นพาหนะลำเรียง Mo Block ภายในระบบ MBE โดยผ่าน Cassette introduction chamber ไปยัง Thermal treatment chamber หรือ Preparation Chamber เพื่อไล่ความชื้นและสิ่งสกปรกที่ผิว (Outgassing) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการลำเลียง Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ซึ่งก่อนการนำ Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs

ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth chamber) นั้นได้มีการปรับตั้งค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Ga และ As หรือ Effusion cell ที่บรรจุ Ga และ As (ในการทดลองนี้ Ga มีความบริสุทธิ์ 99.9999% และ As มีความบริสุทธิ์ 99.99999%) ให้มีค่าความดันไอตามที่ได้กำหนดไว้คือ $P_{Ga} = 2.7 \times 10^{-7}$ torr และ $P_{As_2} = 5.4 \times 10^{-6}$ torr ตามลำดับ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo block ให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่า 580°C จากอุณหภูมิปกติ ในอัตราการ 10°C/นาที่ ในขณะที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานมีค่าตั้งแต่ 300°C ขึ้นไปทำการเปิด Shutter ของ As cell เพื่อป้องกันผิวเสียหาย เนื่องจากสูญเสีย As ของแผ่นผลึก GaAs ที่เกิดจากการสลายตัว (Decomposition) ด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของ Mo block มีค่า 580°C ให้ทิ้งไว้เป็นเวลานานประมาณ 30 นาที ซึ่งภาพรูปแบบของ RHEED ที่ได้จากผิวหน้าแผ่นผลึก GaAs นั้นมีรูปแบบของ c(2X4) หลังจากผิวหน้าของแผ่นผลึก GaAs สะอาดปราศจากออกไซด์แล้ว จากนั้นเริ่มทำการปลูกผลึก GaAs โดยการเปิด Shutter ของ Ga cell เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเมื่อสิ้นสุดการปลูกผลึกตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ให้ทำการปิด Shutter ของ Ga cell จากนั้นทำการลดอุณหภูมิของ Ga cell ลงไปสู่ค่าอุณหภูมิ 400°C ซึ่งได้ความหนาของชั้นผลึก Buffer GaAs ประมาณ 5000 Å สุดท้ายทำการลดอุณหภูมิของ Mo block ในอัตราการ 10°C/นาที่ จนกระทั่งอุณหภูมิของ Mo block มีค่าอุณหภูมิ 250°C และอุณหภูมิของแหล่งจ่าย As ลงไปสู่ค่าอุณหภูมิ 100°C เป็นอันสิ้นสุดการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs



รูปที่ 3.1 ภาพรูปแบบ RHEED แบบ c(2X4) ที่ได้จากแผ่นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิ 580°C

3.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก InP

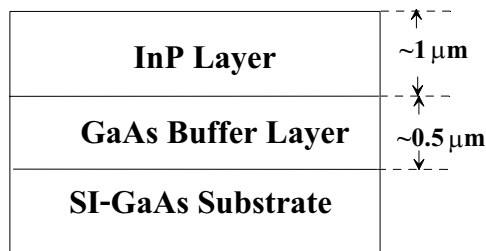
หลังจากสิ้นสุดการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs แล้ว รอให้ค่าความดันบรรยากาศภายในห้องปลูกผลึกมีค่าลดลง เพื่อให้ As_4 มีค่าลดลงจนกระทั่งค่าความดันต่ำกว่า 10^{-9} torr จากค่าความดัน $4-6 \times 10^{-8}$ torr จากนั้นทำการปรับค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย In และ P ให้ได้ค่าตามที่ได้กำหนดไว้คือ $P_{In} = 1.6 \times 10^{-7}$ torr

และ $P_{P_2} = 1.6 \times 10^{-6}$ torr (ในการทดลองนี้ In มีความบริสุทธิ์ 99.9999% และ P_2 ได้จากการสลายตัวของ GaP ที่อยู่ในรูปโพลีคริสตัลไลน์บริสุทธิ์ 99.999% โดยการเผาใน K-cell ที่มี Ga-trapping cap) ในกรณีนี้ ค่าอัตราส่วน P_{P_2} ต่อ P_{In} มีค่า 10 ซึ่งจะใช้ค่าอัตราส่วนความดัน BEP นี้ตลอดการทดลองและค่าความดันไอต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปตามค่าที่ต้องการ ได้แก่ 300, 350, 400, 450 และ 500°C โดยค่าอุณหภูมินี้เป็นค่าอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานที่ได้จากการสอบเทียบ (Calibration) รูปแบบของ RHEED และอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ล สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo Block จาก 250°C ในอัตราการเพิ่ม 10°C/นาทียังค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ข้างต้นนั้น เมื่ออุณหภูมิมีค่าถึง 300°C ต้องทำการเปิด Shutter ของแหล่งจ่าย P_2 เพื่อป้องกันมิให้ผิวหน้าเสียหายเนื่องจากศูนย์เสีย As ด้วยการทำให้แผ่นผลึกฐานอยู่ภายใต้บรรยากาศของ P_2 [36] เมื่ออุณหภูมิมียุคตามที่กำหนดไว้จากนั้นทิ้งระยะเวลาประมาณ 10-20 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิมียุคคงที่ จากนั้นทำการเริ่มต้นปลูก InP ด้วยการเปิด Shutter ของ In cell โดยค่าความดันไอ In ที่กำหนดนี้มีค่าอัตราการปลูกผลึก InP มีค่า $0.2 \mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ (โดยประมาณ ซึ่งได้จากการคำนวณเทียบกับค่ามาตรฐานในกรณีของ GaAs) สำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก 5 ชั่วโมง จะได้ความหนาของชั้นผลึก InP ประมาณ 1 ไมครอน

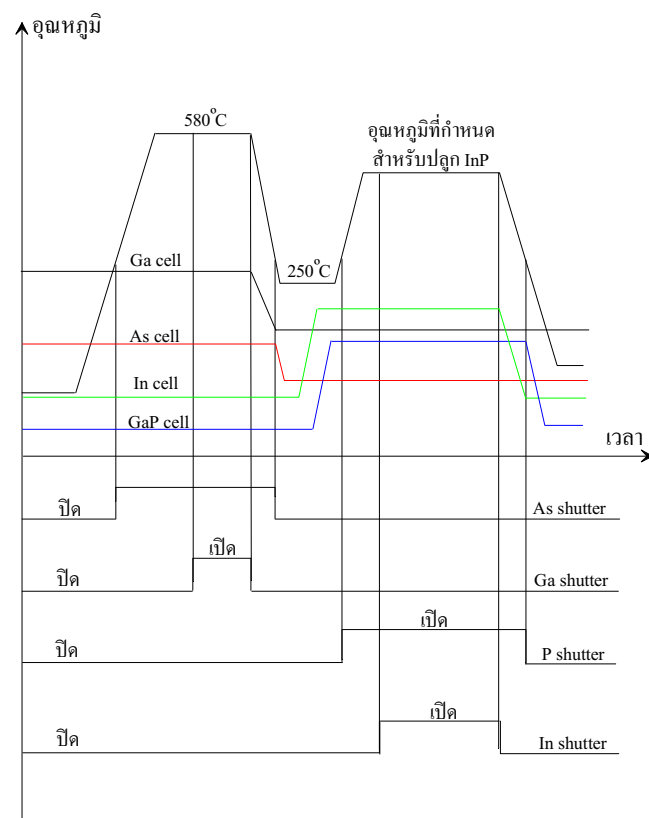
3.4 การศึกษาอิทธิพลค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In

ในการทดลองนี้เริ่มต้นเช่นเดียวกันกับการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก หลังจากที่ผ่านมาการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs แล้ว รอให้บรรยากาศภายในห้องปลูกผลึกมีค่าลดลง เพื่อให้ As_4 อยู่มีค่าความดันลดลงจนกระทั่งต่ำกว่า 10^{-9} torr จากค่า $4-6 \times 10^{-8}$ torr จากนั้นทำการปรับค่าตั้งอุณหภูมิของแหล่งจ่าย In และ P ให้ได้ค่าความดันตามที่ต้องการคือ $P_{In} = 1.6 \times 10^{-7}$ torr สำหรับค่า P_{P_2} ได้แก่ 8×10^{-7} , 1.6×10^{-6} , 3.2×10^{-6} , 4.8×10^{-6} torr ในกรณีนี้ค่าอัตราส่วน P_{P_2} ต่อ P_{In} มีค่า 5, 10, 20, 30 ตามลำดับ ต่อมาทำการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo Block จาก 250°C ในอัตราการเพิ่ม 10°C/นาทียังค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 450°C จากนั้นทิ้งระยะเวลาประมาณ 10-20 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิมียุคคงที่ จากนั้นทำการเริ่มต้นปลูก InP โดยการเปิด Shutter ของแหล่งจ่าย In โดยค่าความดันไอ In ที่กำหนดนี้มีค่าอัตราการปลูกผลึก InP $0.2 \mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ สำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก 5 ชั่วโมง

สำหรับตัวอย่างในการทดลองนี้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวอย่างที่สร้างในการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและ Shutter ในการทดลองนี้

3.5 การศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si

ในการทดลองนี้เริ่มต้นเช่นเดียวกันกับการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก หลังจากที่ผ่านมาการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs แล้ว รอให้บรรยากาศภายในห้องปลูกผลึกมีค่าลดลง เพื่อให้ As_4 อยู่มีค่าความดันลดลงจนกระทั่งต่ำกว่า 10^{-9} torr จากค่า $4\text{--}6 \times 10^{-8}$ torr จากนั้นทำการปรับค่าตั้งอุณหภูมิของแหล่งจ่าย In และ P ให้ได้ค่าความดันตามที่ต้องการคือ $P_{\text{In}} = 4 \times 10^{-7}$ torr สำหรับค่า P

P_2 ได้แก่ 8×10^{-6} torr ในกรณีนี้ค่าอัตราส่วน P_{P_2} ต่อ P_{In} มีค่า 20 และอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si มีค่า 860, 900, และ 940 ตามลำดับ ต่อมาทำการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo Block จาก 250°C ในอัตราการเพิ่ม $10^\circ\text{C}/\text{นาท}$ ไปยังค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 500°C จากนั้นทิ้งระยะเวลาประมาณ 10-20 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิกคงที่ จากนั้นทำการเริ่มต้นปลูก InP โดยการเปิด Shutter ของแหล่งจ่าย In โดยค่าความดันไอ In ที่กำหนดนี้มีค่าอัตราการปลูกผลึก InP $0.5 \mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ สำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก 4 ชั่วโมง

3.6 การวิเคราะห์ผล

ตัวอย่างที่ได้จากการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี Van der Pauw โดยตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นขนาด $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ทำการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 มม. ที่มุมแต่ละด้าน โดยระยะห่างจากด้านแต่ละด้านประมาณ 0.5 มม. ด้วยโลหะ Au-Ge (Ge 12% โดยน้ำหนัก) /Au โดยมีค่าความหนาอย่างละ $1000 \text{ \AA}$ ตามลำดับ ซึ่งฉาบด้วยการระเหยไอในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) จากนั้นทำการอบแอนนัลที่อุณหภูมิ 420°C เป็นเวลา 30 วินาที [37] เพื่อให้ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) สำหรับคุณภาพผิวหน้าผลึก (Surface Morphology) ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ สดท้ายเป็นการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 ซึ่งในการทดลองได้ทำการสุ่มตัวอย่างเพียงบางตัวอย่างเพื่อทำการวัดคุณสมบัติทางแสงเท่านั้น โดยผลที่ได้นี้แสดงไว้ในบทที่ 4

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

สำหรับในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้ดำเนินการ ได้แก่ผลจากการศึกษาคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซ์ InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs และ (411)A GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลที่ใช้ GaP ที่อยู่ในรูปของโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) เป็นตัวจ่ายฟอสฟอรัสและผลการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขตัวแปรในการปลูกผลึก ได้แก่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกและค่าอัตราส่วน Beam Equivalent Pressure (BEP) ของ P_2/In ที่มีต่อคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซ์ InP ที่ปลูกได้

4.1 การตรวจสอบค่าความหนาของชั้นอพิแทกซ์ InP ที่ปลูกได้

ชั้นผลึกอพิแทกซ์ InP ที่ปลูกได้ในการทดลองนี้ เมื่อทำการวัดค่าความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนกวาด (Scanning Electron Microscope) มีค่าประมาณ $1.2\ \mu m$ ดังในรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากค่า BEP ของ In ที่ใช้ในการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าที่ได้จากคำนวณดังแสดงในหัวข้อนี้มีค่า $1.141\ \mu m$ เป็นค่าความผิดพลาดประมาณ $+4.9\%$ โดยความผิดพลาดนี้เกิดจากค่าที่ได้จากภาคแสดงผลของ Ionization Gauge Meter ที่เป็นตัวเลขเพียง 2 หลักตัวเลข (Digit) เท่านั้น จากค่าที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 1.6×10^{-7} torr ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจากการอ่านสูงสุด $\pm 0.1 \times 10^{-7}$ torr หรือประมาณ $\pm 3.1\%$ เนื่องจากค่าความไว (Sensitivity) ของ Ionization Gauge ที่เสื่อมสภาพไปตามอายุการใช้งาน ซึ่งค่า BEP ที่วัดได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าจริงเสมอ [23]

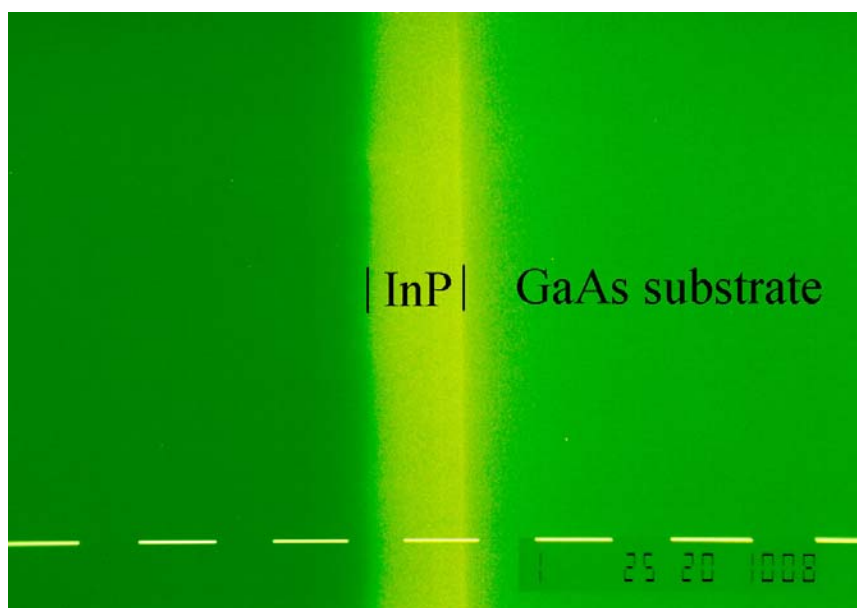
สำหรับการคำนวณค่าความหนาของ InP ในการทดลองนี้สามารถคำนวณได้ดังนี้

จากค่า BEP สำหรับ Ga ที่ใช้ในการปลูกผลึก GaAs มีค่า 5.4×10^{-7} torr ในอัตราการปลูกผลึก $1\ \mu m/\text{ชั่วโมง}$ ที่ได้จากผู้ผลิตเครื่อง MBE [31] ดังนั้นจากสมการ (2.2) เราสามารถคำนวณกลับ เพื่อหาจำนวนอะตอมที่พ่นลงผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ซึ่งเราคำนวณจากสมการจำนวน Monolayer ที่ปลูกได้ตามสมการ

$$1\ \text{Monolayer}_{GaAs} = \frac{a_{GaAs}}{2} = \frac{5.6533}{2} = 2.82665\ \text{\AA}$$
$$R_{GaAs} = \frac{10000}{3600 \times 2.82665} = 0.9827\ \text{Monolayer/วินาที}$$

ซึ่งค่าอัตราการปลูกข้างต้นสามารถเปรียบได้กับจำนวนอะตอมที่พ่นลงผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน

$$J_{GaAs} = \frac{2}{(5.6533 \times 10^{-8})^2} \times 0.9827 = 6.1496 \times 10^{14}\ \text{อะตอม/ตร. ซม./วินาที}$$



รูปที่ 4.1 ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่างชั้นผลึกอีพิแทกซี InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs
เส้นขาวในภาพแทนค่าความยาว 1 μm

เนื่องจากค่า BEP ของ In ที่ใช้ในการทดลองนี้มีเท่ากับ 1.6×10^{-7} torr เพื่อเปรียบค่า BEP ให้มีค่าเท่ากับค่าเปรียบเท่าของ Ga ได้ตามสมการ

$$\text{BEP ของ Ga} = \text{BEP ของ In} \times \frac{\text{Gauge Sensitivity of Ga}}{\text{Gauge Sensitivity of In}}$$

โดยค่า Gauge Sensitivity ของ Ga และ In มีค่า 1.68 และ 2.44 ตามลำดับ [31] ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่า BEP สมมูลของ In เทียบกับของ Ga ได้ตามสมการ

$$\begin{aligned} \text{BEP ของ In ที่เปรียบได้กับของ Ga} &= 1.6 \times 10^{-7} \times \frac{1.68}{2.44} \text{ torr} \\ &= 1.1016 \times 10^{-7} \text{ torr} \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดค่าจำนวนอะตอมของ In ได้ตามสมการ

$$J_{\text{In}} = \frac{1.1016 \times 10^{-7}}{5.4 \times 10^{-7}} \times 6.1496 \times 10^{14} = 1.2545 \times 10^{14} \text{ อะตอม/ตร. ซม./วินาที}$$

สำหรับค่าความหนาแน่นของอะตอมของ InP ที่ผิวมีค่า

$$d_{\text{InP 1 Monolayer}} = \frac{2}{(5.8694 \times 10^{-8})^2} = 5.806 \times 10^{14} \text{ อะตอม/ตร. ซม./วินาที}$$

ดังนั้นอัตราการปลูกผลึกที่เกิดขึ้นของ InP ในกรณีนี้มีค่าตามสมการ

$$R_{\text{InP}} = \frac{J_{\text{InP}}}{d_{\text{InP 1 Monolayer}}} = \frac{1.2545 \times 10^{14}}{5.806 \times 10^{14}} = 0.2161 \text{ Monolayer/วินาที}$$

เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราการปลูกผลึกดังกล่าวให้เป็นค่าความหนาได้ตามสมการ

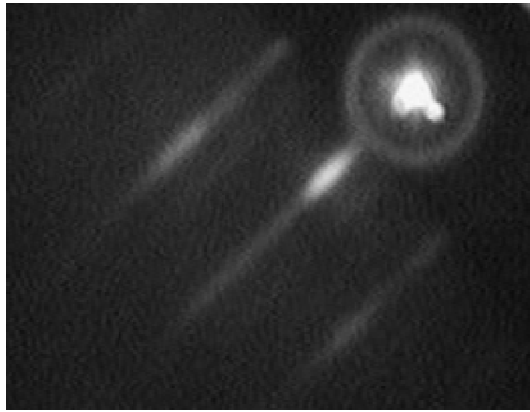
$$\begin{aligned} R_{\text{InP}} &= 0.2161 \times \frac{a_{\text{InP}}}{2} = 0.2161 \times \frac{5.8694}{2} = 0.6341 \text{ Å/วินาที} \\ &= 0.6341 \times 3600 = 0.2283 \text{ μm/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นค่าความหนาชั้นผลึกอพิแทกซ์ InP ที่ปลูกในเวลา 5 ชั่วโมงมีค่าความหนา

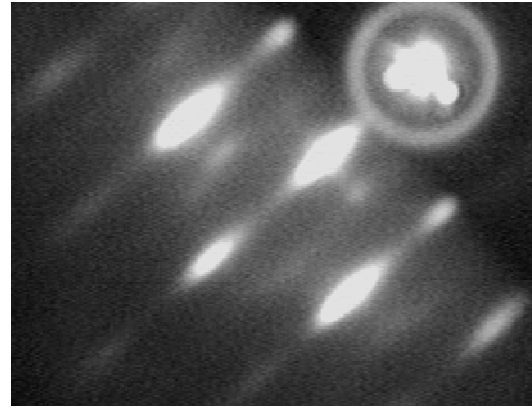
$$D_{\text{InP}} = 0.2283 \times 5 = 1.141 \text{ μm}$$

4.2 RHEED patterns

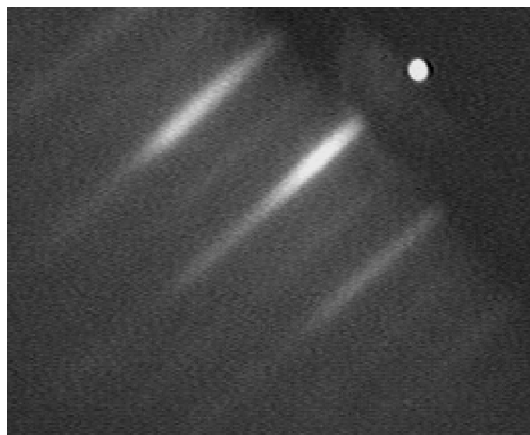
ตัวอย่างรูปแบบ RHEED ที่ได้จากผิวหน้า (Surface) ของผลึกฐานที่อุณหภูมิ 450°C หลังจากผ่านการปลูก Buffer layer ที่เป็น GaAs มีลักษณะรูปแบบ RHEED เป็นแบบ c(4×4) ภายใต้อาณัติของ P₂ โดยการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED ที่ได้จากผิวหน้าขณะปลูกผลึก InP ช่วงเวลาต่างๆ ในระหว่างการปลูกและสิ้นสุดการปลูกผลึก ซึ่งมีลักษณะตามในรูปที่ 4.2 โดยรูปที่ 4.2 (ข) เป็นภาพรูปแบบ RHEED ที่เกิดขึ้นที่เวลา 30 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวหน้ามีลักษณะเป็นจุด (Spotty) อันเกิดขึ้นจากการ Nucleation ของผลึก InP มีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ (3 dimension) ซึ่งลักษณะการเกิดผลึกในลักษณะนี้เป็นการเกิดผลึกแบบ Stanski-Kranstanov [32] โดยการเกิดผลึกนี้มีลักษณะเป็นก้อน (Cluster) เรียงจนเต็มเป็นชั้น (Layer) แต่มีลักษณะไม่เรียบอันเป็นผลที่เกิดจากผิวหน้ามีผลึกที่มีลักษณะเป็นก้อนอยู่ เนื่องจากผลึกที่ปลูก (InP) และแผ่นผลึกฐาน (GaAs) มีค่าคงตัวผลึก (Lattice Constant) แตกต่างกัน ทำให้เกิดความเครียด (Strained) ขึ้นในผลึกใหม่ที่ปลูกขึ้นบริเวณรอยต่อผิว (Interface) แต่หลังจากการปลูกผลึกเป็นเวลา 5 นาที ลักษณะรูปแบบของ RHEED เป็นแบบ c(2×4) ตามรูปที่ 4.2 (ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวหน้ามีลักษณะเป็นผิวเรียบอีกครั้ง โดยค่าความหนาของผลึก InP ที่ปลูกได้ขณะนั้นมีค่าความหนาประมาณ 190 Å ซึ่งค่าความหนานี้เป็นค่าความหนาวิกฤติ (Critical Thickness) และค่าที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองของ R.Dropopad et. al. [37] ที่ได้ทำการทดลองไว้ ซึ่งได้ค่าความหนาวิกฤติประมาณ 64 Monolayer หรือ 188 Å เนื่องจากการเกิดผลึกหลังจากนี้มีลักษณะเกิดเป็นแบบ 2 มิติ (2 dimension) ที่มีชื่อเรียกว่า Frank-van der Merwe [38] ผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะของการเรียงชั้นผลึกเป็นชั้นๆ (Layer to layer growth) ลักษณะผิวหน้ามีความเรียบ (Smooth) ในกรณีนี้ค่าความหนาของผลึก InP ที่ปลูกขึ้นมีค่าความหนาเกินกว่าค่าความหนาวิกฤติ



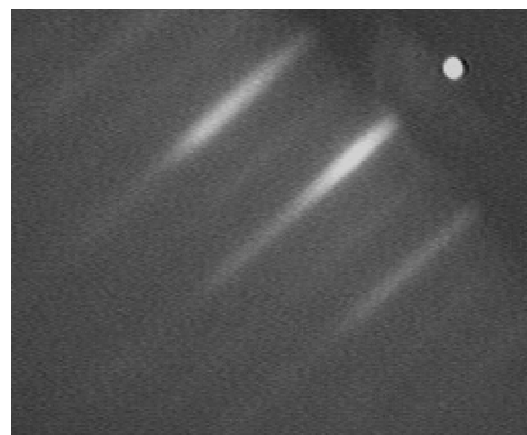
(ก) 0 วินาที



(ข) 30 วินาที



(ค) 5 นาที



(ง) หลังสิ้นสุดการปลูก

รูปที่ 4.2 รูปแบบ RHEED ที่เกิดขึ้นในขณะปลูกผลึก InP บนแผ่นผลึกฐาน GaAs ในขณะปลูกผลึก อุณหภูมิของการปลูกผลึก 450°C และค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 20

4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก InP

4.3.1 Surface Morphology

สำหรับผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้ในกรณีนี้ได้แสดงไว้ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นอิทธิพลของ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการการปลูกผลึก (Growth Temperature) ที่มีต่อผิวหน้าผลึก ในกรณีการปลูก ผลึกที่อุณหภูมิ 300°C โดยค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 10 ผิวหน้าของตัวอย่างนี้มีลักษณะมัน เงาคล้ายกระจก แต่เมื่อสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์พบว่า มีจุดบกพร่อง (Defect) ที่มีขนาดเล็กจำนวนมากที่ เกิดจากผลของการเกิดผลึกที่ไม่เป็นสัดส่วนหรือ Nonstoimetric Growth [39] ดังในรูปที่ 4.3 (ก) เนื่องจาก ในกรณีนี้เป็นการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้การ Incorporation ของฟอสฟอรัสมีนี้อาจเกินกว่าปกติ (Incorporation of excess group V element) ส่วนในกรณีการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 400°C มีลักษณะคล้ายกับ