

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

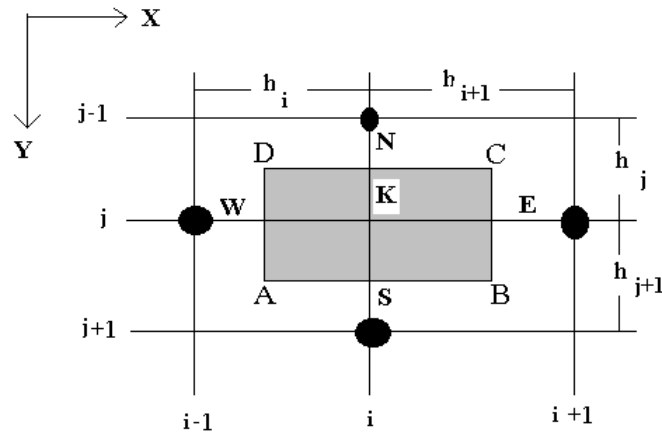
พิจารณาสมการความหนาแน่นกระแสที่ผ่านการนอร์มาไลซ์และการแปลงสมการด้วยตัวแปรของ Slotboom ดังที่แสดงในสมการ (3.15) และ (3.16) ในบทที่ 3 ดังนี้

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

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

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) เป็นสมการความหนาแน่นกระแสของโวลต์ไพลจากจุด j ไป จุด $j+1$ ที่จะนำไปใช้งาน
 ในทำนองเดียวกัน สมการความหนาแน่นกระแสของโวลต์ไพลจากจุด $j+1$ ไป จุด j จะได้

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

และสามารถเขียนสมการในรูปทั่วไปของสมการความหนาแน่นกระแสของโวลต์ไพลจากจุด 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 สมการรูปทั่วไปของสมการความหนาแน่นกระแสของโวลต์ไพลจากจุด 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
การดีสคริปต์ชี้สมการความต่อเนื่อง

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

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

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

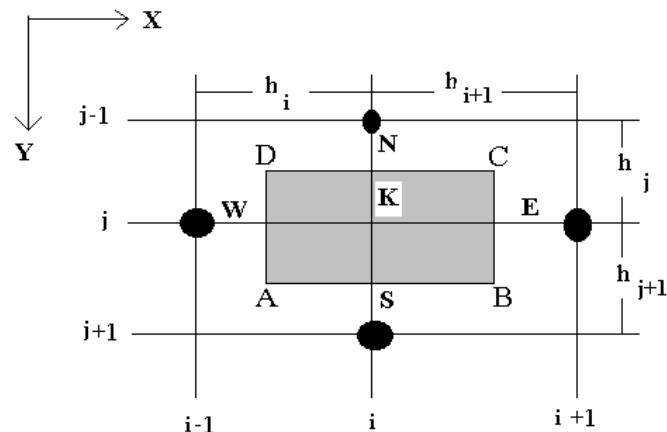
โดยที่ R คือ Recombination rate และ Generation rate

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

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

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

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

จัดรูปสมการ(ค-15) ใหม่จะได้เป็น

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

จัดรูปสมการ(ค-16) ใหม่จะได้เป็น

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

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

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

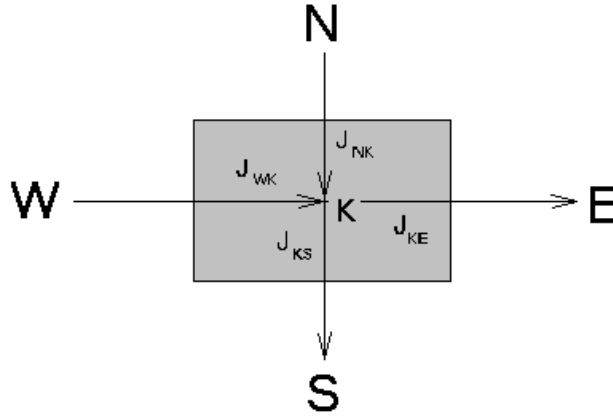
$$\begin{aligned}
 & (a_S + a_N + a_E + a_W)p_K \\
 & - a_S \exp(\psi_S - \psi_K)p_S - a_N \exp(\psi_N - \psi_K)p_N \\
 & - ra_E \exp(\psi_E - \psi_K)p_E - ra_W \exp(\psi_W - \psi_K)p_W \\
 & = -R_K \left(\frac{h_l + h_{l-1}}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{ค-18}$$

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

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

จากสมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนที่ขึ้นกับเวลา ในสมการ (2) ที่ผ่านการนอร์มาไลซ์แล้วคือ

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

ในทำนองเดียวกัน สมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนที่ขึ้นต่อเวลาสามารถเขียนได้

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

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



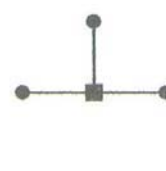
Type 2



Type 23



Type 3



Type 34



Type 4



Type 41



Type 341



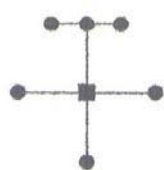
Type 342



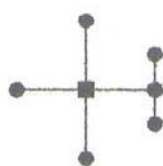
Type 343



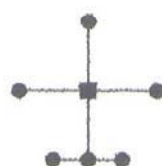
Type 344



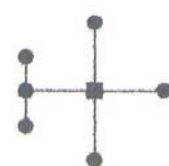
Type -11



Type -12



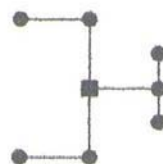
Type -13



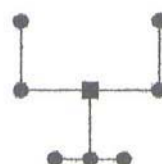
Type -14



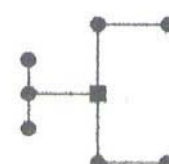
Type -21



Type -22



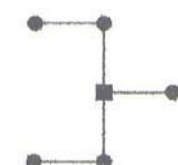
Type -23



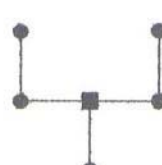
Type -24



Type -31



Type -32



Type -33



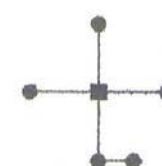
Type -34



Type -41



Type -42



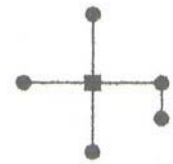
Type -43



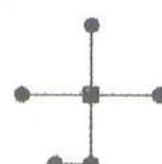
Type -44



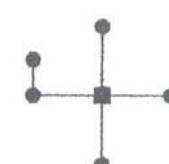
Type -51



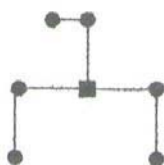
Type -52



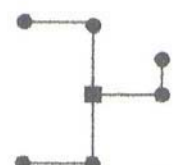
Type -53



Type -54



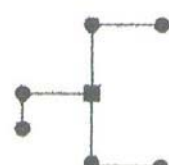
Type -61



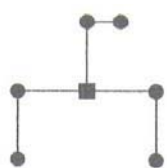
Type -62



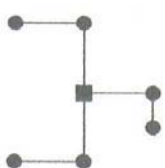
Type -63



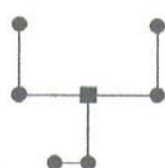
Type -64



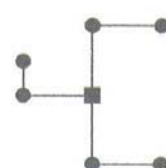
Type -71



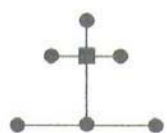
Type -72



Type -73



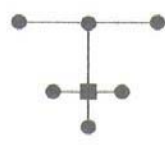
Type -74



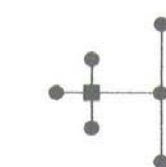
Type -81



Type -82



Type -83



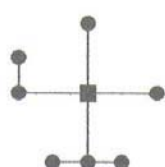
Type -84



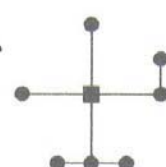
Type -101



Type -102



Type -103



Type -104



Type -801



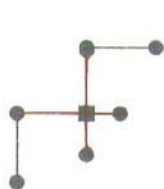
Type -802



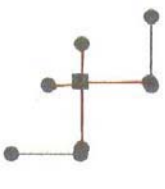
Type -803



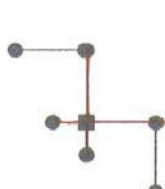
Type -804



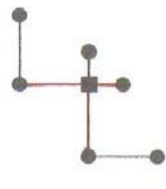
Type -901



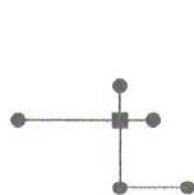
Type -902



Type -903



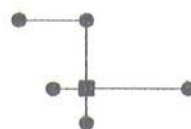
Type -904



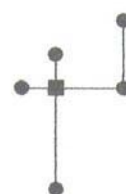
type - 711



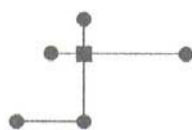
Type -712



Type -713



Type -714



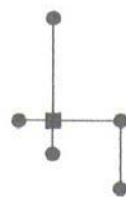
Type -721



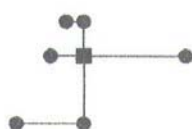
Type -722



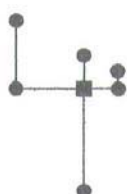
Type -723



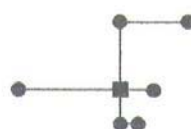
Type -724



Type -741



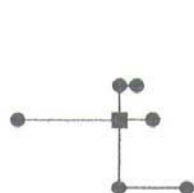
Type -742



Type -743



Type -744



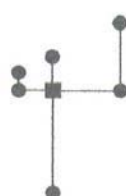
Type -751



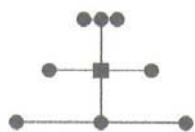
Type -752



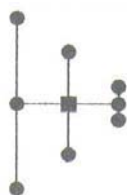
Type -753



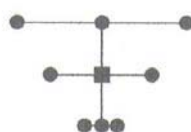
Type -754



Type -881



Type -882



Type -883



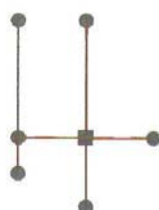
Type -884



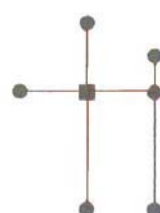
Type -8801



Type -8802



Type -8803



Type -8804



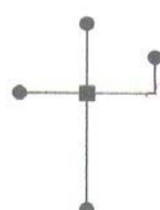
Type -911



Type -912



Type -913



Type -914



Type -921



Type -922



Type -923



Type -924

ประวัติผู้เขียน

นายเชรชฐา รัตนพันธ์ เกิดเมื่อ 11 มิถุนายน 2519

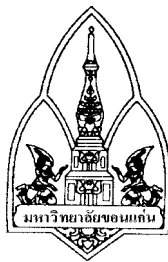
สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนบ้านโคกตาล ต.โคกตาล อ.กุฉินท จ.ศรีสะเกษ ในปี 2532

สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนปรีอใหญ่วิทยาลักษณ์ ต.ปรีอใหญ่ อ.ขุขันธ์ 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) ในโครงการจำลองแบบเซลล์สุริยะแบบกลับแสงในตัวใน 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

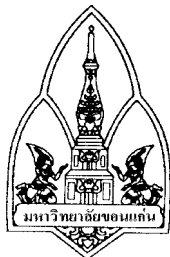
**STUDY AND MODELING OF GENERATION RATE(G) AND
RECOMBINATION RATE(R) FOR Si SOLAR CELLS**

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 สำหรับกระบวนการรวมตัวแบบออเจอร์ 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 “แบบจำลองการทำงานเซลล์สุริยะแบบคลัสเตอร์ใน 2 มิติ” ซึ่งได้รับความสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(ส.ก.ว.)

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

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 แบบจำลองอัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสงและอัตราการรวมตัวของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์	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 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวบน	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 ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิต่างๆ	84
รูปที่ 6.24 แสดงเวลาอายุของพาหะข้างน้อยในกระบวนการ SRH ที่ระดับพลังงานของ สารเจือปนต่างๆ	85
รูปที่ 6.25 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t=0.56$ eV	86
รูปที่ 6.26 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t=0.84$ eV	87
รูปที่ 6.27 แสดงผลของการโด๊ปพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t=0.56$ eV	88
รูปที่ 6.28 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์	89
รูปที่ 6.29 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์	90
รูปที่ 6.30 แสดงผลของความหนาแน่นของพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะใน กระบวนการออเจอร์	91
รูปที่ 6.31 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะรวม ที่ $E_t=0.56$ eV	92
รูปที่ 6.32 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะรวม 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 นับวันแหล่งพลังงานดังกล่าวเริ่มจะลดน้อยลงไปทุกวันนี้จนไม่เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นทุกขณะ 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 จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านการลดต้นทุนการผลิตจริงและลดความเสี่ยงต่อการผลิตอีกด้วย สำหรับแบบจำลองที่ใช้จะเป็นแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพีเอ็นสลับกันหลายๆชั้น เรียกว่า “แบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบคลับแซนวิช” (Club Sandwich Solar Cell) [1]

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีสมการที่อธิบายพฤติกรรมของพาหะในสารกึ่งตัวนำอยู่ 3 ชุด คือ

1. Poisson's equation

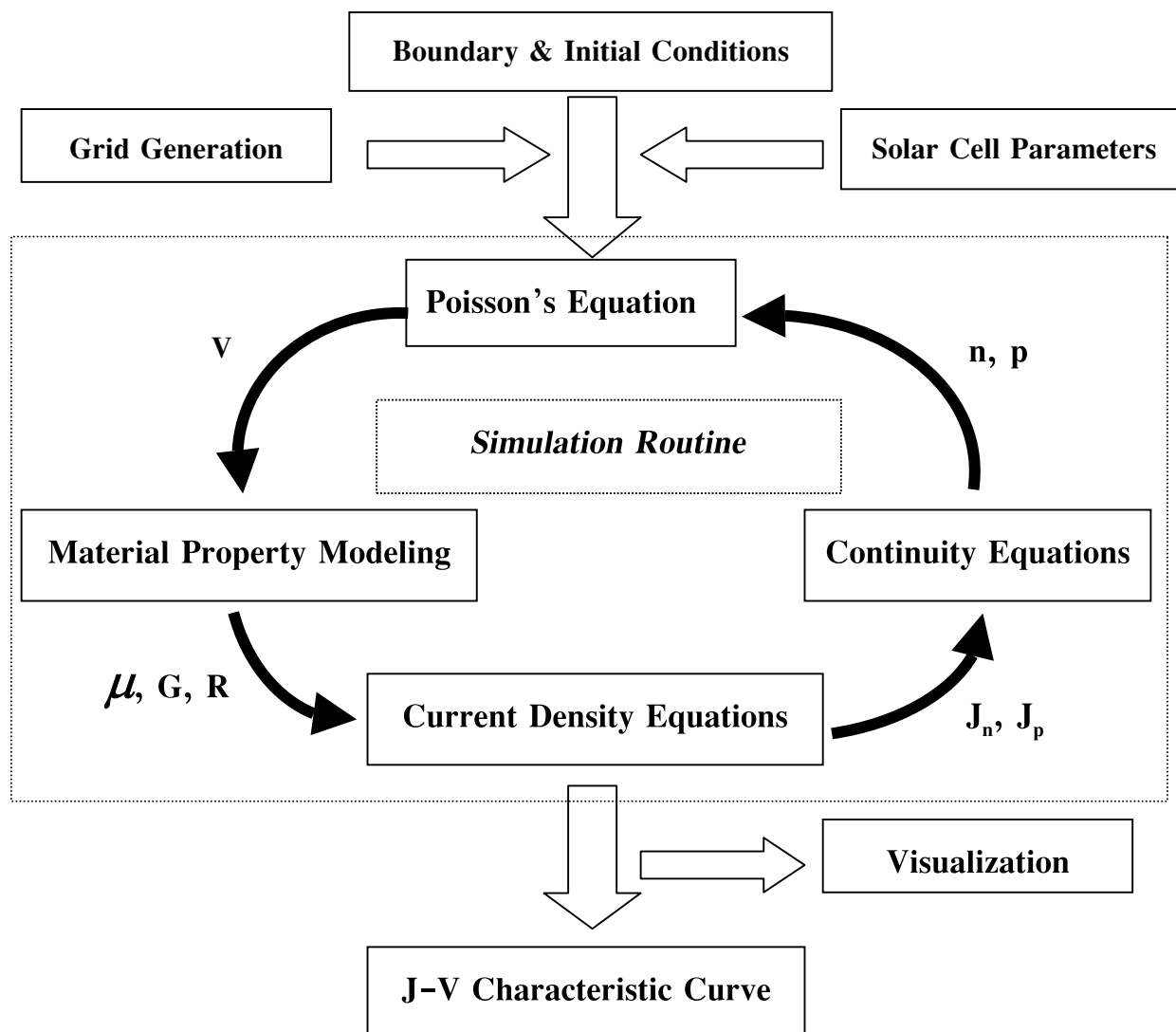
$$\nabla^2 \psi = -\frac{q}{\epsilon} (p - n + n_0 - p_0)$$

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 จนเข้าสู่สภาวะคงที่ (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 ตั้งแต่บริเวณผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ไปถึงบริเวณที่อยู่ลึกลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์ 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)จากผิวบนลงไปใต้อันเนื่อง

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]

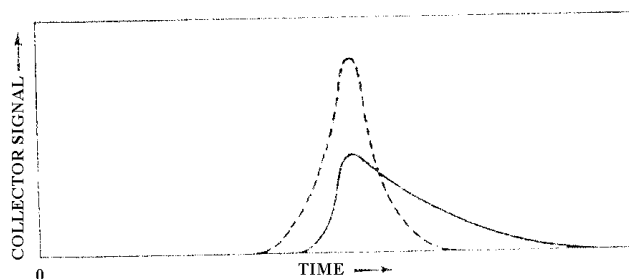
Jerry G. Fossum ได้คำนวณประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมพาหะ(collection efficiency)เนื่องจากค่าอัตราการเกิดของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนา L พบว่า สำหรับซิลิกอนที่ AM0 อุณหภูมิ 300 °K เมื่อเซลล์มีความหนา 300 μm ประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมพาหะจะมากกว่า 98% ถ้าไม่คิดอัตราการสะท้อนกลับที่ผิวและอัตราการรวมตัวของพาหะ

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]

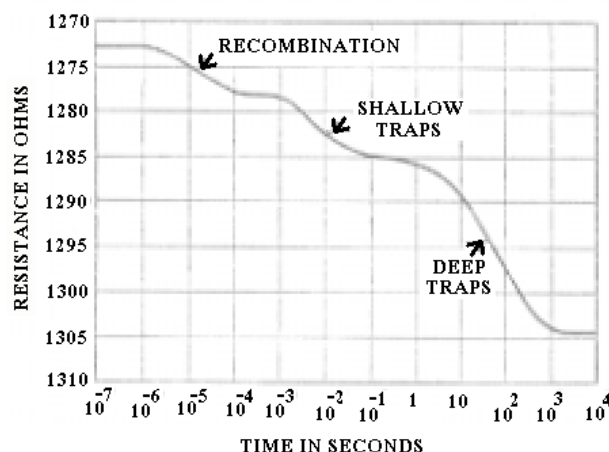


รูปที่ 2.1 แสดงสัญญาณของพาหะข้างน้อยที่วัดได้ในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี

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

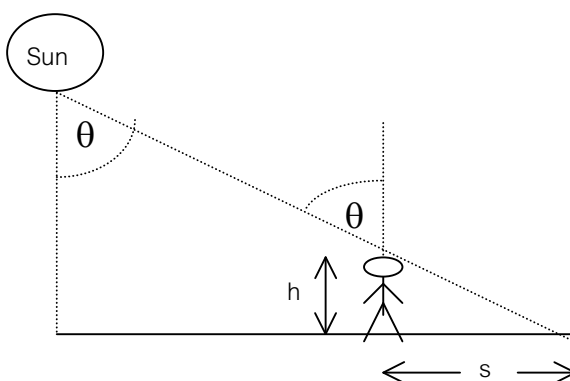
h เป็นความสูงของผู้สังเกต

θ เป็นมุมระหว่างแสงในแนวตั้งและแสงที่ส่องมายังผู้สังเกต

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

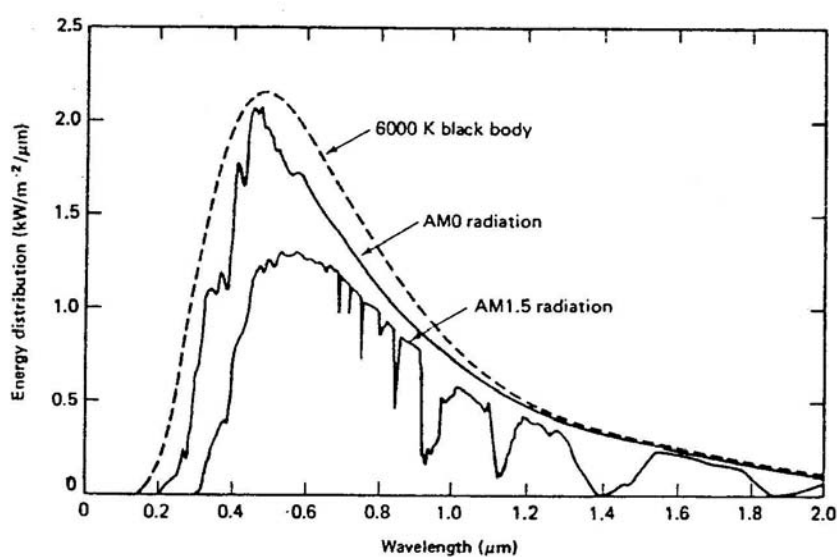
แนวตั้ง 48° จะได้ค่า $AM = \frac{1}{\cos 48^\circ} = 1.5$ และเมื่อแสงทำมุมกับผู้สังเกตในแนวตั้ง 60° จะได้ค่า AM

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



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพตัวแปรการคำนวณค่า Air Mass ในบรรยากาศของโลก

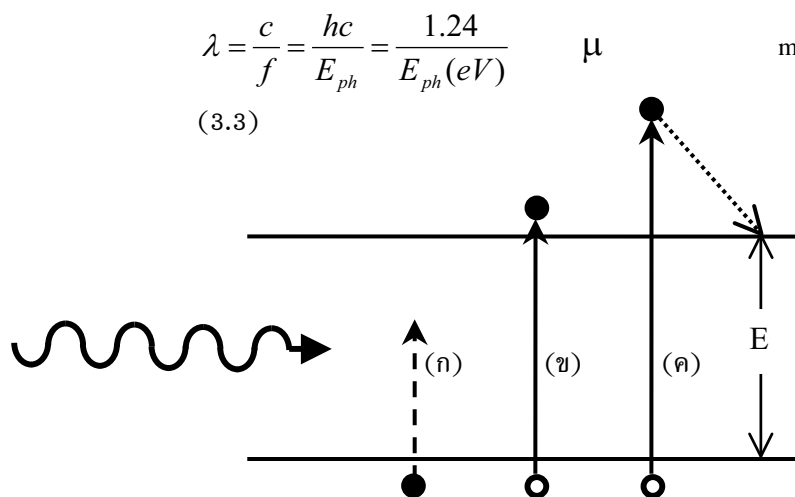
พลังงานในการแผ่รังสี (หน่วย W/m^2) จากดวงอาทิตย์ของแต่ละ AM หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงไว้ดังรูปที่ 3.2 โดยที่ AM0, AM1, AM1.5, และ AM2 จะมีพลังงานในการแผ่รังสีเท่ากับ 1353, 925, 844, และ $691 W/m^2$ ตามลำดับ [16]



รูปที่ 3.2 แสดงการกระจายของพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ AM ต่าง ๆ

3.2 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(Light absorption coefficient)

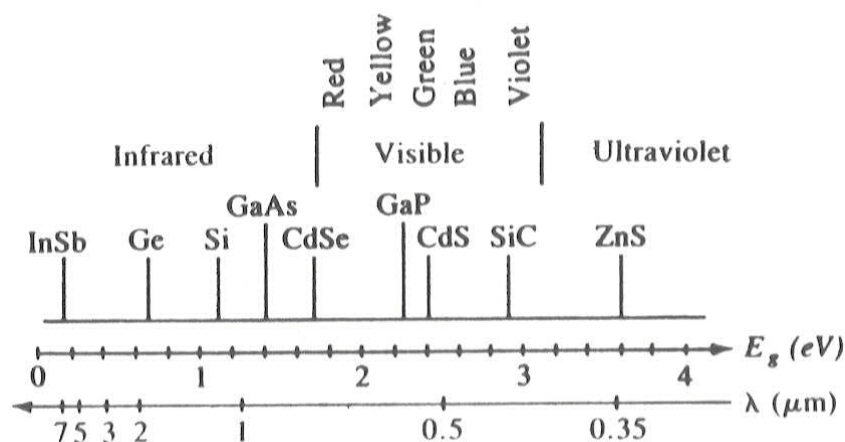
เมื่อโฟตอนที่มีพลังงาน E_{ph} ในหน่วย eV ซึ่งมีความยาวคลื่น(λ) ตามสมการ(3.3)มาตกกระทบสารกึ่งตัวนำ สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะไม่ถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 3.3(ก)



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

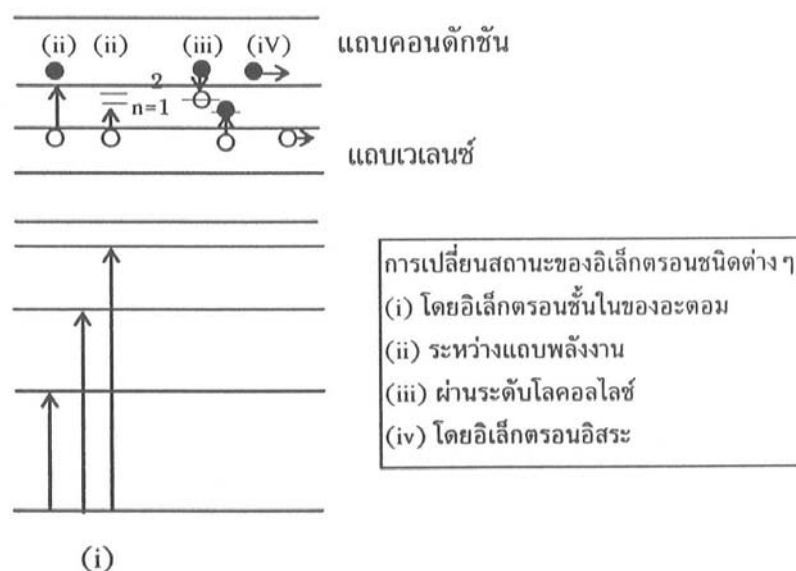
สำหรับซิลิกอนซึ่งมีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.12 eV เมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ 1.12 eV มาตกกระทบ หรือพิจารณาตามสมการ(3.3)แล้วจะได้ค่าความยาวคลื่นที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ $1.109 \mu m$ จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าซิลิกอนจะดูดกลืนสเปกตรัมแสง(optical spectrum)ในช่วงของแสงอินฟราเรด(infrared),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



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำกับสเปกตรัมแสง

สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำคือ แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อผ่านเข้าไปในสารที่มีอนุภาคอิเล็กตรอน หรือไอออน หรือนิวเคลียส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุนั้นที่มีประจุไฟฟ้าและมีโมเมนต์แม่เหล็ก 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

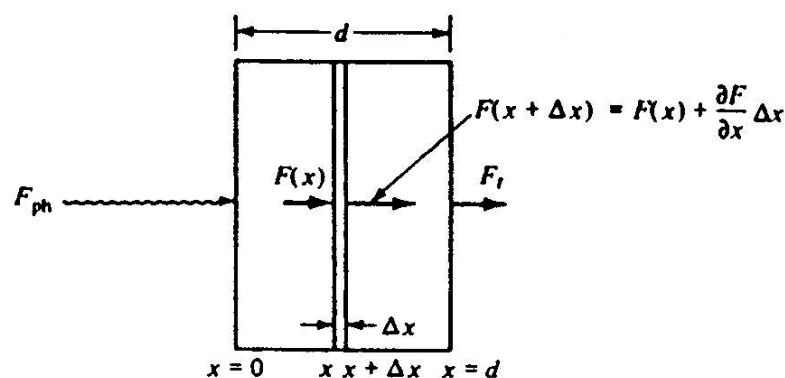


รูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการเปลี่ยนสถานะชนิดต่างๆของอิเล็กตรอนในของแข็ง

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

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

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

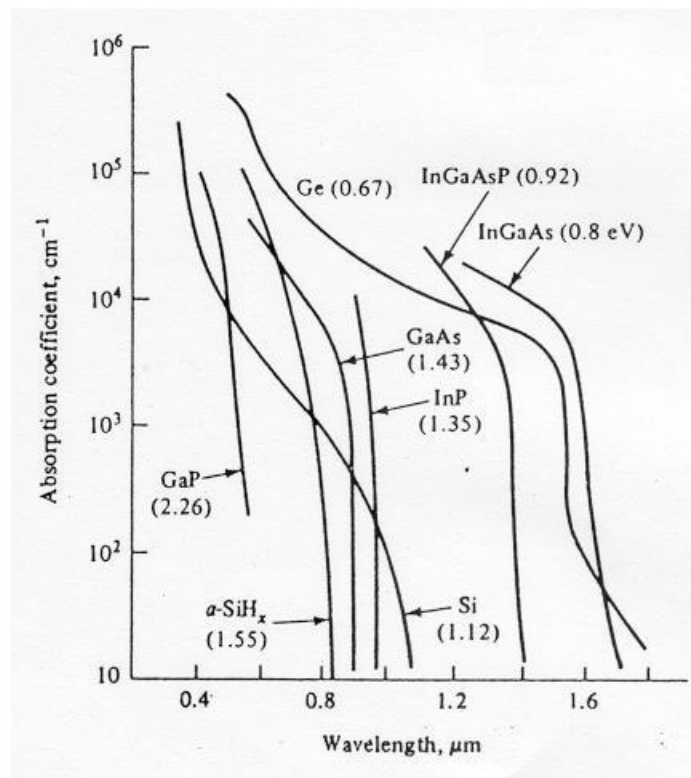
มีเงื่อนไขขอบเขตที่ $x=0$ คือ $F(x)=F_{ph}$ ดังนั้น

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

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 $E_{ph} \geq 1.12 \text{ eV}$

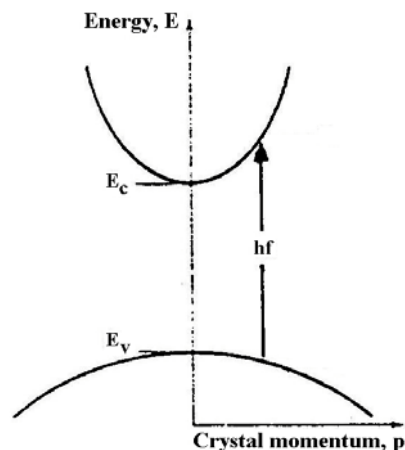


รูปที่ 3.7 แสดงสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

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



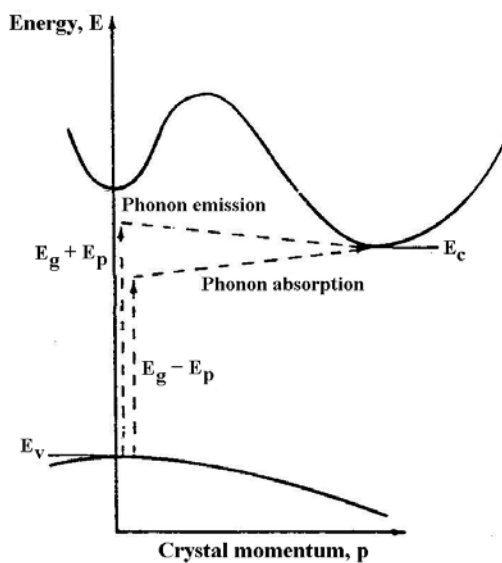
รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพพลังงาน-โมเมนตัมของสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบตรง

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

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

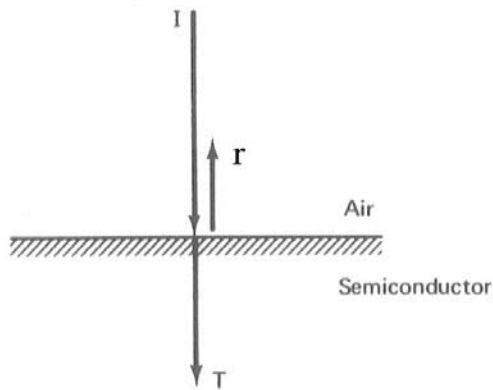
$$\text{กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad k_2 = k_1 \pm k_p \quad (3.9)$$

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

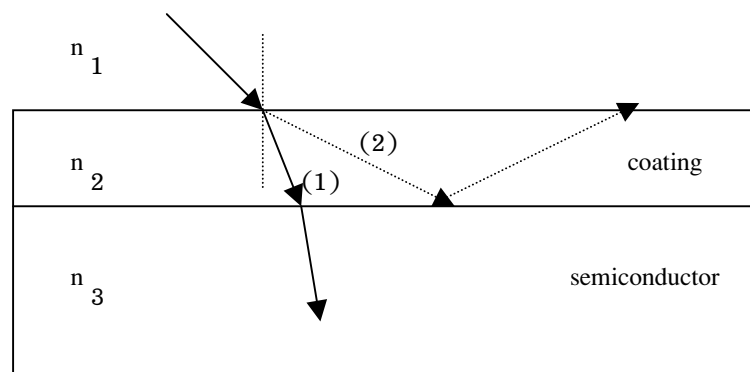
$$r = \frac{(n-1)^2 + (\lambda\alpha/4\pi)^2}{(n+1)^2 + (\lambda\alpha/4\pi)^2} \quad (3.10)$$

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

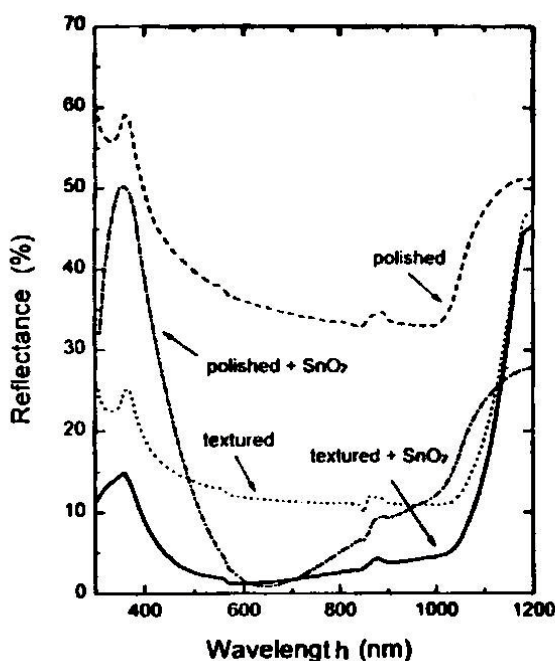
$$n_3 = \sqrt{n_1 n_2} \quad (3.11)$$

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

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

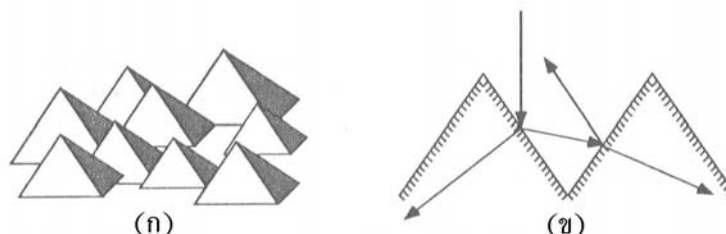
เมื่อตัวกลางที่ 2 มีค่าดัชนีหักเห n_2 มากกว่าตัวกลางที่ 1 ที่มีค่าดัชนีหักเห n_1 แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติ ดังนั้นโอกาสที่แสงจะเดินทางเข้าไปสู่สารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นตัวกลางที่ 3 ที่มีค่าดัชนีหักเห n_3 จึงมีมากขึ้นตามทางเดินแสง(1) นั่นคือปริมาณโฟตอนจะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำมากขึ้น การผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลจึงมีมากขึ้นด้วย 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



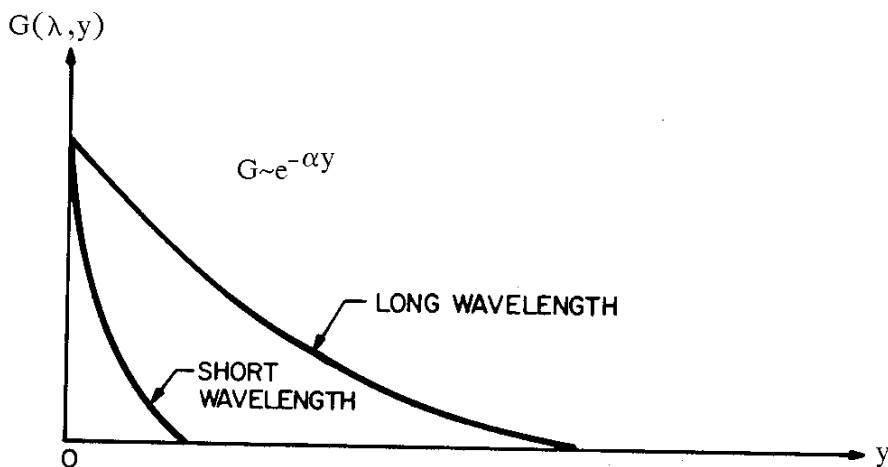
รูปที่ 3.13 แสดงผิวน้ำที่ถูกกัดเป็นรูปปิรามิดและทางเดินแสงที่มากตกกระทบ

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)

การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากการดูดกลืนแสงที่มากตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่า 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

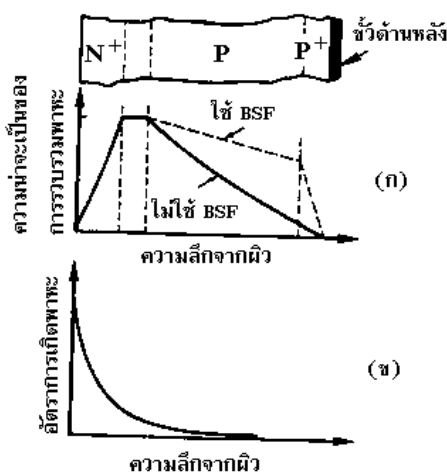
$$n = n_0 + n_e \quad (3.15)$$

และ $p = p_0 + p_e \quad (3.16)$

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

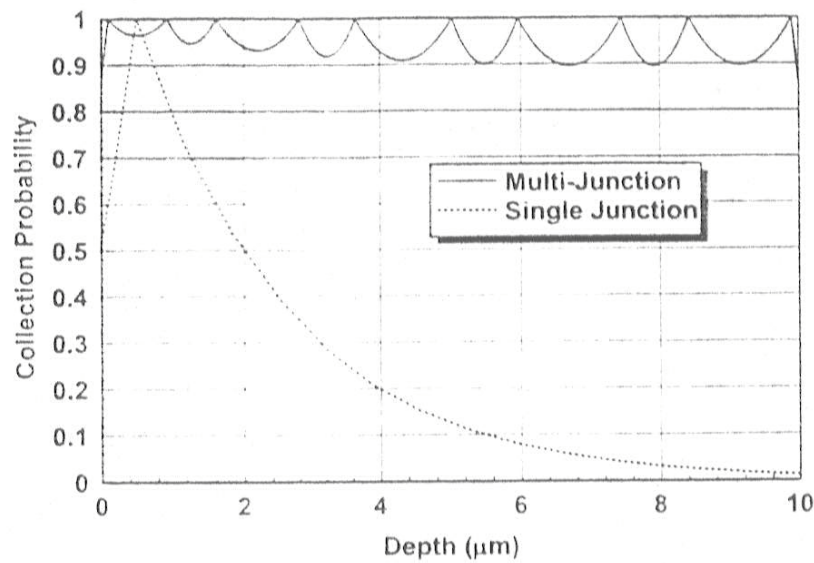
เมื่อไม่มีสิ่งเร้านี้มารบกวนระบบอีก ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจะเป็นไปตามสมการ(3.14)อีกครั้ง

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($pn = n_i^2$) โดยกระบวนการที่จะรักษาสถิตนี้เกิดขึ้นโดยพาหะข้างน้อยส่วนเกิน (excess minority carrier) จะรวมตัวกับพาหะข้างมาก ขณะที่เกิดการรวมตัวกัน จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน เรียกกระบวนการนี้ว่า การรวมตัวกันแบบเปล่งแสง(radiative recombination) หรือปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปพลังงานความร้อนให้แก่ผลึก เรียกกระบวนการนี้ว่า การรวมตัวกันแบบไม่เปล่งแสง(nonradiative recombination) และเรียกอัตราที่อิเล็กตรอนและโฮลมารวมตัวกันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลาว่า อัตราการรวมตัวของพาหะ(Recombination rate)

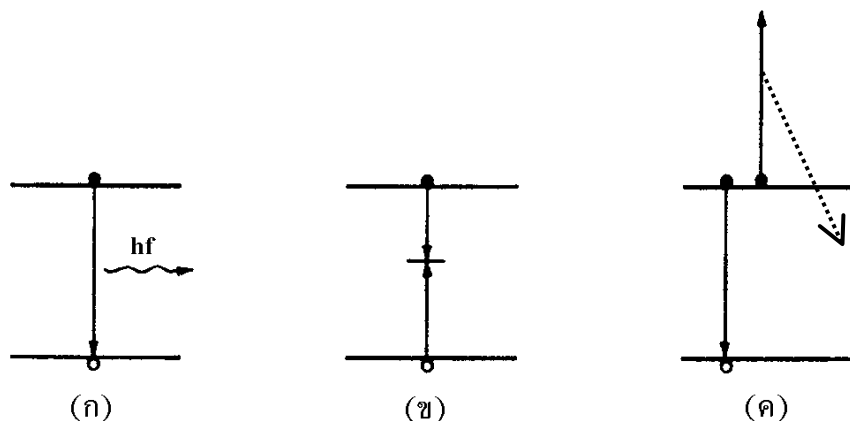
ในบทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

- 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 การรวมตัวกันแบบผ่านแตรี้ป ดังรูปที่ 4.1 (ข)
- 4.1.3 การรวมตัวกันแบบออเจอร์ ดังรูปที่ 4.1 (ค)



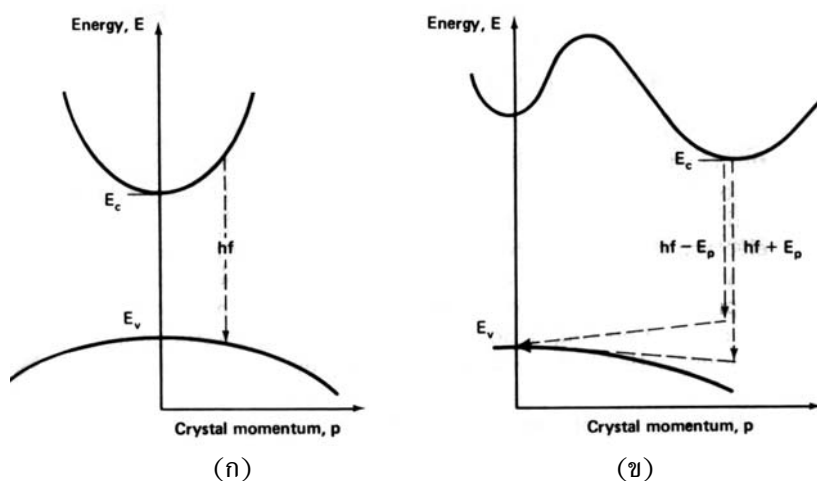
รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล

- ก) แบบเปล่งแสง,
- ข) แบบผ่านแตรี้ป,
- 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 เป็นสัมประสิทธิ์ของการรวมตัวแบบเปล่งแสงในกระบวนการออเจอร์ที่มีแท็ปร่วม (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

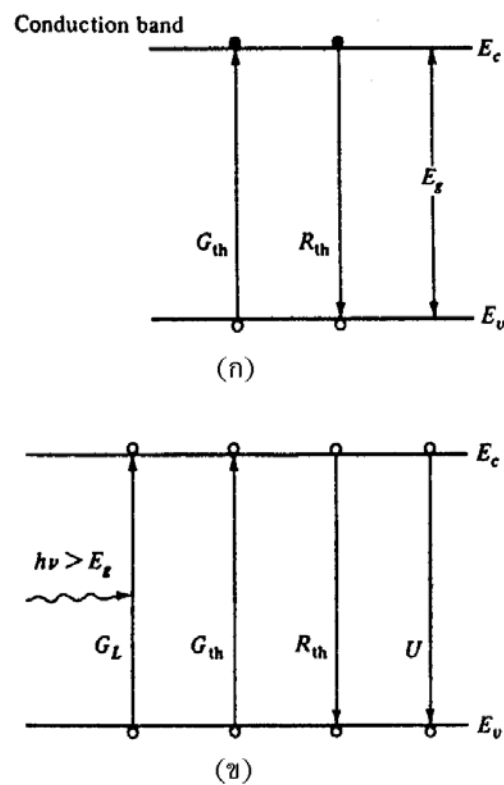
$$R_R = \beta n_n p_n = \beta (n_{n0} + \Delta n)(p_{n0} + \Delta p) \quad (4.12)$$

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

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

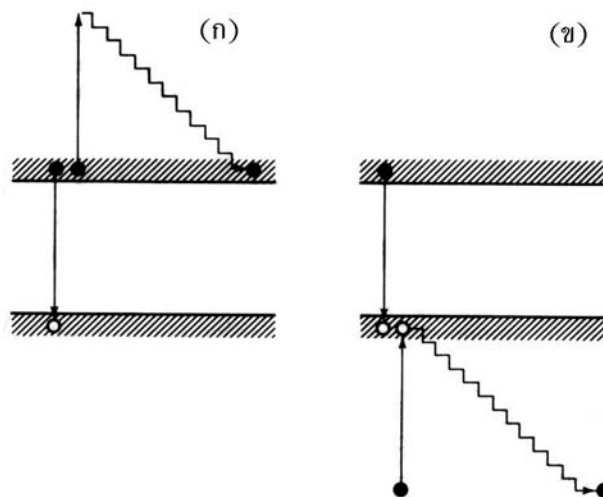
หมายความว่า ที่สภาวะคงตัว อัตราของอิเล็กตรอนที่เข้าสู่แถบคอนดักชันจะเท่ากับอัตราของอิเล็กตรอนที่ออกจากแถบคอนดักชันนั่นเอง

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

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

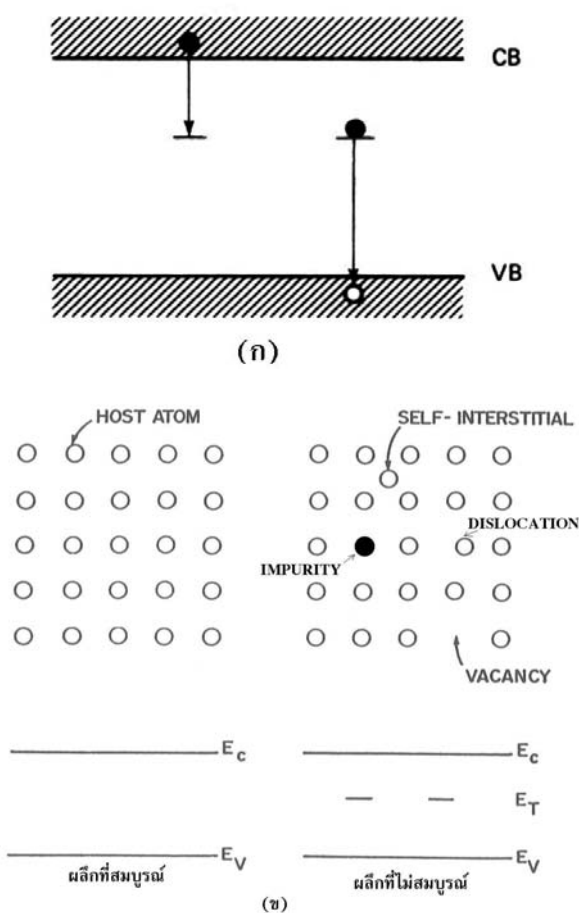
$$\tau_{\text{Auger}} = \frac{1}{C_n (n_0^2 + 2n_0 \Delta p + (\Delta p)^2)} \quad (4.20)$$

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 $c_n = v_{th} \sigma_{cn}$

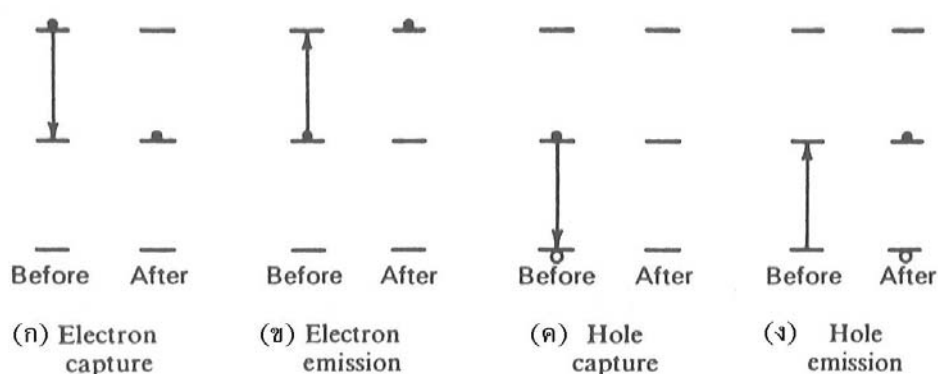
N_t คือ ความหนาแน่นของแตริปทั้งหมดในผลึก(total concentration of trapping centers)

$f(E_t)$ 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)

ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน(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

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

เมื่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนมีค่าเป็น

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

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

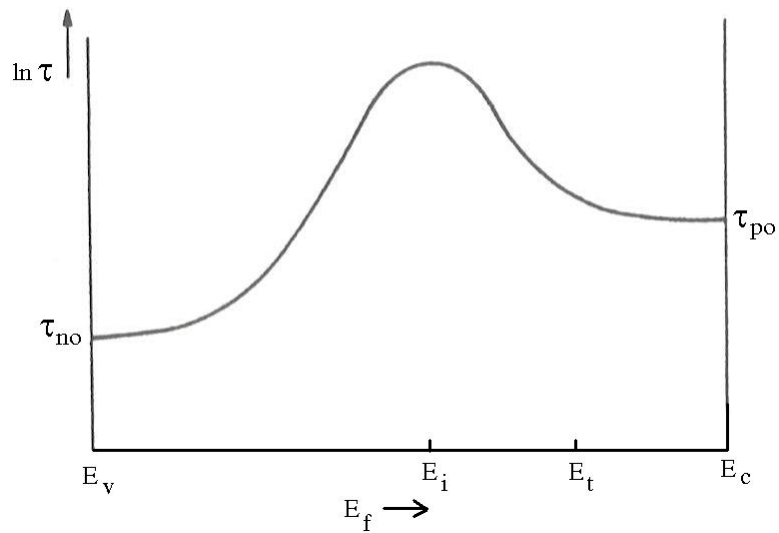
$$\tau = \frac{1}{c_n N_t} = \tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_t} \quad (4.55)$$

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

$$a = \frac{\tau_{p0} + \tau_{n0}}{\tau_{p0}(n_0 + n_1) + \tau_{n0}(p_0 + p_1)}$$

$$b = \frac{1}{n_0 + p_0}$$

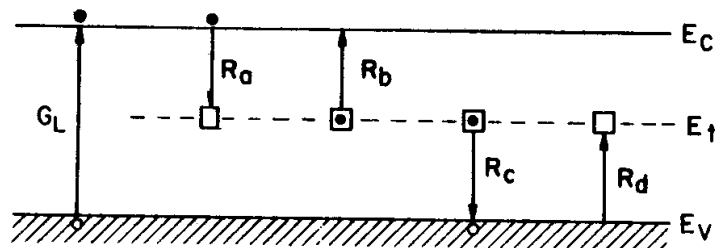
เมื่อพิจารณาถ้า $a > c$ ค่า δp เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า τ เพิ่มขึ้น ถ้า $a < c$ ค่า δp เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า τ ลดลง สำหรับ δp ที่มีค่ามาก ๆ สมการ(4.57) จะกลายเป็น

$$\tau = \tau_0 \left[\frac{\tau_{p0} + \tau_{n0}}{\tau_{p0}(n_0 + n_1) + \tau_{n0}(p_0 + p_1)} \right] (n_0 + p_0) \quad (4.60)$$

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

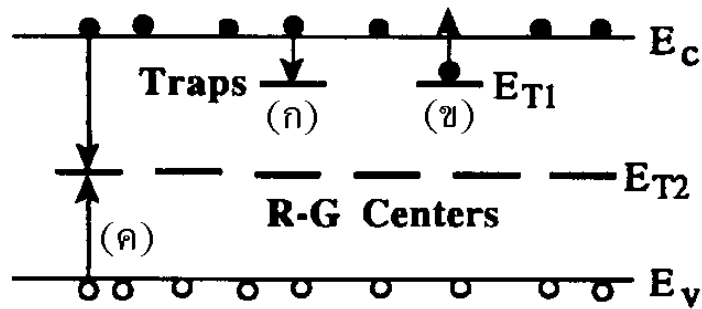
เมื่อพิจารณาผลของระดับพลังงานของสารเจือปน(E_T) และระดับการฉีดพาหะ(carrier injection level) เช่น ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มีการฉีดพาหะต่ำ(low-level injection) จะมีความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกิน(excess minority carrier density(Δn)) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกินข้างมากที่สภาพสมดุล(equilibrium majority carrier density(p_0)) นั่นคือ

$$\Delta n = \Delta p \ll p_0$$

ที่การฉีดพาหะสูง(high-level injection) จะความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกิน(Δn) มีค่ามากเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกินข้างมากที่สภาพสมดุล(p_0) นั่นคือ

$$\Delta n = \Delta p \gg p_0$$

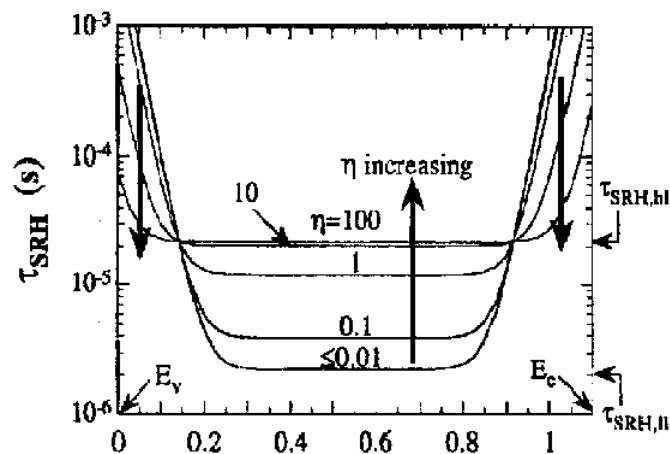
การแตร็ป(trapping)เป็นกระบวนการดักจับ(capture)อิเล็กตรอนไวซ์ชั่วคราวที่ระดับพลังงานของสารเจือปน ดังรูปที่ 4.9



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

$$\tau_{SRH}(II) \approx \tau_n \quad (4.66)$$

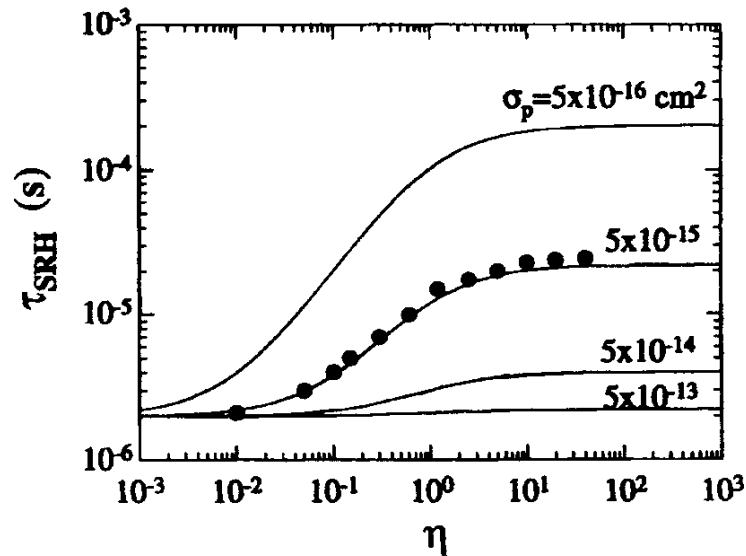
จากรูปที่ 4.10 สำหรับการฉีดพาหะต่ำๆ จะมี $\eta = \Delta n/p_0 \ll 0.01$ จะเห็นได้ว่าระดับพลังงานของสารเจือปนที่มีค่าเข้าใกล้ขอบของช่องว่างพลังงานจะมีค่า τ_{SRH} เพิ่มขึ้นตามค่า $\eta \tau_{SRH}$

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)

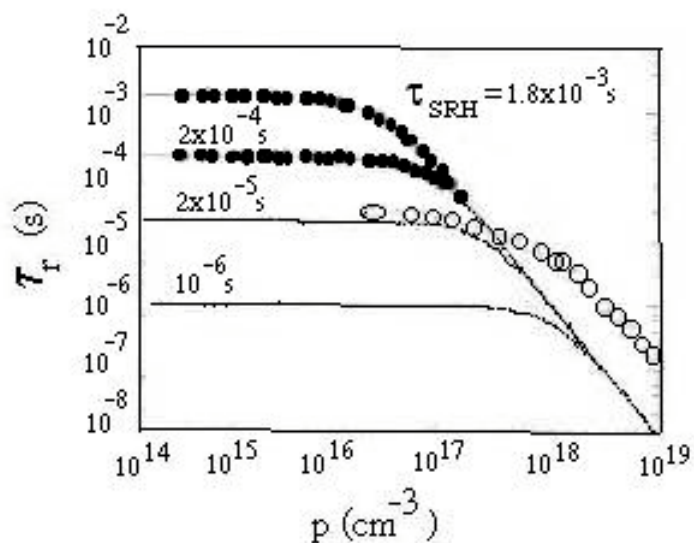
ภายใต้เงื่อนไขตามสมการ (4.54) และ (4.55) ค่า τ_{SRH} จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพื้นที่ตัดขวางของศูนย์กลางจับพาหะลดลงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงค่าเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH (τ_{SRH}) กับพื้นที่ตัดขวางของศูนย์กลางจับพาหะ(η) [17]

ดังนั้นเวลาอายุทั้งหมดของการรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮล(recombination lifetime)เนื่องจากกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นพร้อมๆกัน จะมีสมการเป็นดังนี้

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \quad (4.68)$$



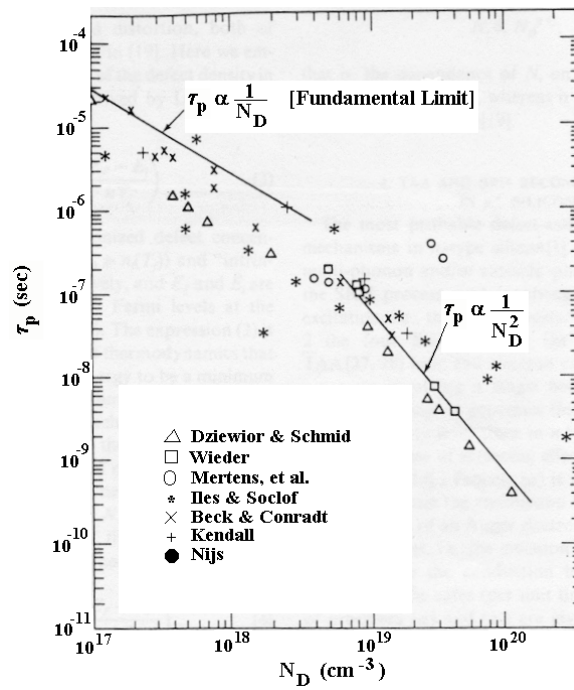
รูปที่ 4.12 แสดงเวลาอายุการรวมตัวของพาหะกับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

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]

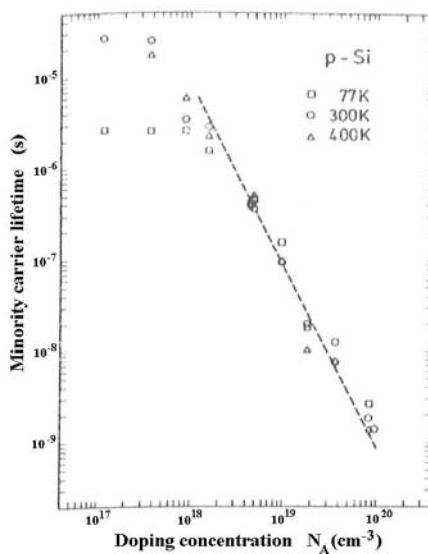
$$\tau_n = \frac{1}{C_n N_A} \quad (4.70)$$

และ

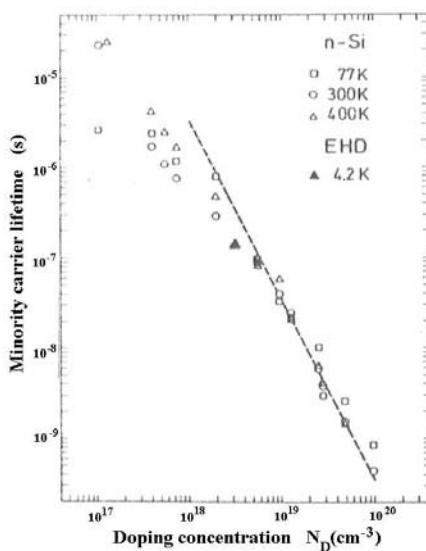
$$\tau_p = \frac{1}{C_p N_D} \quad (4.71)$$

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

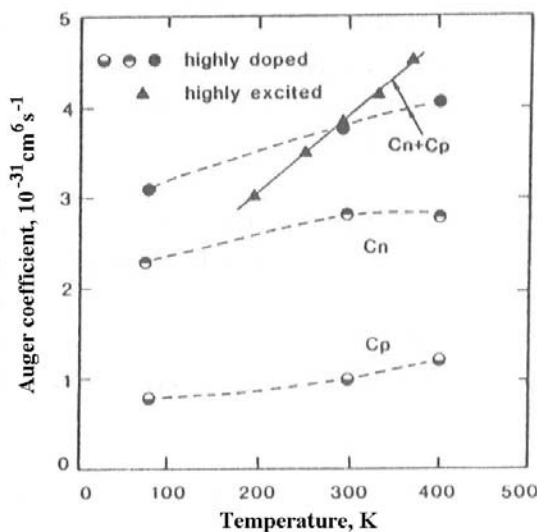
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ออเจอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ [11]

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}

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการฉีดพาหะสูง ๆ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ออเจอร์เป็น

$$C_{\text{Aug}} = C_n + C_p \quad (4.74)$$

ที่อุณหภูมิ 300 °K ค่าสัมประสิทธิ์ออเจอร์ที่ได้จากการวัดสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการฉีดพาหะสูง ๆ คือ $3.88 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำที่มีการโดปสูง ๆ คือ $3.79 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟสัมประสิทธิ์ออเจอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

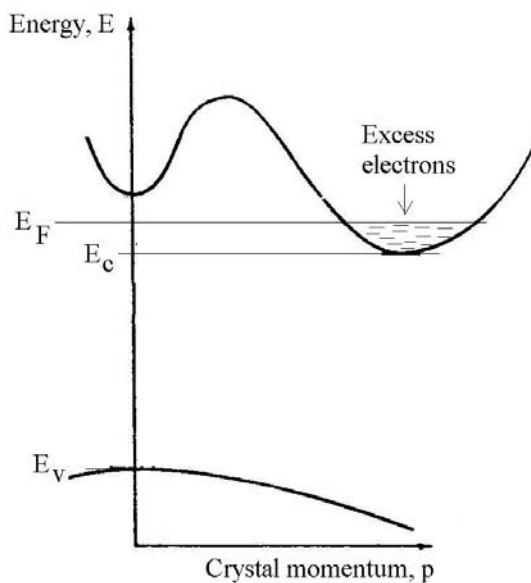
- ค่า C_p ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีการโดปสูง ๆ
- ค่า C_n ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีการโดปสูง ๆ
- ค่า $C_n + C_p$ ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีที่มีการโดปสูง ๆ
- ▲ ค่า $C_n + C_p$ ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีที่มีการฉีดพาหะสูง ๆ

สาเหตุที่ทำให้เวลาอายุของพาหะข้างน้อยลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการโดปสูง ๆ ด้วยพาหะข้างมากเนื่องจากระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่สูงกว่าระดับล่างสุดของแถบคอนดักชันในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือพิจารณาจากสมการ (4.75) ในเทอมของ $\ln(N_C/N_d)$ เมื่อ $N_d > N_C$ ทำให้มีค่าเป็นลบแล้วค่า $E_F > E_C$ ทำให้มีพาหะอิสระของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นมากมาย (ส่วนที่แฉะเป็นเส้น) 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

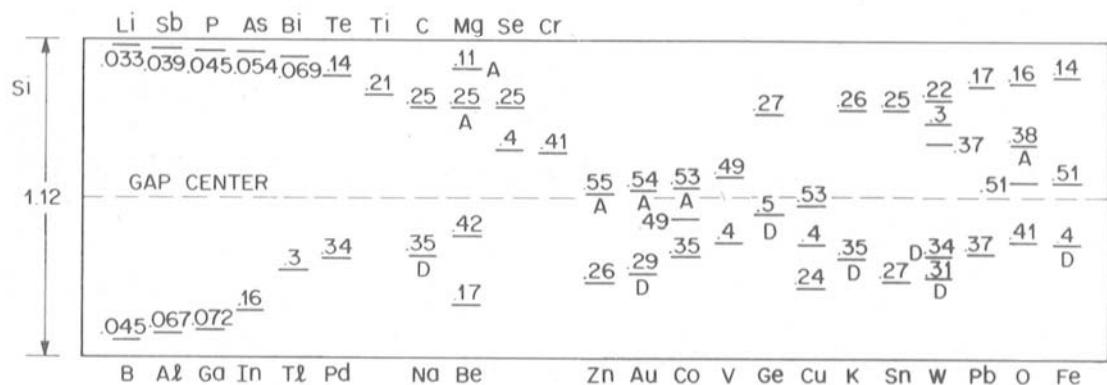
τ คือ เวลาอายุการรวมตัวกันของพาหะ โดยจะขึ้นอยู่กับ การแจกแจงของศูนย์กลางการรวมตัว (distribution of recombination center) ของแต่ละตำแหน่ง(x,y)

สำหรับเวลาอายุการรวมตัวกันของพาหะ จะขึ้นอยู่กับกระบวนการรวมตัวกันแบบ SRH และการรวมตัวกันแบบออเจอร์ ซึ่งมีเวลาอายุรวมของการรวมตัวกันของพาหะตามสมการ(4.69)

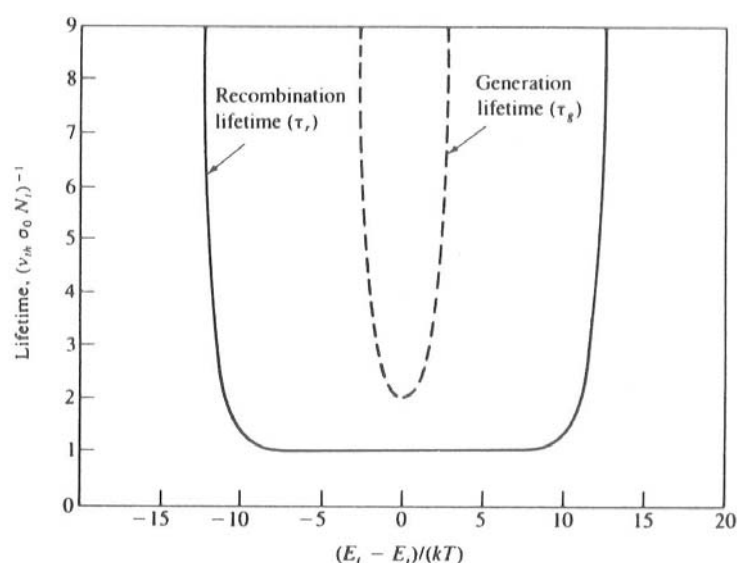
$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_{\text{SRH}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Auger}}} \quad (4.69)$$

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]

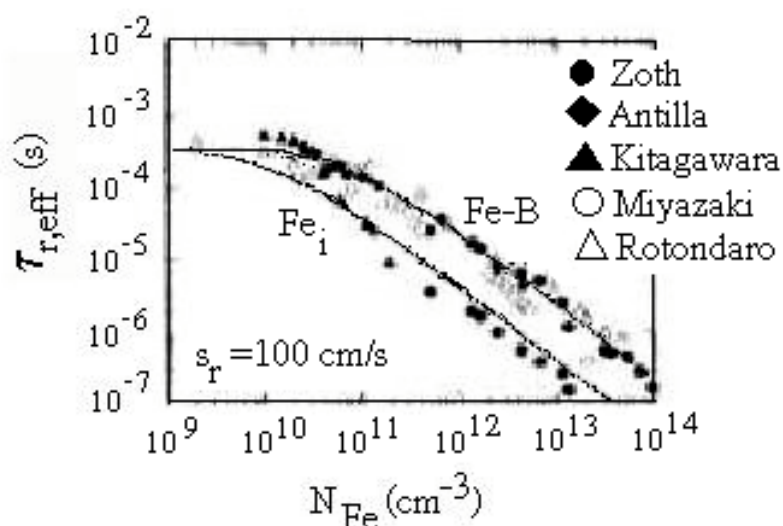


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อยและระดับพลังงานสารเจือปน

เนื่องจากระดับพลังงานสารเจือปนเหล่านี้มีผลต่อเวลาอายุของพาหะข้างน้อย ดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า เวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อระดับพลังงานสารเจือปนอยู่ใกล้ๆ บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน เช่น Au ซึ่งมีระดับพลังงานห่างจากแถบคอนดักชัน 0.54 eV หรือ อยู่ห่างจากบริเวณกึ่งกลาง 0.02 eV จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะข้างน้อยในอัตราที่มากที่สุด

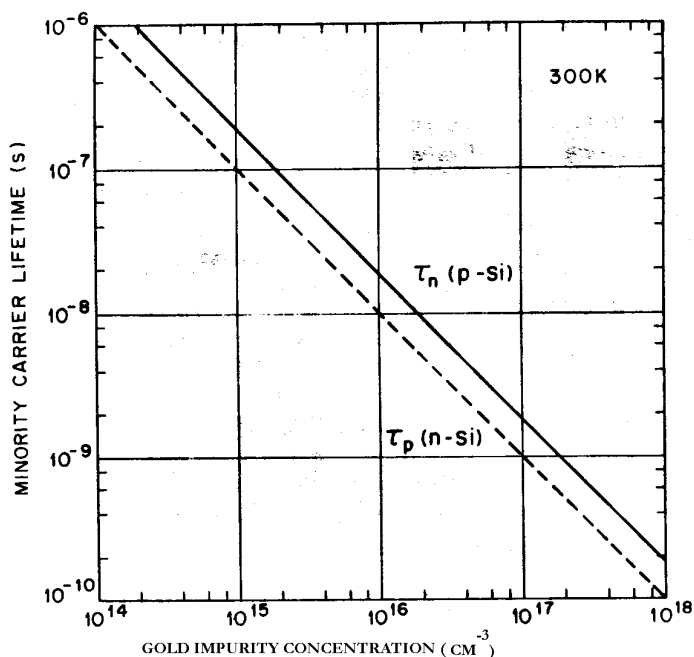
นอกจากระดับพลังงานสารเจือปนจะมีผลต่อเวลาอายุของพาหะข้างน้อยแล้ว ปริมาณการฉีดพาหะ(η)และความหนาแน่นของพาหะข้างมาก ก็มีผลต่อเวลาอายุของพาหะข้างน้อยเช่นกัน

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

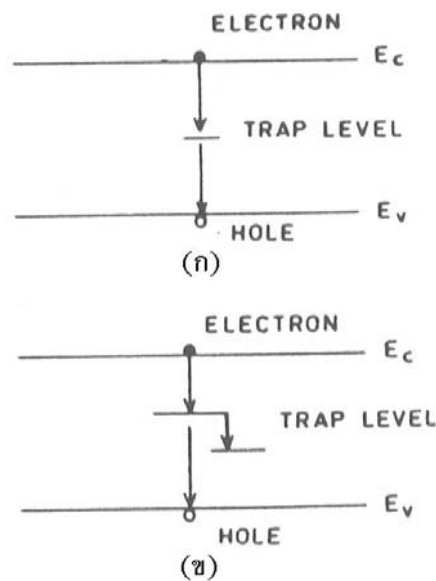
เมื่อมีสารเจือปน หรืออะตอมของสารกึ่งตัวนำเกิดบกพร่อง(crystal defect)อาจเนื่องมาจากการบิดไปของอะตอม(dislocation) จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดระดับพลังงานที่อยู่ใกล้บริเวณกึ่งกลางในช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเรียกระดับพลังงานนี้ว่า ระดับพลังงานลึก(deep energy level) มีผลทำให้พาหะอิเล็กตรอนอิสระ(free electron 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 $\tau_{r,eff}$) ตามสมการ

$$\frac{1}{\tau_{r,eff}} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_s} \quad (4.79)$$

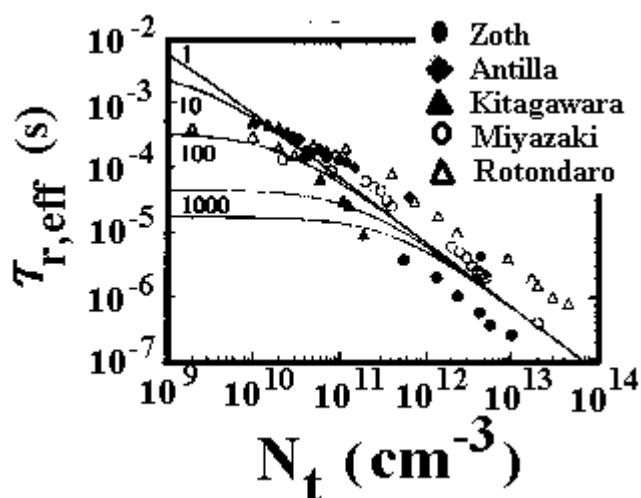
เมื่อนำสมการนี้มาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.23



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, กระบวนการรวมตัวแบบฮอเจอร์ 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

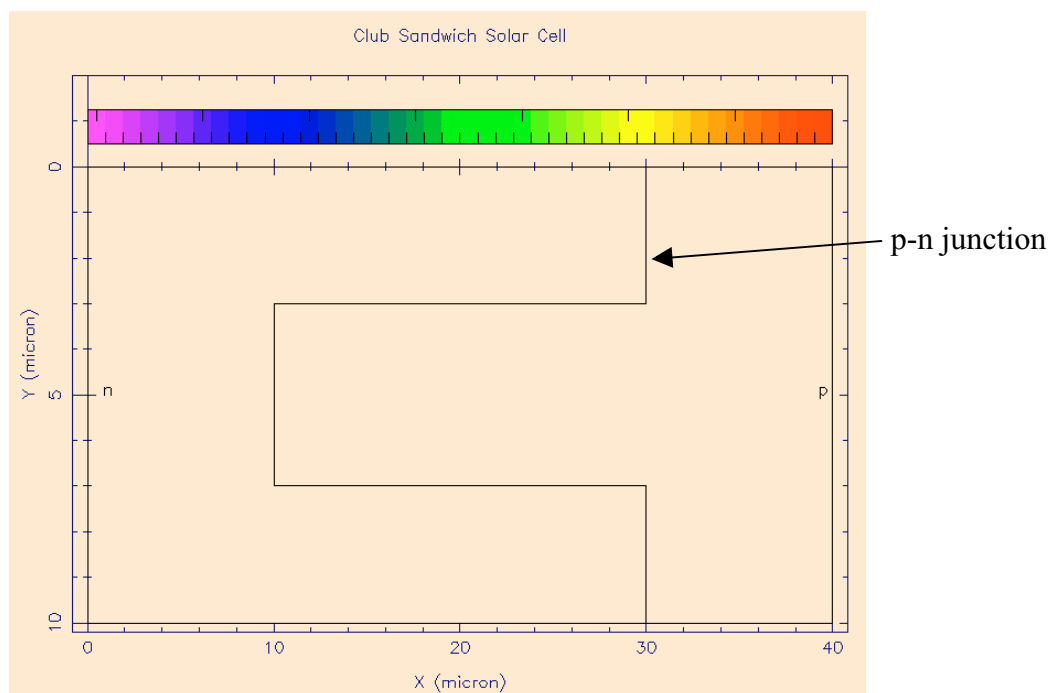
สำหรับอัตราการสะท้อนกลับ จะกำหนดให้เป็นศูนย์ เนื่องจาก สมมุติให้แสงที่มากกระทบ ถูกดูดกลืนทั้งหมด

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

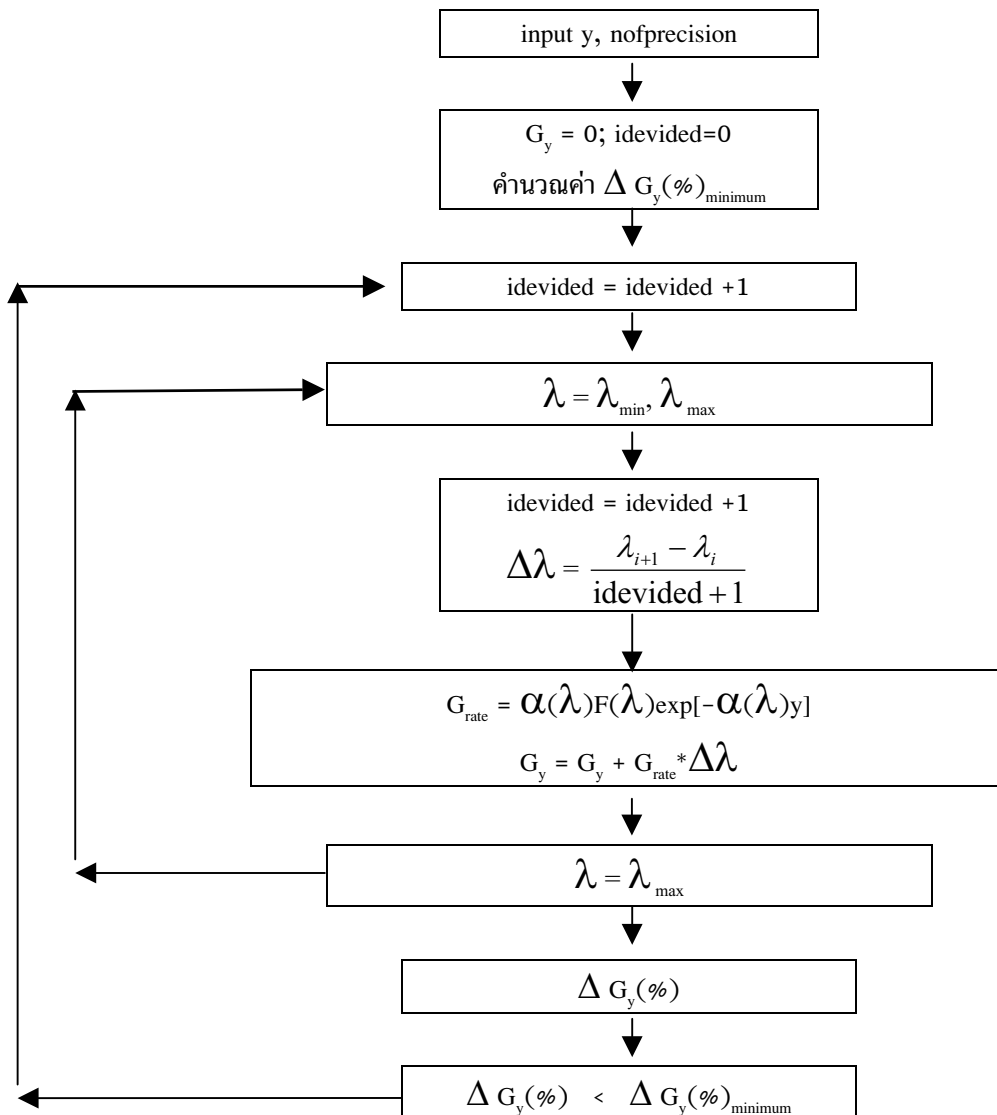
$$\Delta G_y(\%)_{\text{minimum}} = 0.5 \times 10^{2-\text{nofprecision}} \quad (5.3)$$

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

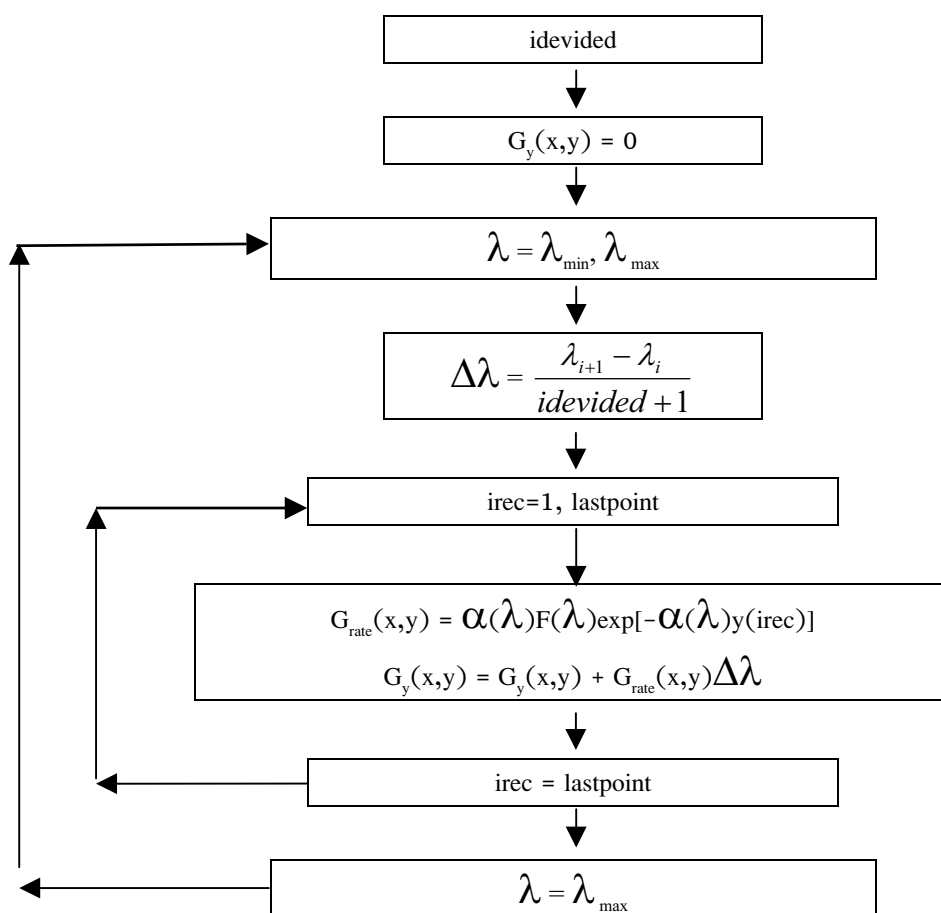


รูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนการหาค่า $\Delta\lambda$ ที่เหมาะสม

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

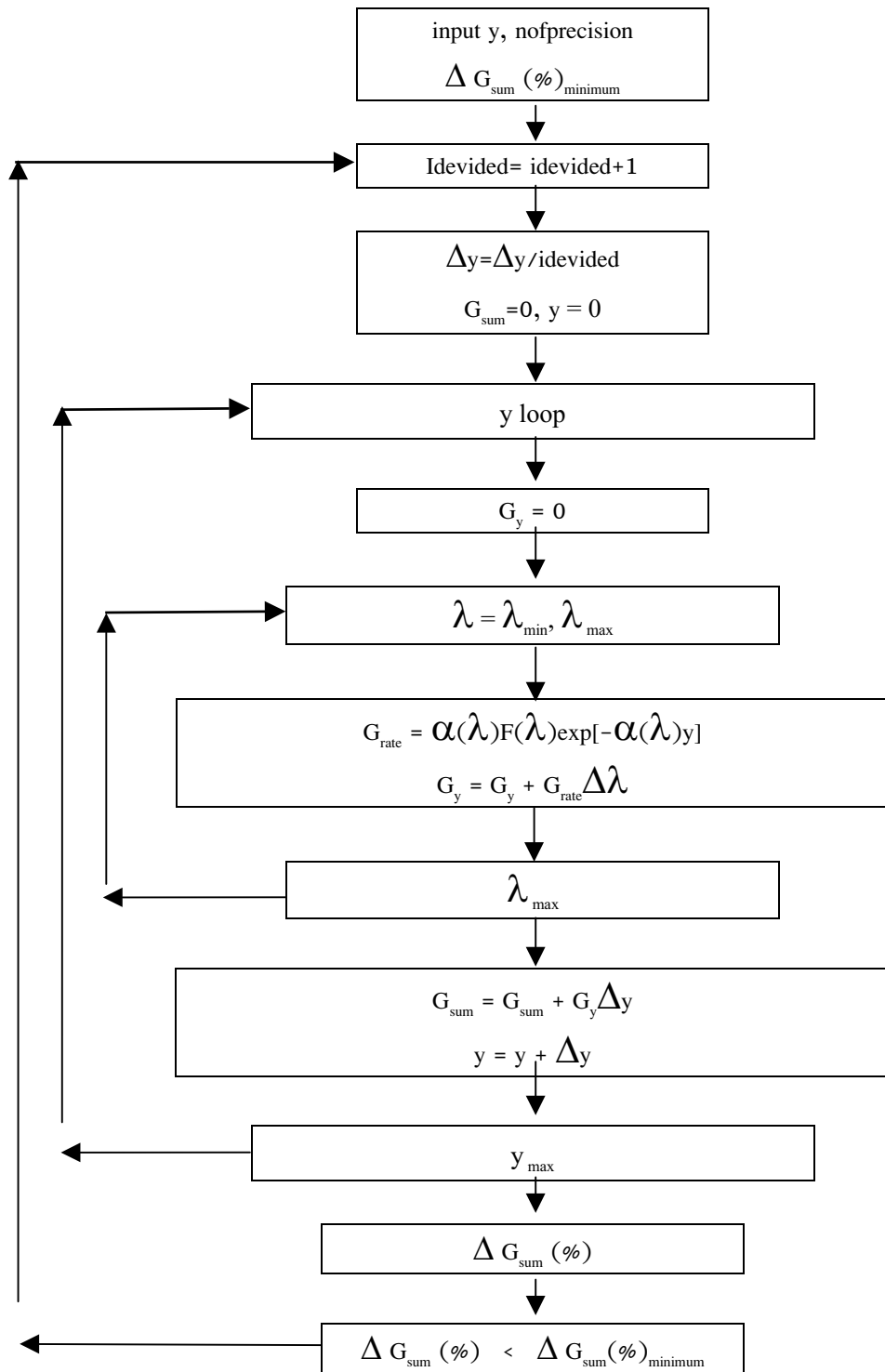
เมื่อทำการคำนวณอัตราการเกิดของพาหะเรียบร้อยแล้ว จะเก็บข้อมูลนี้ไว้สำหรับการคำนวณในแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ“คลับแซนวิช”ต่อไป โดยเตรียมไว้สำหรับที่ AM ต่าง ๆ เช่น AM0, AM1, AM1.5, และ AM2 เป็นต้น

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 $\Delta y = (1 \mu m) / \text{idevived}$ เมื่อ idevived มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ... เป็นต้นไป โดยเงื่อนไขการหยุดของโปรแกรมจะเป็นไปตามสมการ(5.1), (5.2), และ (5.3) ที่กำหนดความละเอียดของการเปลี่ยนแปลงจากค่าของเลขนัยสำคัญ(n of precision)

ดังนั้นเลขนัยสำคัญแต่ละค่า จะให้ผลการคำนวณของค่า idevived ต่าง ๆ กันไป ซึ่งค่า idevived 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 และกระบวนการแบบอเจอร์ 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) สัมประสิทธิ์อเจอร์(Auger coefficients)

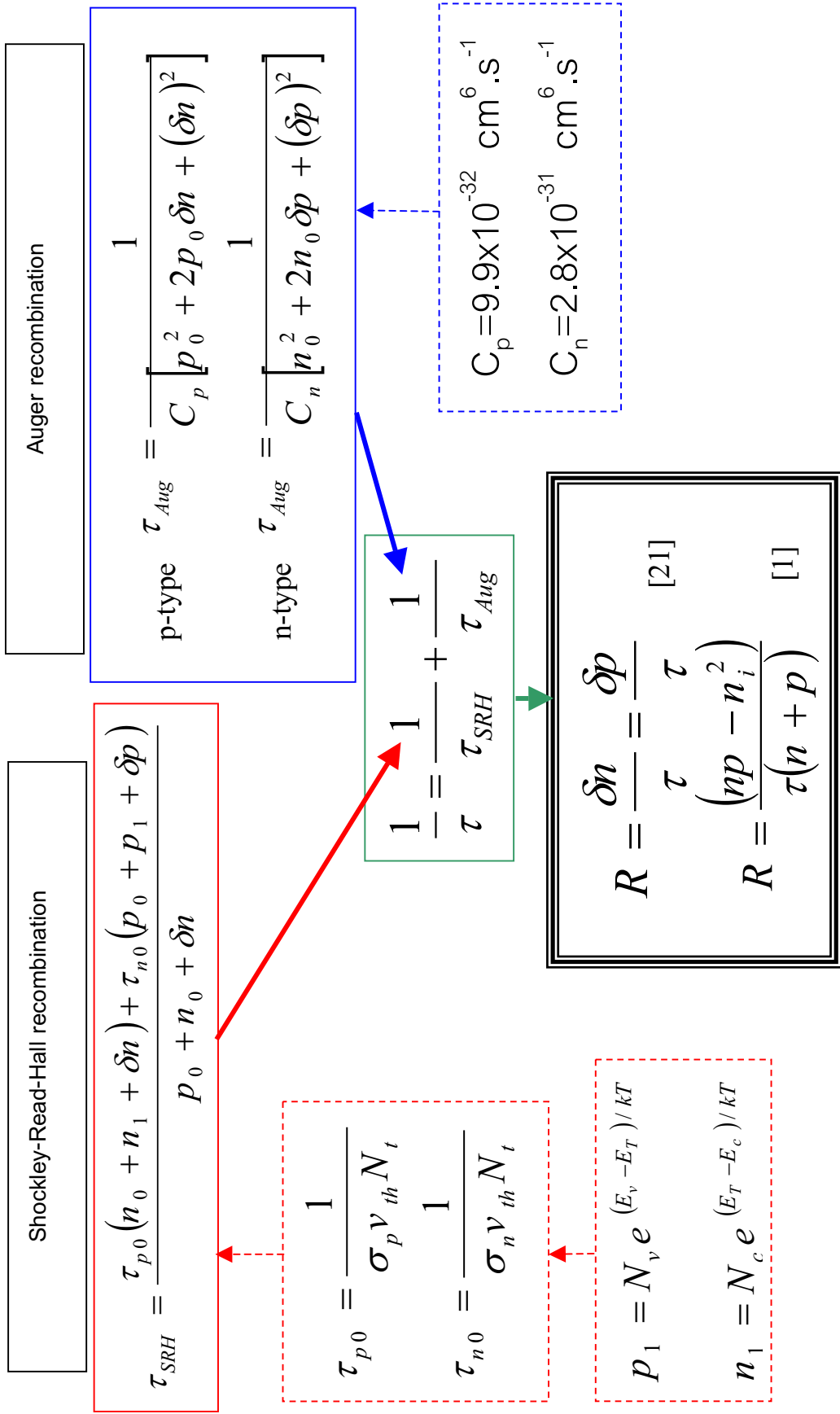
$$\text{สำหรับซิลิกอนชนิดเอ็น} \quad C_n = 2.8 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$$

$$\text{สำหรับซิลิกอนชนิดพี} \quad C_p = 9.9 \times 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s}$$

5.2.1 แบบจำลองเพื่อคำนวณค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะ

แบบจำลองเพื่อคำนวณค่าเวลาอายุการรวมตัวของพาหะซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการคือ กระบวนการแบบ SRH และกระบวนการแบบอเจอร์ 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) สำหรับเวลาอายุการรวมตัวของพาหะของกระบวนการแบบอเจอร์ 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)

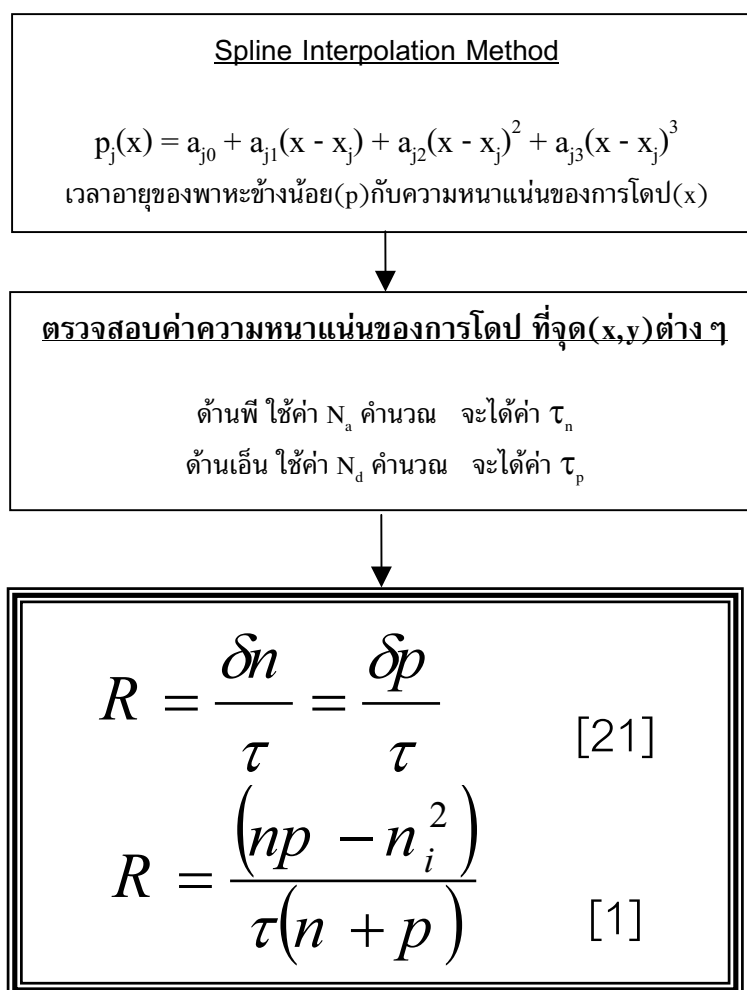
และ x แทน ความหนาแน่นของการโด๊ป (N_A และ N_D)

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)

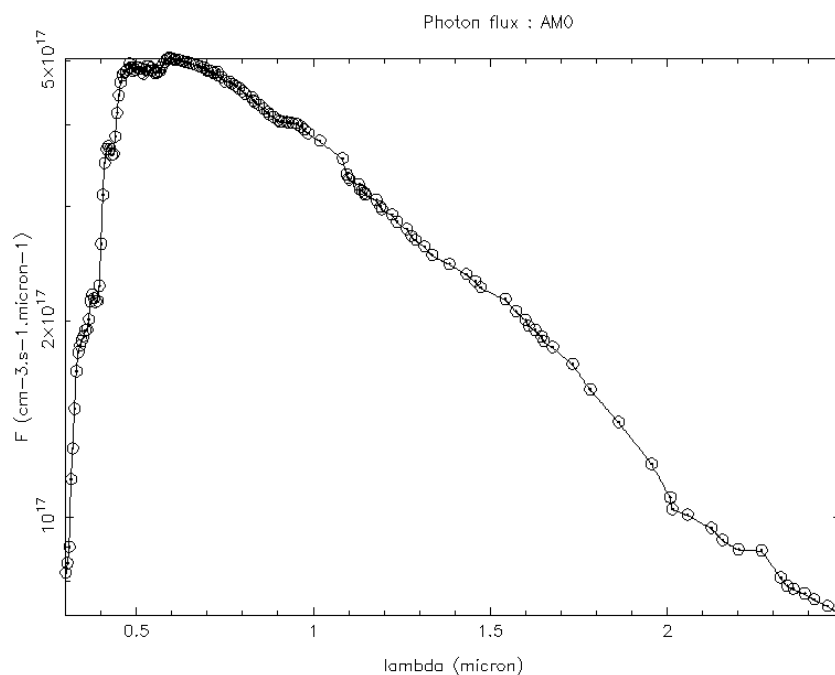
6.1.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ(Reflectivity)

6.1.4 อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากแสง(Generation rate)

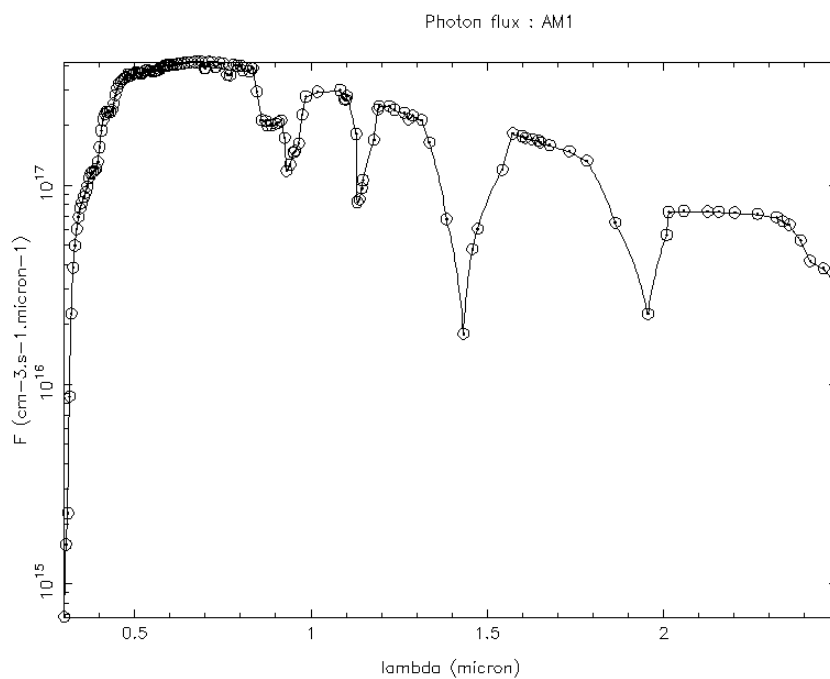
6.1.5 อัตราการเกิดของพาหะในแต่ละชั้นและอัตราการเกิดของพาหะรวม

6.1.1 โฟตอนฟลักซ์(Photon flux)

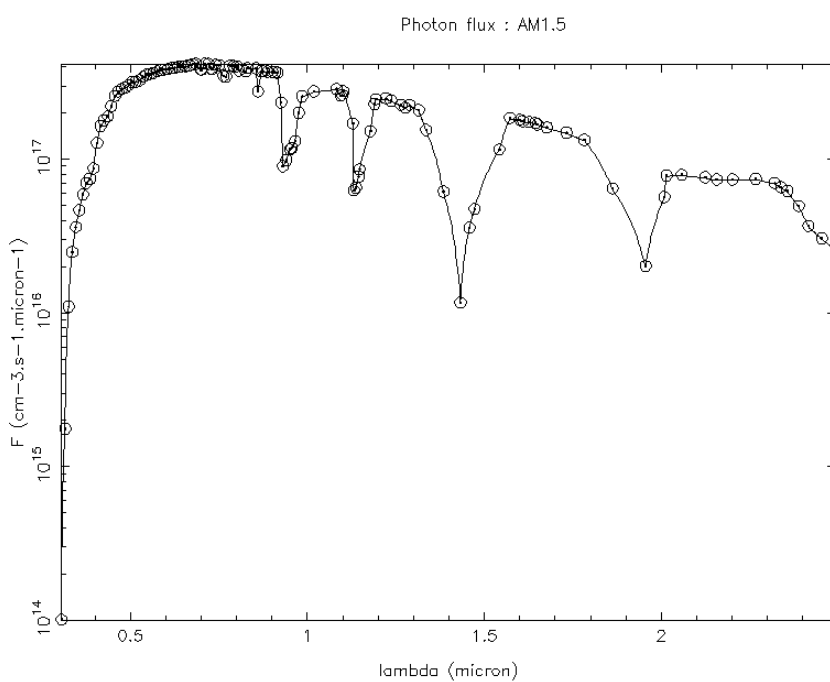
โฟตอนฟลักซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวคลื่นแสง แทนสัญลักษณ์ด้วย F มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ และมีข้อมูลที่ได้จากการสืบค้นที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 แสดงไว้ดังรูปที่ 6.1, 6.2, 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ [2]



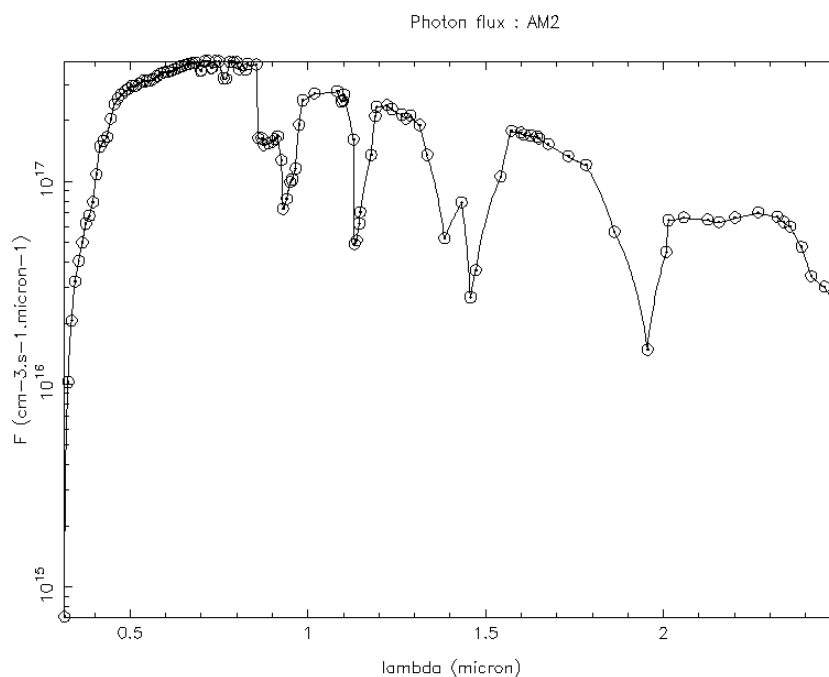
รูปที่ 6.1 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM0



รูปที่ 6.2 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM1

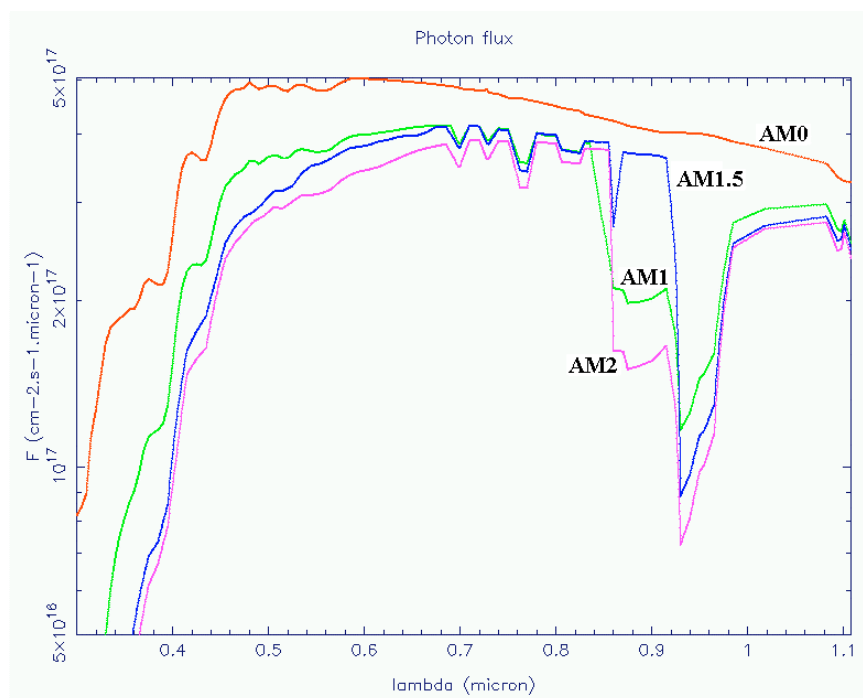


รูปที่ 6.3 แสดงโฟตอนฟลักซ์ที่ AM1.5



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 $1.109 \mu\text{m}$

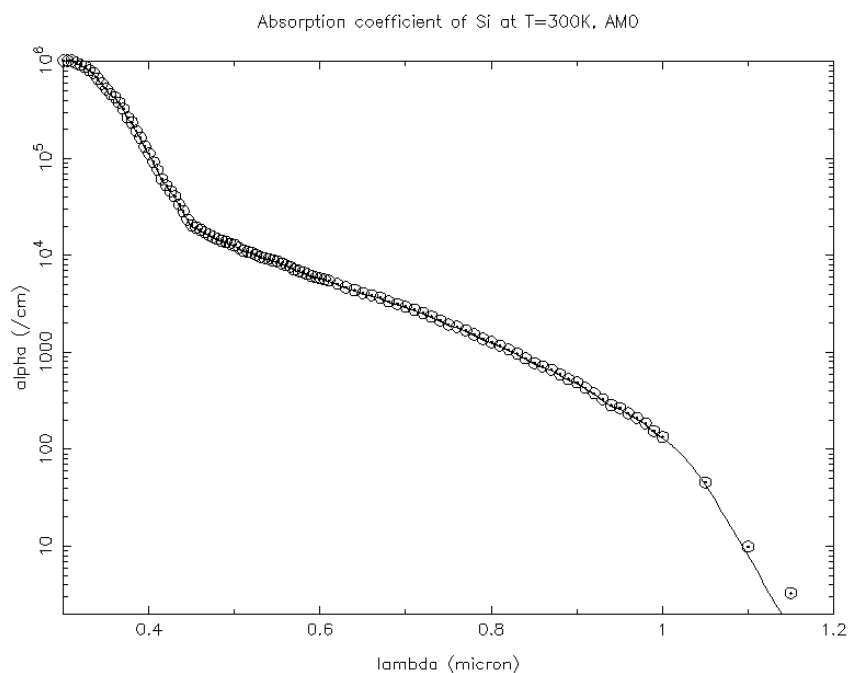
ตารางที่ 6.1 แสดงปริมาณโฟตอนฟลักซ์ที่ AM ต่างๆ

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

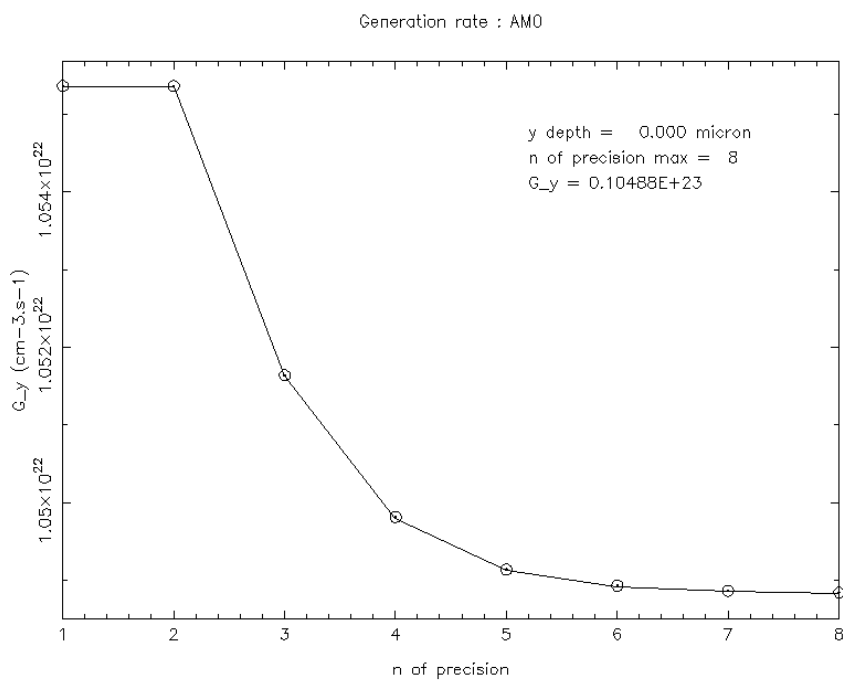
6.1.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflectivity)

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ แทนสัญลักษณ์ด้วย r ไม่มีหน่วย และสำหรับการสะท้อนกลับที่ใช้ในแบบจำลอง จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ โดยสมมุติว่าแสงที่ตกกระทบถูกดูดกลืนทั้งหมด 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

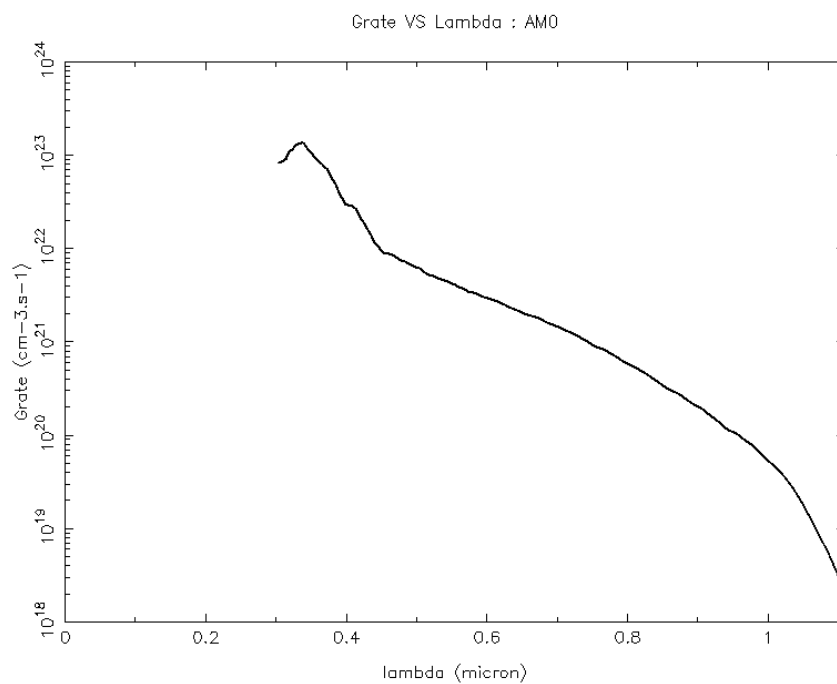


รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_y กับจำนวนเลขนัยสำคัญ

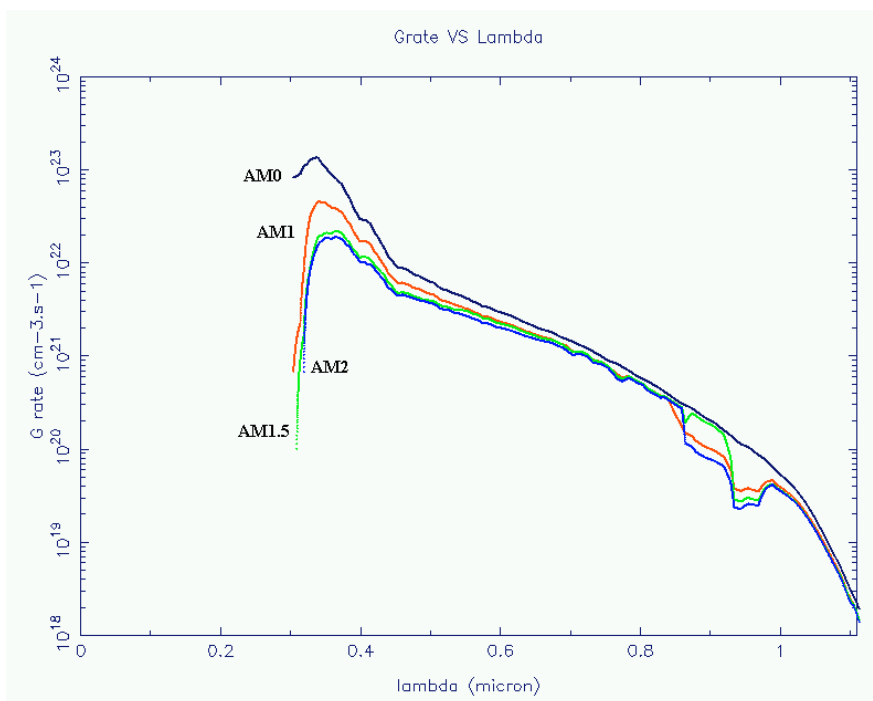
จะเห็นได้ว่าค่า G_y เริ่มจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อค่า nofpresicion เริ่มตั้งแต่ 5 ซึ่งได้ค่า idevided=62 ครั้ง นั่นคือจะแบ่งช่วงความยาวคลื่นที่อยู่ติดกันคือ ระหว่างข้อมูล λ_i และ λ_{i+1} ออกเป็น 62 ครั้งนั่นเอง สำหรับรายละเอียดค่า nofpresicion และ idevided อื่นๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการคำนวณค่า idevided จากการกำหนดเลขนัยสำคัญต่างๆ

จำนวนเลขนัย สำคัญ (n of precision)	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 $0.3335 \text{ }\mu\text{m}$

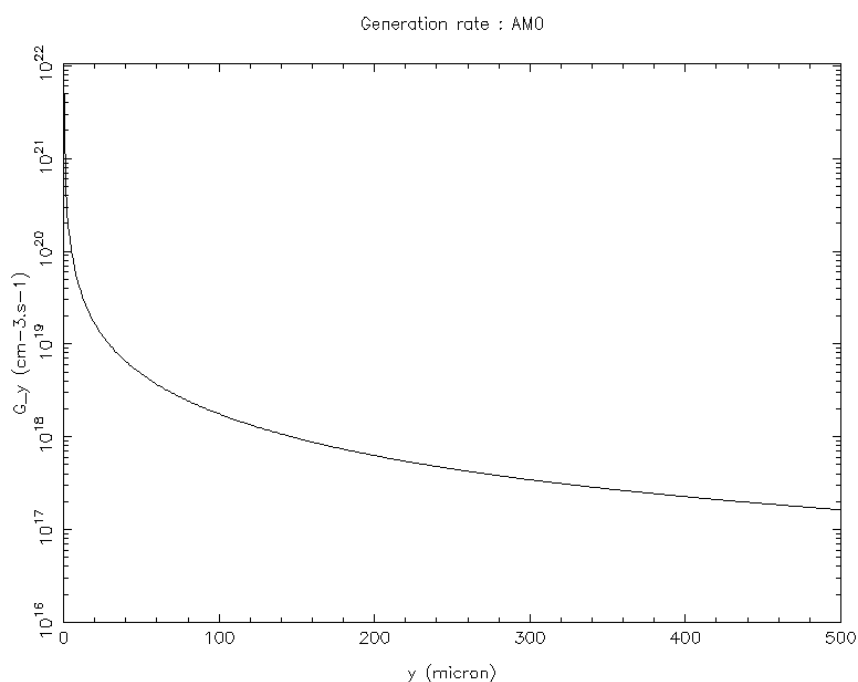
สำหรับที่ AM1, AM1.5, และ AM2 ปรากฏผลดังรูปที่ 6.9

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

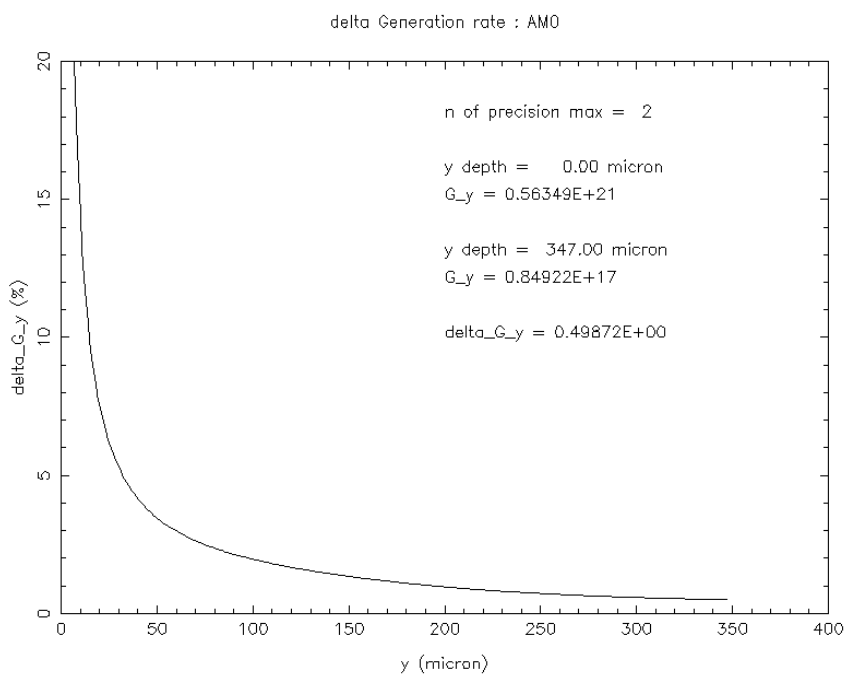
เช่นเดียวกัน ที่ AM1, AM1.5, และ AM2 จะได้ผลดังรูปที่ 6.12 เมื่อพิจารณาถึงความลึก $100 \text{ }\mu\text{m}$ และแสดงผลการคำนวณ ตามตารางที่ 6.3

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

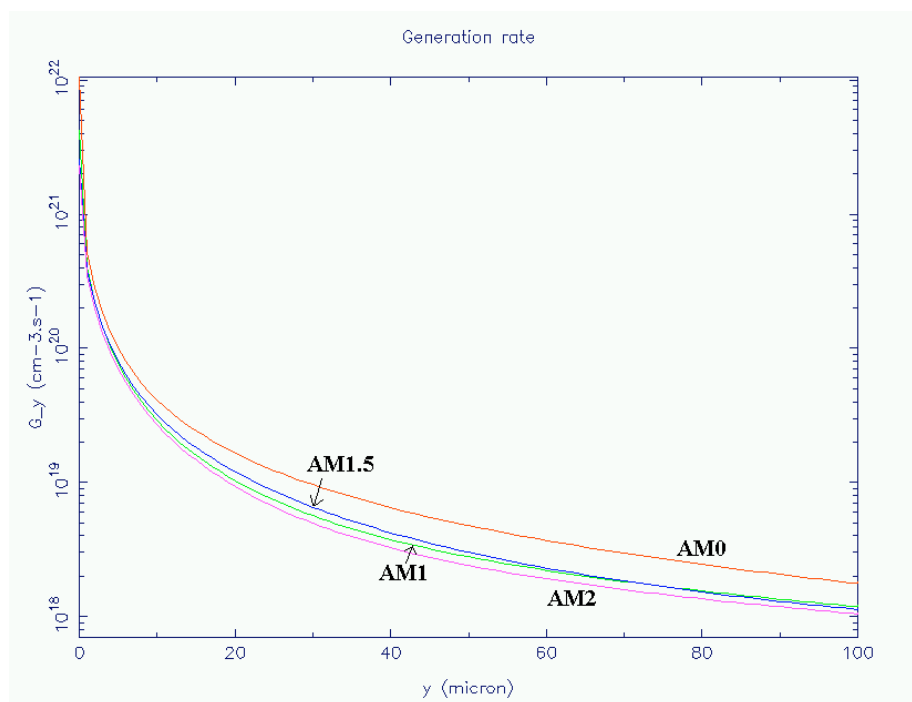
ที่ AM1.5 ที่ผิว($y=0$) จะมีค่า $G_y=2.56377 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ และที่ความลึก $y=500 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งมีค่า $G_y=1.26923 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ จะมีค่าน้อยกว่าที่ผิวประมาณ 4.95063×10^{-5} เท่าของที่ผิว

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

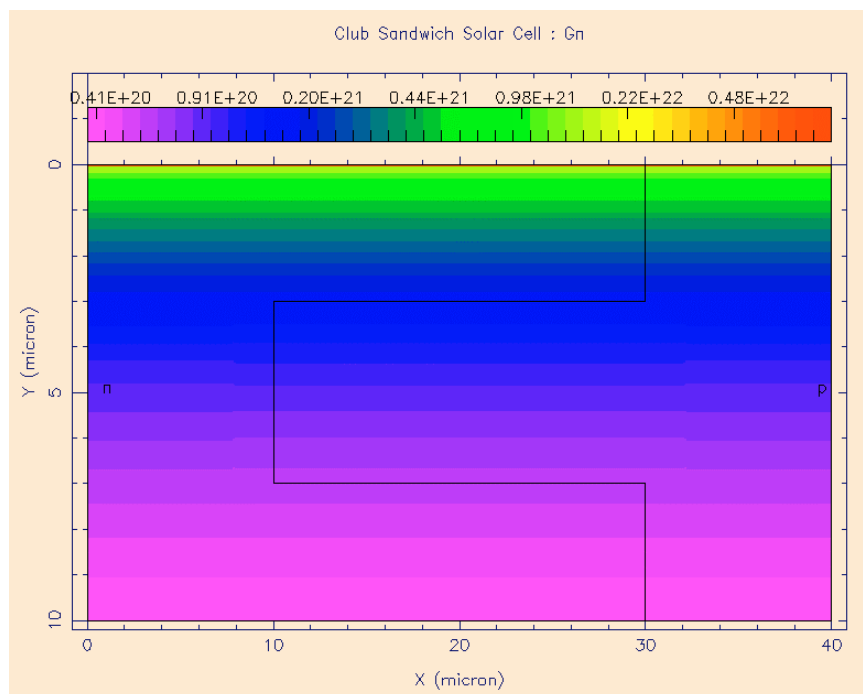
ตารางที่ 6.3 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวบน

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}

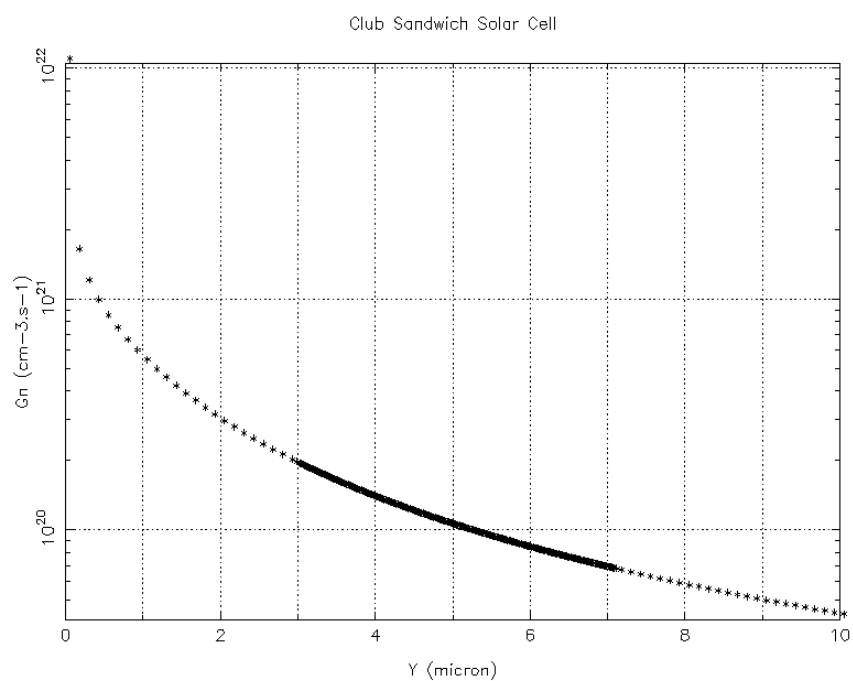
จากตารางที่ 6.3 ค่าอัตราการเกิดของพาหะที่ผิวด้านรับแสง($y=0 \mu\text{m}$) จะมีค่ามากที่สุด และมีค่าจากมากไปหาน้อยที่ AM0, AM1, AM1.5 และ AM2 ตามลำดับ

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



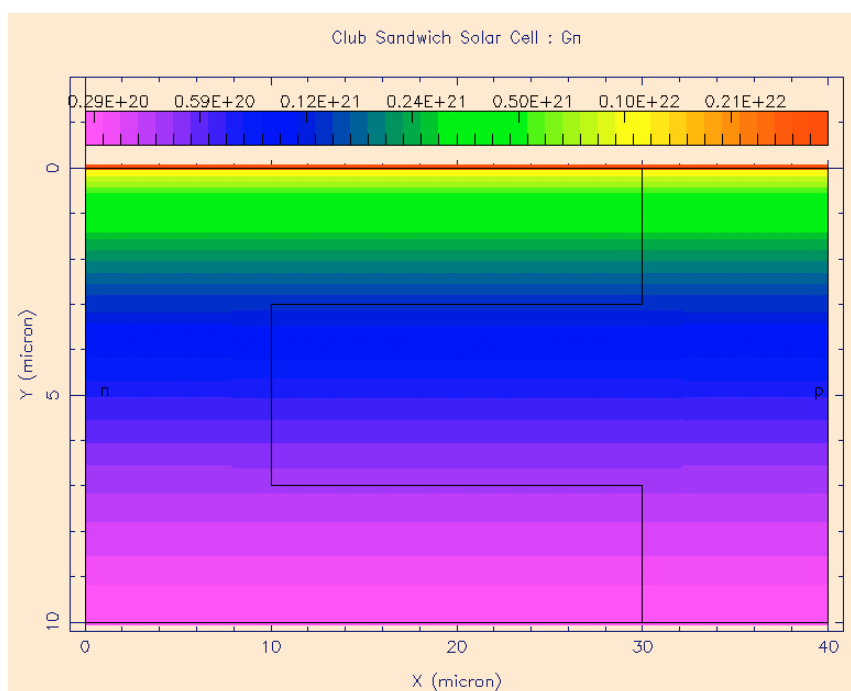
รูปที่ 6.14 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะตามระดับความลึก

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

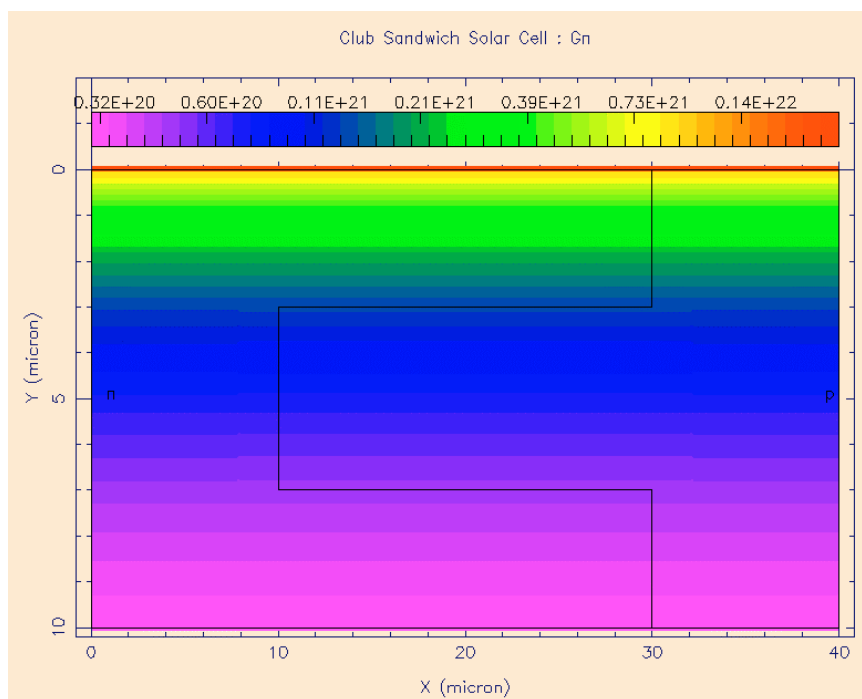


รูปที่ 6.15 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM1

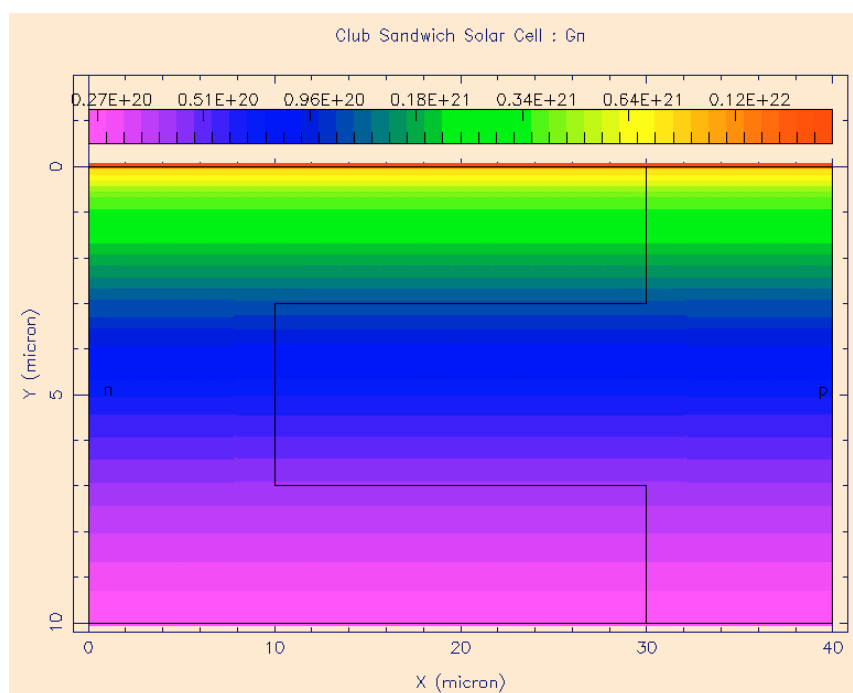
เนื่องจากโฟตอน 1 ตัวจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลเป็น อิเล็กตรอน 1 ตัวและโฮล 1 ตัว ดังนั้นอัตราการเกิดอิเล็กตรอนและอัตราการเกิดโฮลจะเท่ากัน ตามสมการ

$$G_n = G_p \quad (6.2)$$

เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงได้จะต้องผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลจากแสงให้ได้ปริมาณมากที่สุด และจะต้องกวาดอิเล็กตรอนและโฮลเหล่านั้นให้ไหลออกไปสู่วงจรภายนอกให้ได้มากที่สุดโดยการใช้ปรากฏการณ์แพร่กระจายของพาหะ



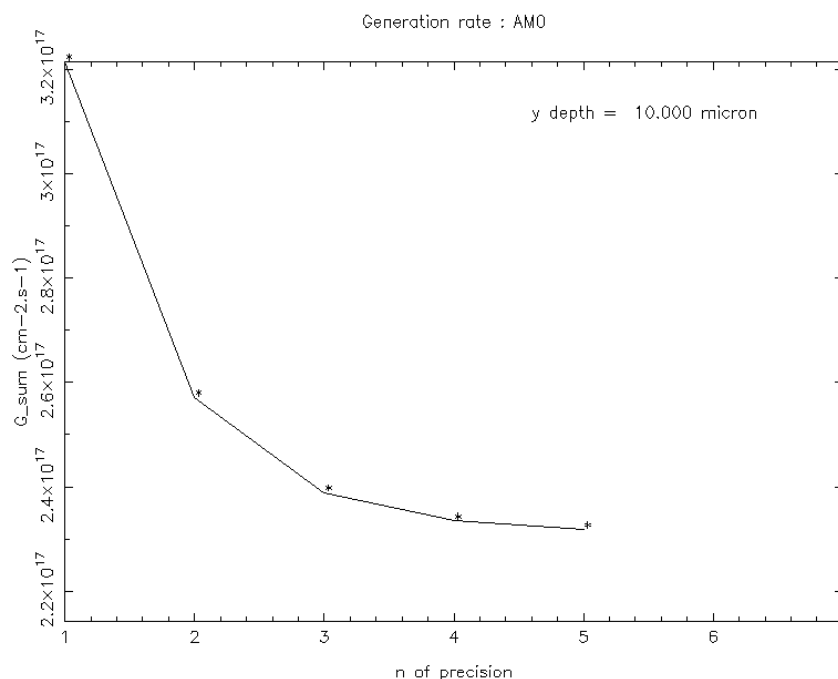
รูปที่ 6.16 แสดงค่าอัตราการเกิดของพาหะในบริเวณต่างๆของแบบจำลอง ที่ AM1.5



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

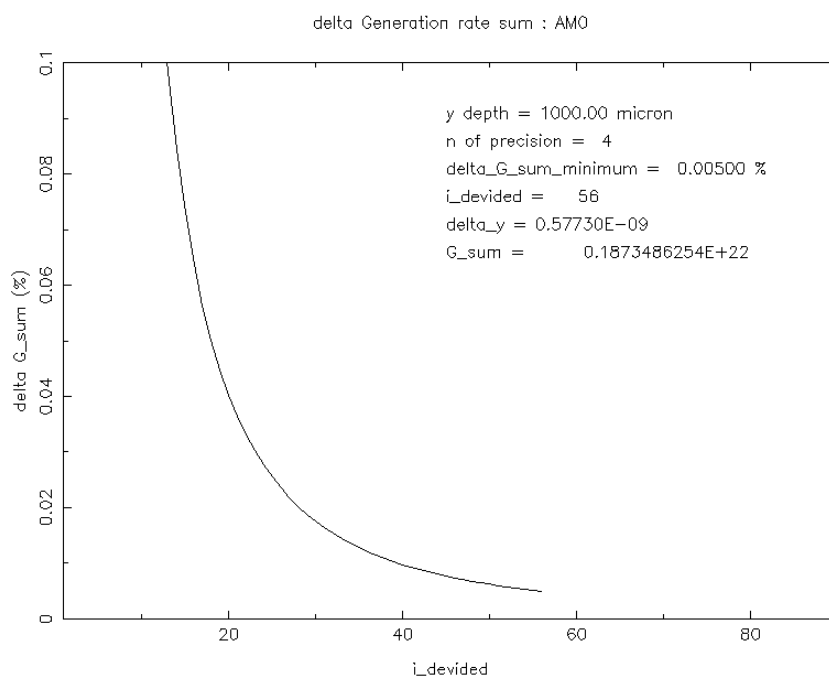
จากรูปที่ 6.18 เมื่อใช้ความละเอียดของเลขนัยสำคัญต่างๆ โดยคำนวณไปถึงระดับความลึกจากผิว $10 \mu\text{m}$ จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อใช้ความละเอียดของเลขนัยสำคัญตั้งแต่ 4 ขึ้นไป และผลการคำนวณค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม เมื่อใช้ความละเอียดของเลขนัยสำคัญต่างๆ เป็นดังนี้

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
---	-----	-----	-----	-----

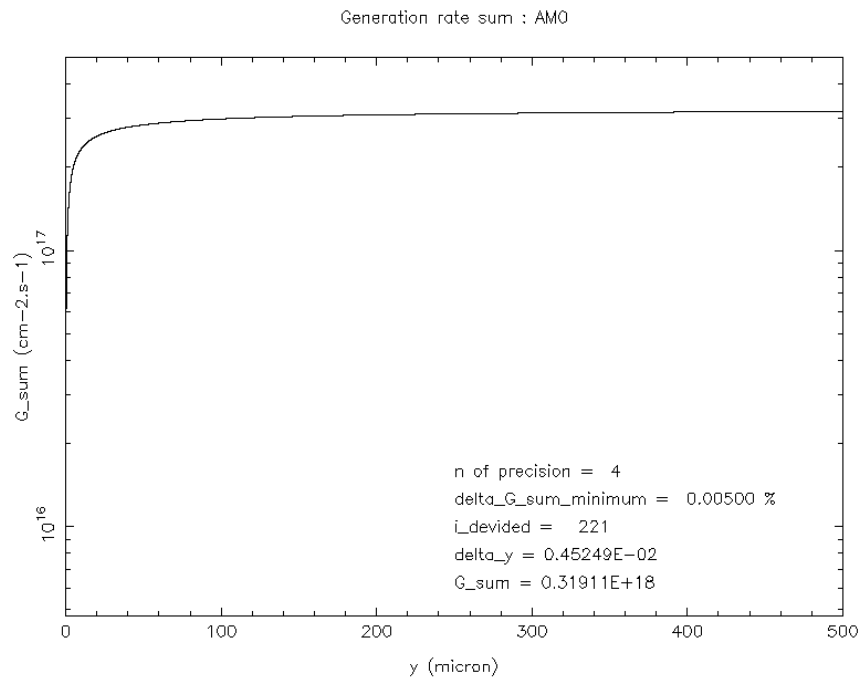
ผลการคำนวณค่า ΔG_{sum} และ idevided ปรากฏผลดังนี้



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

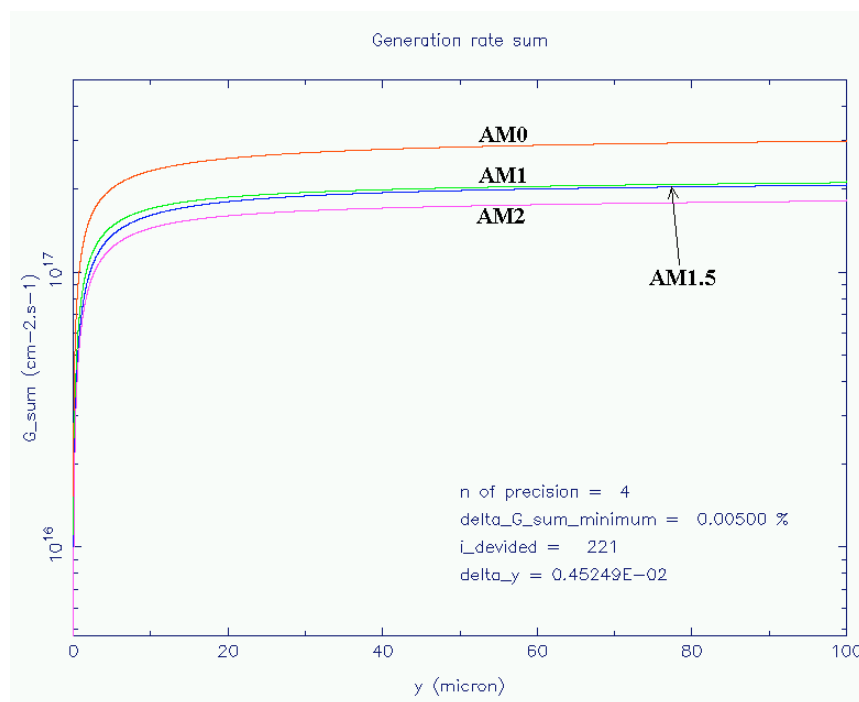
ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวมที่ความลึกจากผิว $y=0.01 \mu\text{m}$ จะมีค่า $G_{\text{sum}}=1.16124 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ และที่ส่วนล่างสุด($y=500 \mu\text{m}$) ซึ่งมีค่า $G_{\text{sum}}=4.07267 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ จะมีค่ามากกว่าที่ $y=0.01 \mu\text{m}$ ประมาณ 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

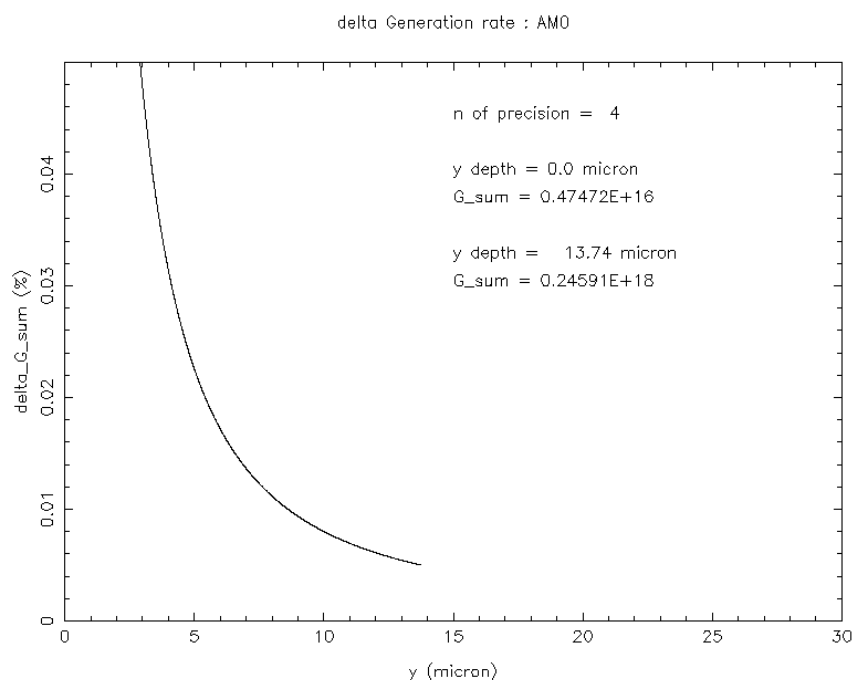
ค่าอัตราการเกิดของพาหะรวม ที่ได้นี้ แสดงถึงอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ความลึกจากผิว จากรูปที่ 6.21 เมื่อความลึกจากผิวมากกว่า 20 μm อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลก็ไม่ได้เพิ่มมากขึ้นเท่าใด ดังนั้นการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ความลึกมาก ๆ ก็ไม่เกิดประโยชน์เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับผลผลิตที่ได้เกือบเท่าเดิม 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 การคำนวณจะไปถึงสิ้นสุดที่ความลึกต่างๆ 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

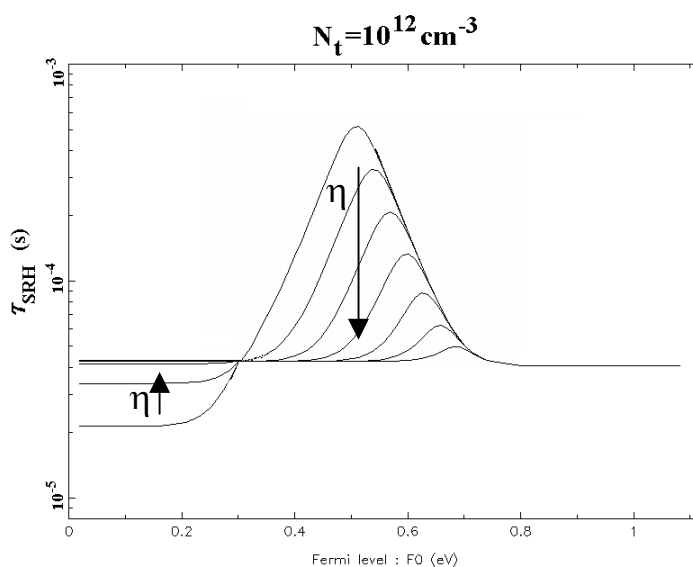
เวลาอายุการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH จากสมการ(4.57) ถ้าค่า τ_{∞} ต่างจากค่า τ_0 (โดยทั่วไป) เมื่อค่า δp เพิ่มขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงค่า τ อยู่ระหว่าง τ_{∞} และ τ_0 ดังรูปที่ 6.23 ซึ่งแสดงค่าเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิ(F_0)อยู่ในบริเวณระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชัน

$$\tau = \tau_0 \left[\frac{1 + \frac{\tau_0(\tau_{p0} + \tau_{n0})\delta p}{\tau_{p0}(n_0 + n_1) + \tau_{n0}(p_0 + p_1)}}{1 + \frac{\delta p}{n_0 + p_0}} \right] \quad (4.57)$$

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

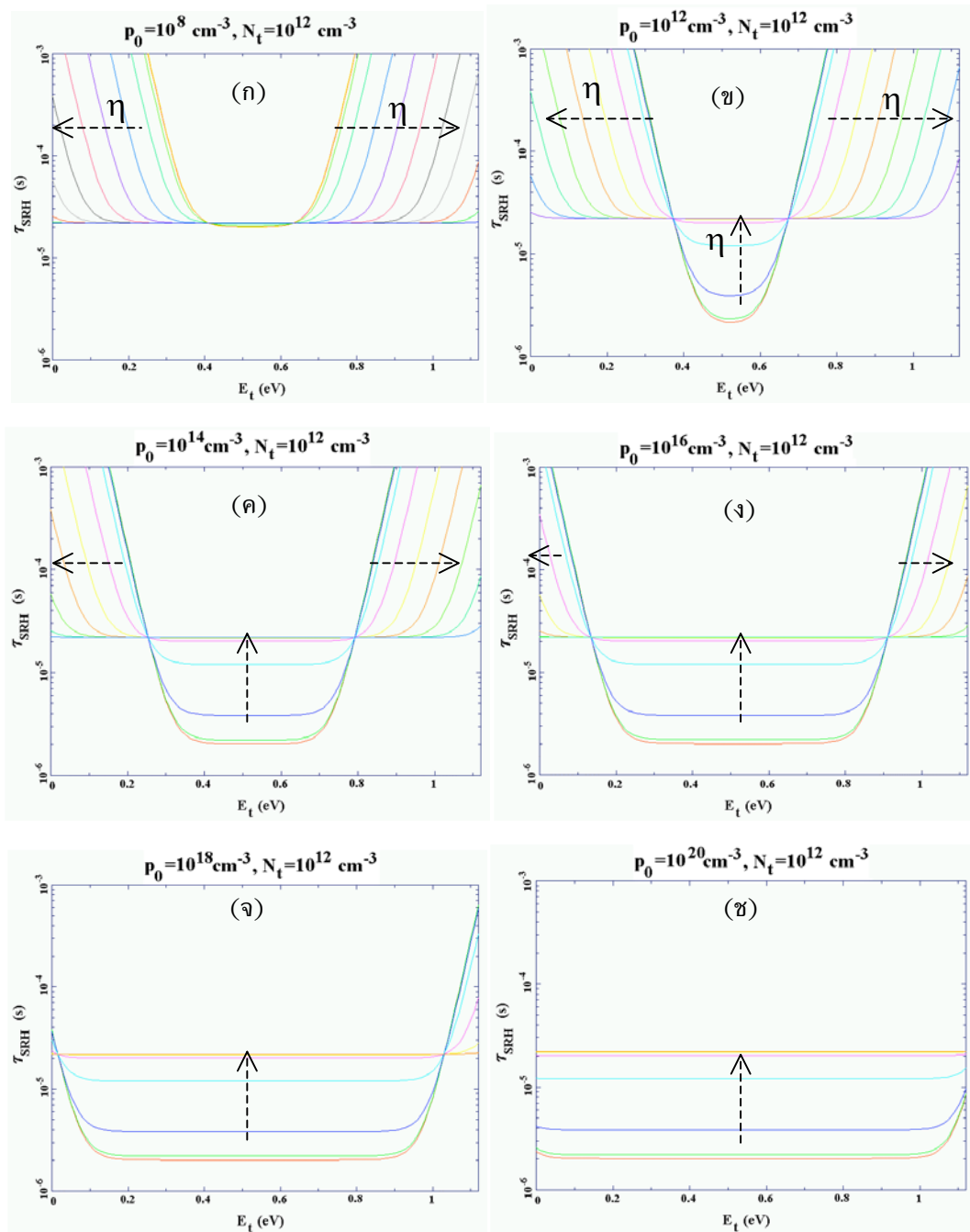
เมื่อพิจารณาเฉพาะกระบวนการการรวมตัวผ่านแตริปโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระดับการโด๊ปเช่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเปลี่ยนแปลงค่า p_0 อยู่ระหว่าง $10^8 - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ดังรูปที่ 6.24 เมื่อระดับพลังงานแตริปมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1.12 eV และกำหนดให้ $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

จากรูปที่ 6.24 (ก) - (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการโด๊ปสูงขึ้น (p_0 มากขึ้น) และมีการฉีดพาหะต่ำๆ (η น้อย) เวลาอายุของพาหะข้างน้อย $\tau_{SRH}(II)$ จะมีค่าลดลง (เกิดการรวมตัวของพาหะข้างน้อยมากขึ้น) แต่ถ้ามีการฉีดพาหะมากๆ (η มาก) เวลาอายุของพาหะข้างน้อย $\tau_{SRH}(hl)$ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง (เกิดการรวมตัวของพาหะข้างน้อยเท่าเดิม)

อย่างไรก็ตาม บริเวณที่มีเวลาอายุของพาหะน้อยที่สุดทุกกรณี ระดับพลังงานของสารเจือปนจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน แสดงว่า พาหะจะเกิดการรวมตัวกันมากที่สุดในบริเวณนี้

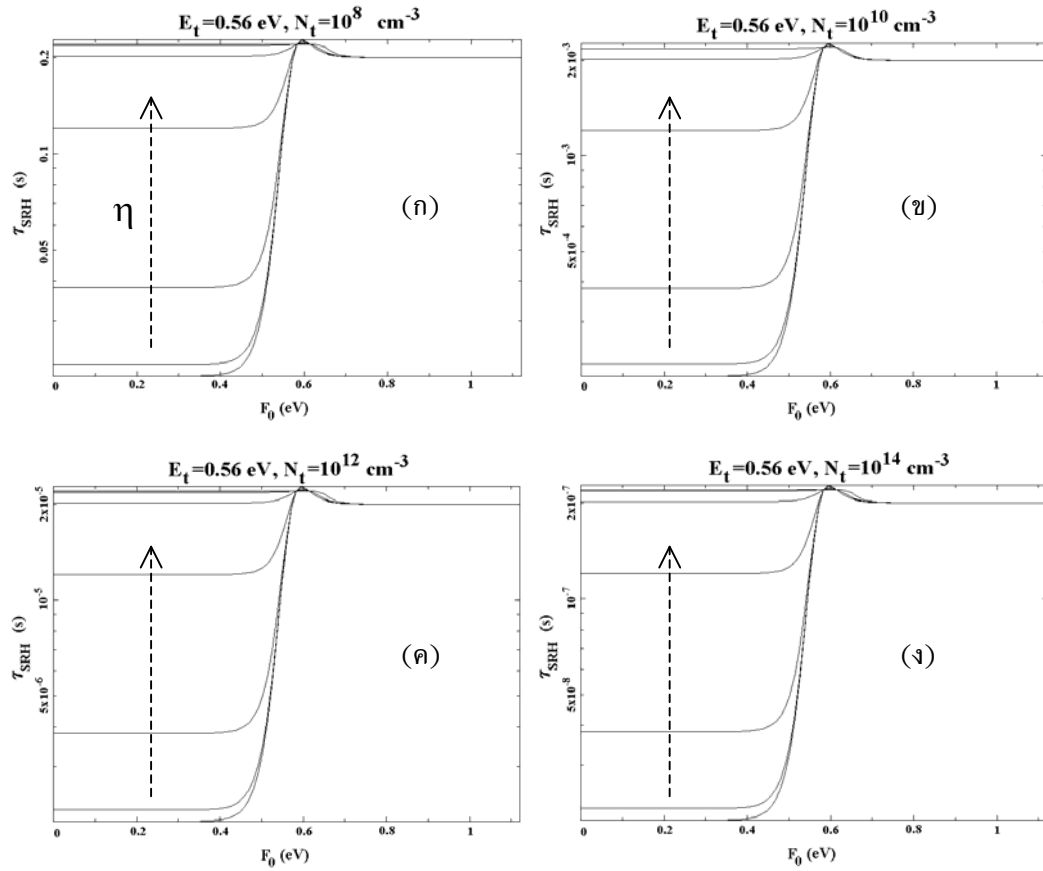
จากรูปที่ 6.24 (ข) ถ้ามีการโด๊ประดับปานกลาง $p_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และมีการฉีดพาหะต่ำๆ (η น้อย) เวลาอายุของพาหะข้างน้อยจะมีค่าต่ำที่สุดในบริเวณแคบๆ ใกล้จุดกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

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

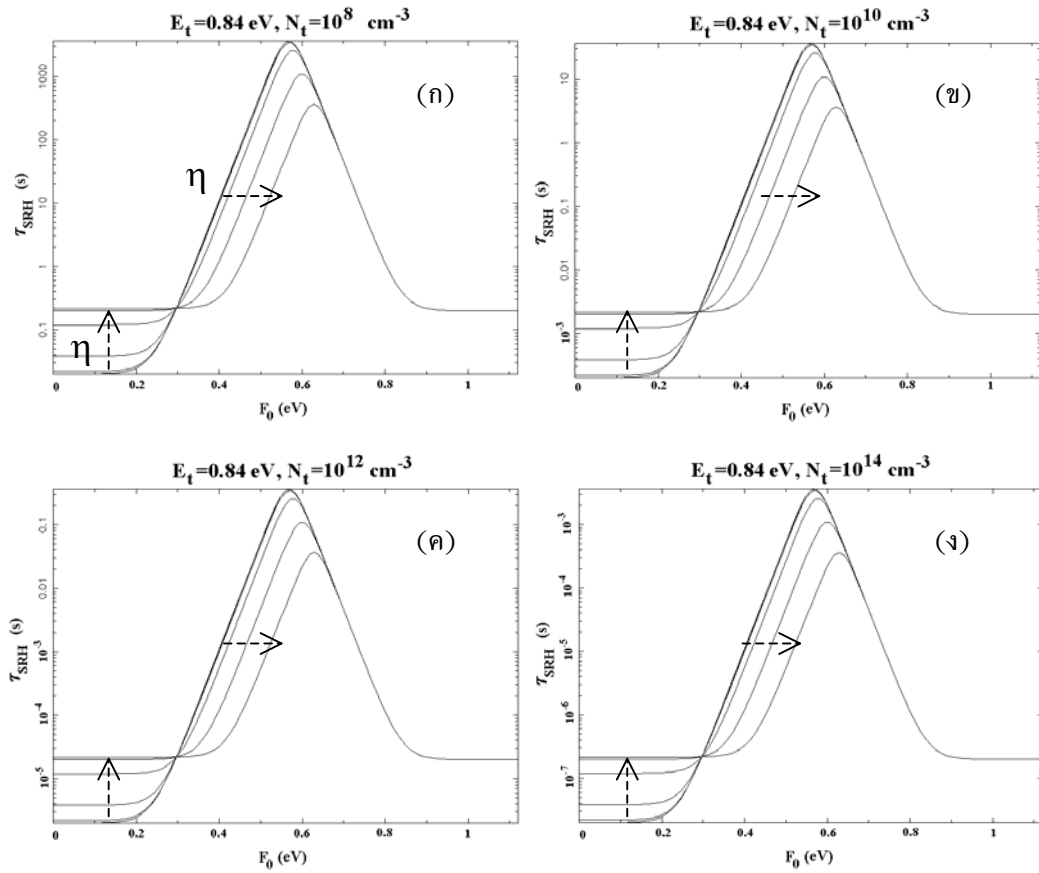
- ก) $p_0 = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ข) $p_0 = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ค) $p_0 = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
 ง) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ จ) $p_0 = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ช) $p_0 = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$



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

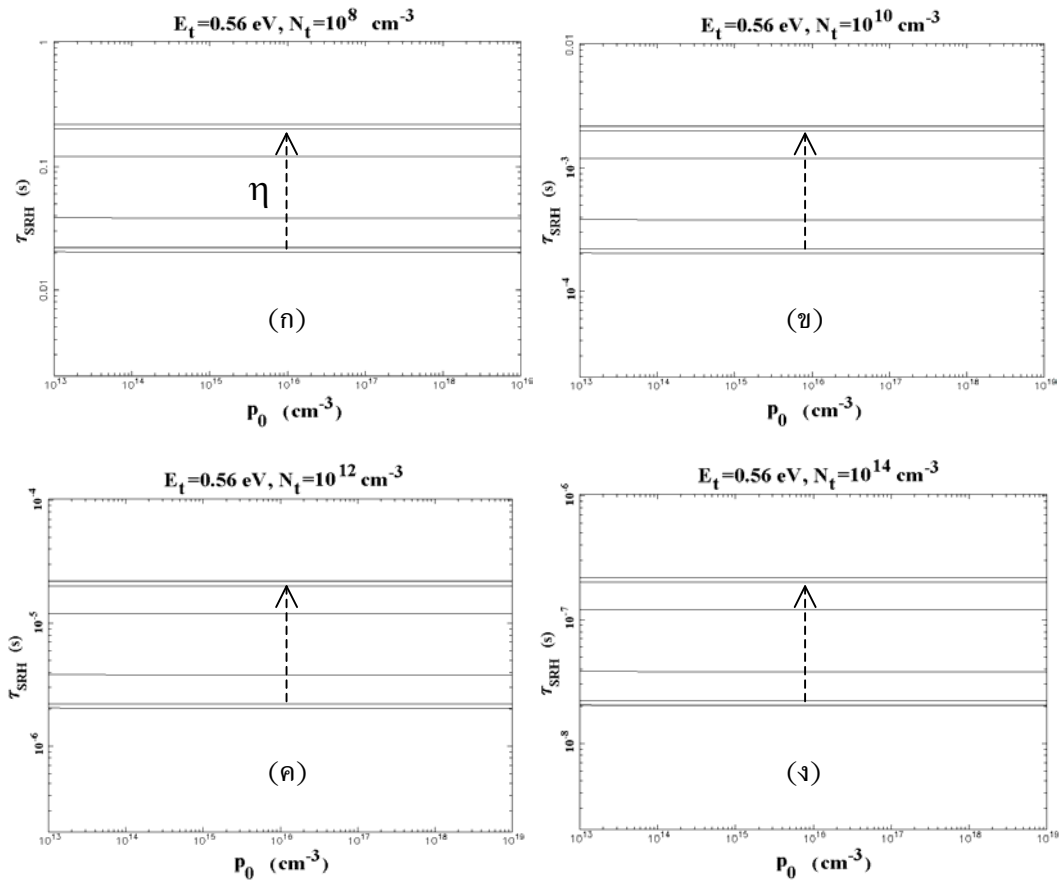
$$\tau = \tau_{p0} \exp[(E_i - F_0)/kT] \quad (6.7)$$

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



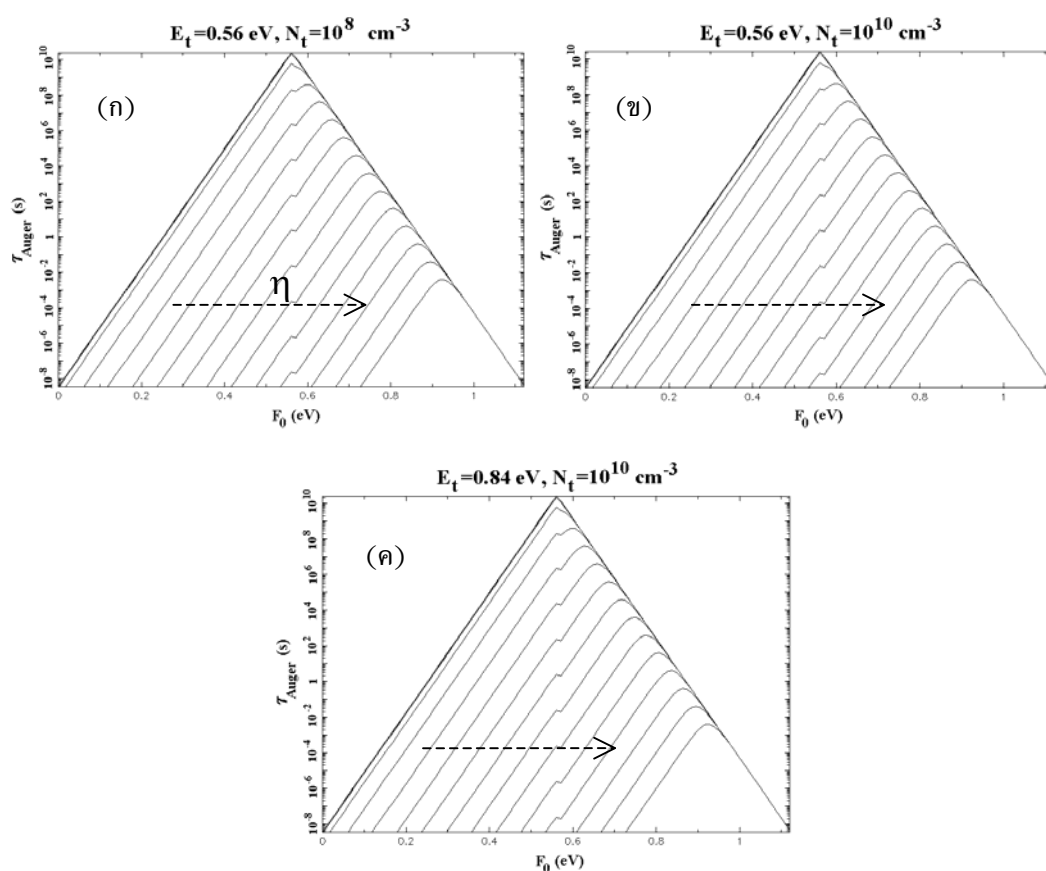
รูปที่ 6.27 แสดงผลของการโด๊ปพาหะข้างมากต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการ SRH เมื่อ $E_t = 0.56 \text{ eV}$

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



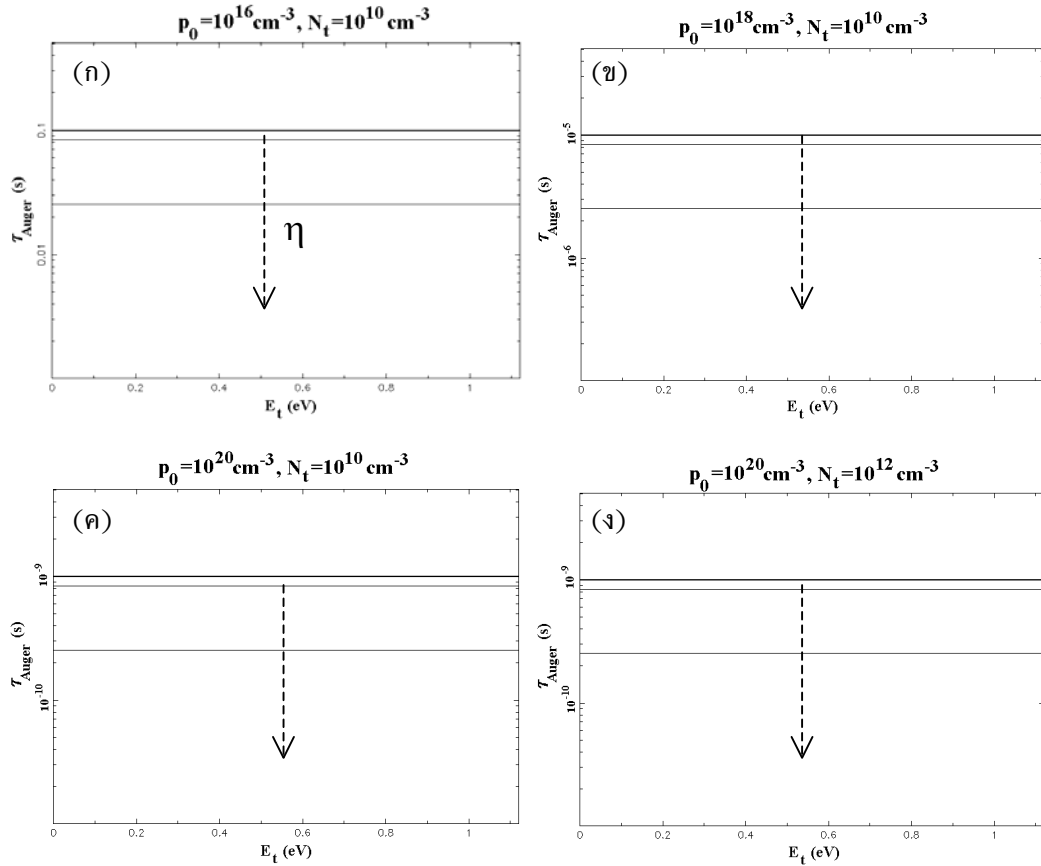
รูปที่ 6.28 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะในกระบวนการออเจอร์

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

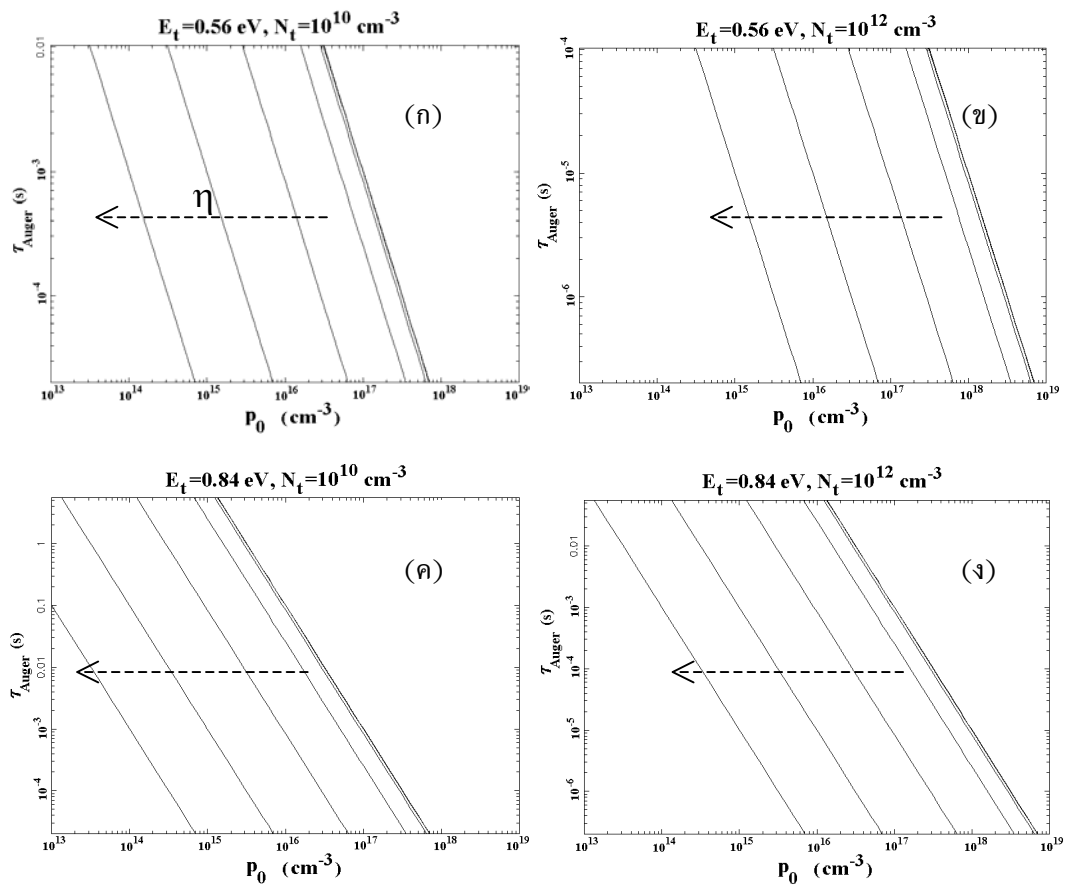
ก) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

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

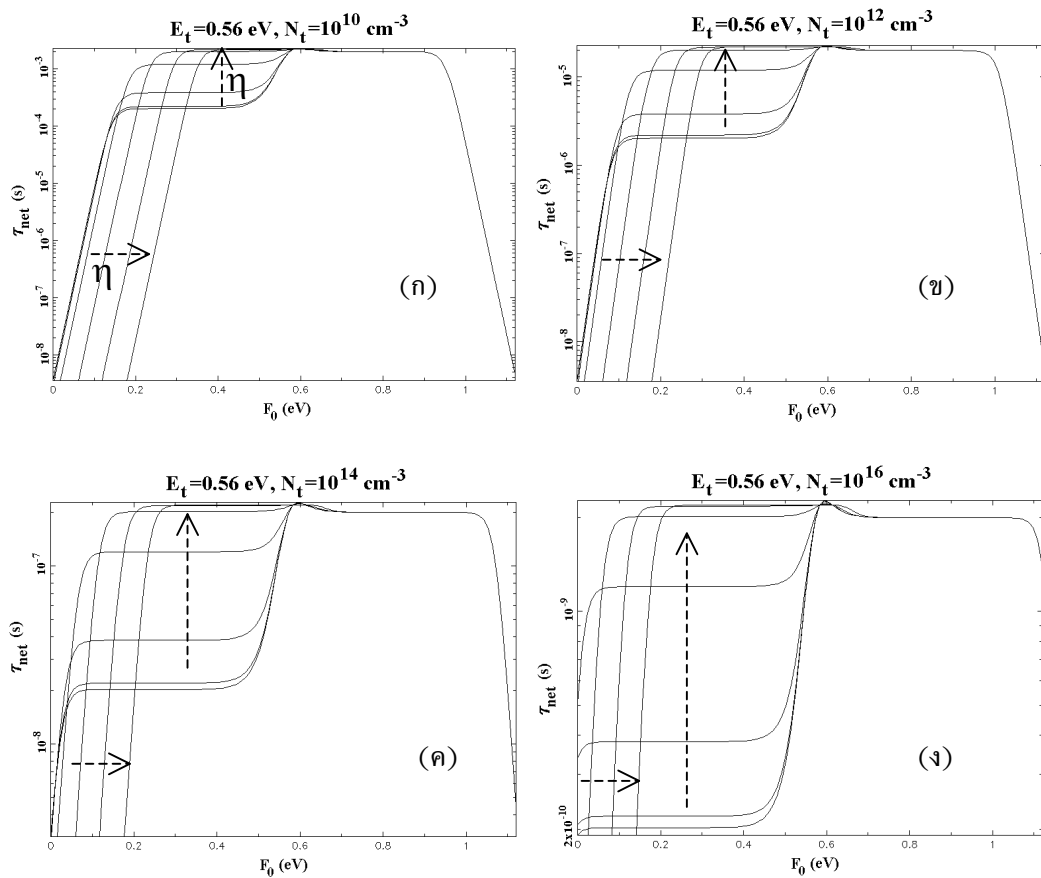
6.2.1.3 เวลาอายุการรวมตัวของพาหะรวม จะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ

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

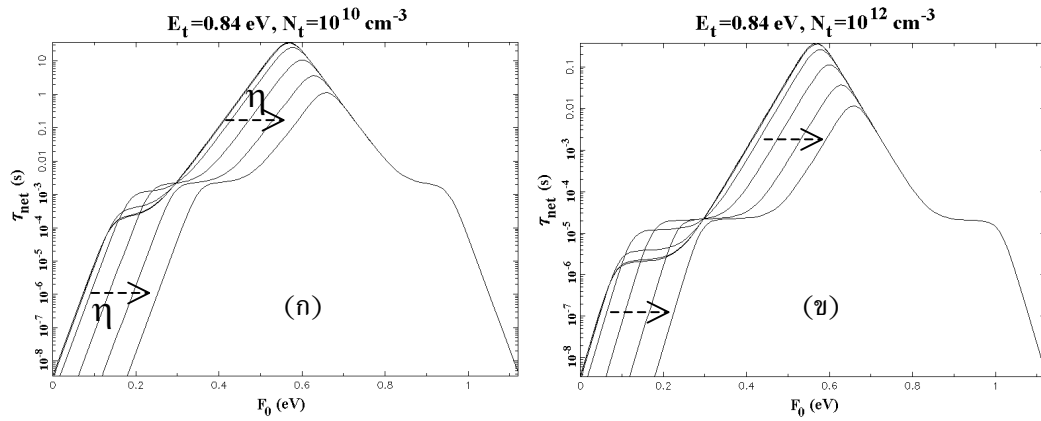
ก) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ข) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ค) $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

ง) $N_t = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

จะเห็นว่า เมื่อเวลาอายุของพาหะรวมจะมีค่ามากที่สุด เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน และเวลาอายุของพาหะรวมจะมีค่าน้อยลงเมื่อสารเจือปนมีปริมาณมากขึ้น เมื่อมีสารเจือปนที่มีระดับพลังงานสูงขึ้น เวลาอายุของพาหะก็จะน้อยลง ดังรูปที่ 6.32

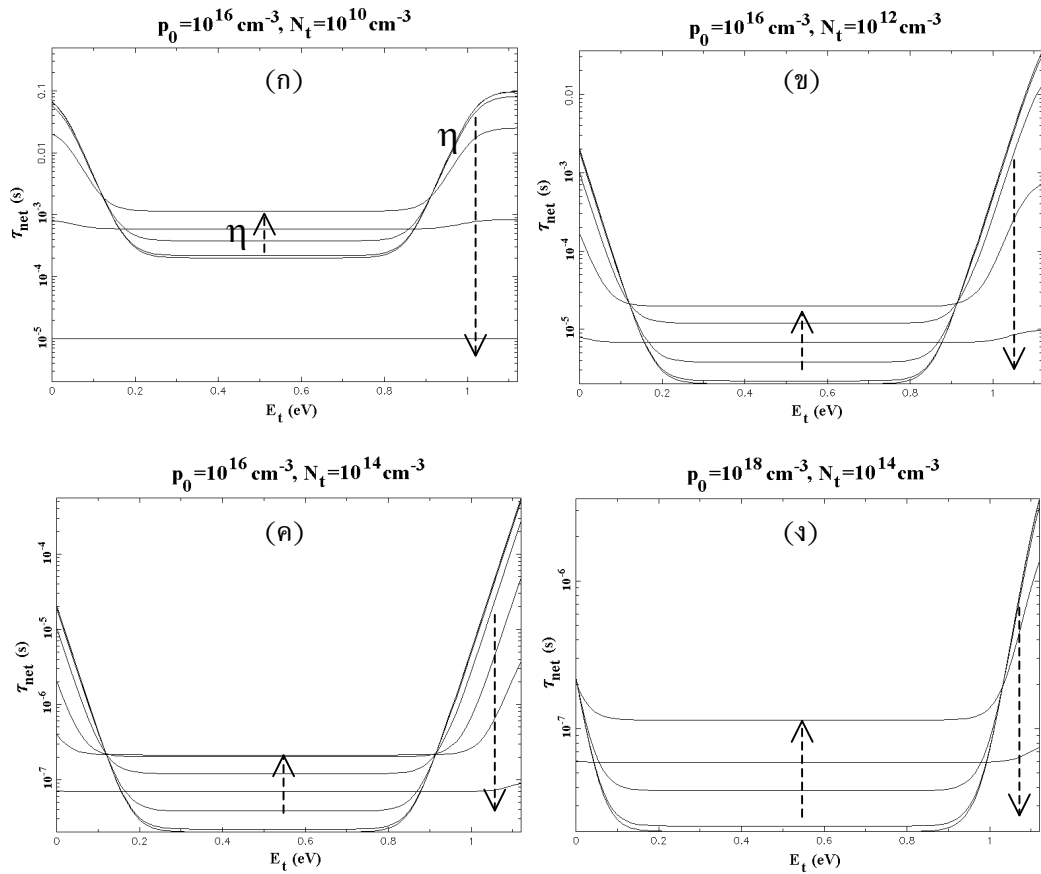


รูปที่ 6.32 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิต่อเวลาอายุของพาหะรวม ที่ $E_t = 0.84 \text{ eV}$

ก) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ข) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

หรืออาจจะพิจารณาจากรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.33 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่อเวลาอายุของพาหะรวม

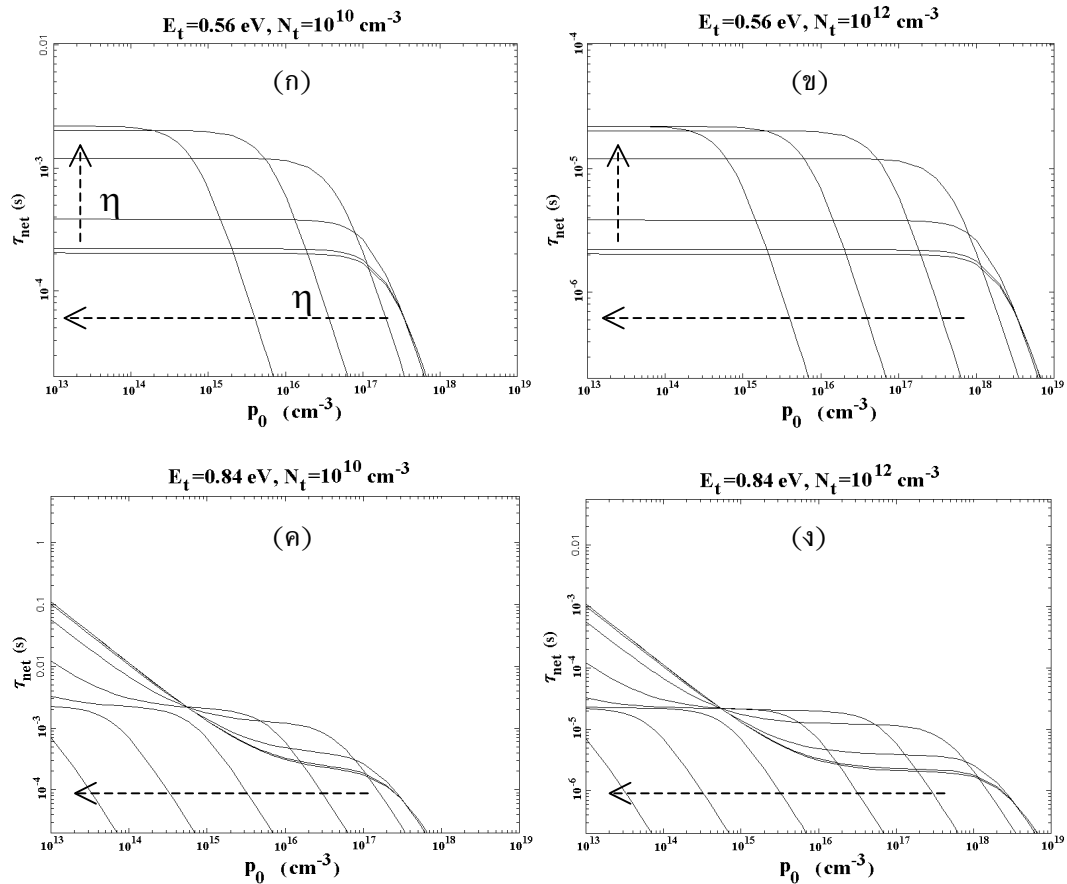
ก) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

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) $E_t = 0.56 \text{ eV}$, $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

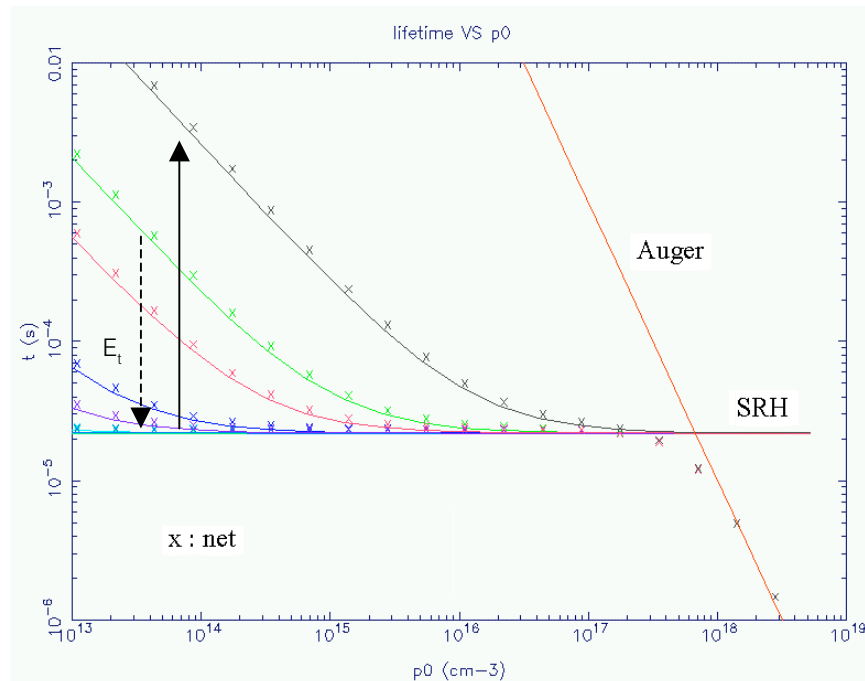
ข) $E_t = 0.56 \text{ eV}$, $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

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

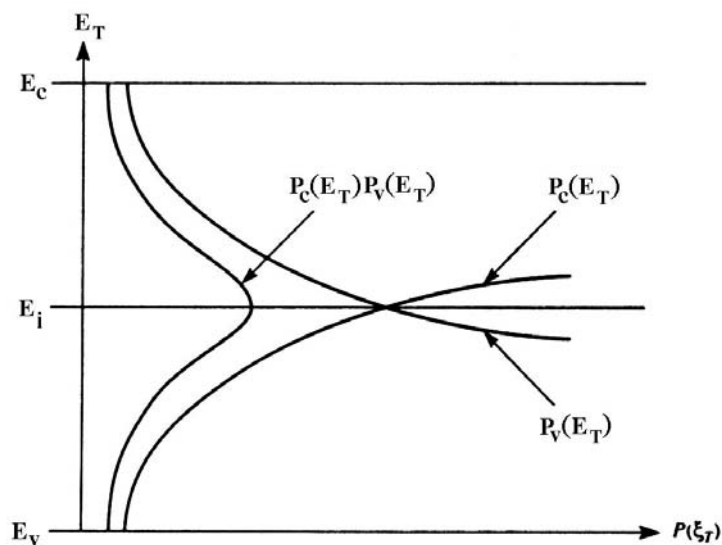
นำมาเขียนกราฟระหว่างเวลาอายุของพาหะข้างน้อย(τ_n)กับพาหะข้างมากชนิดพี(p_0) โดยเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างพลังงานตั้งแต่ 0 eV ถึง 1.12 eV จะเป็นดังรูปที่ 6.35



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



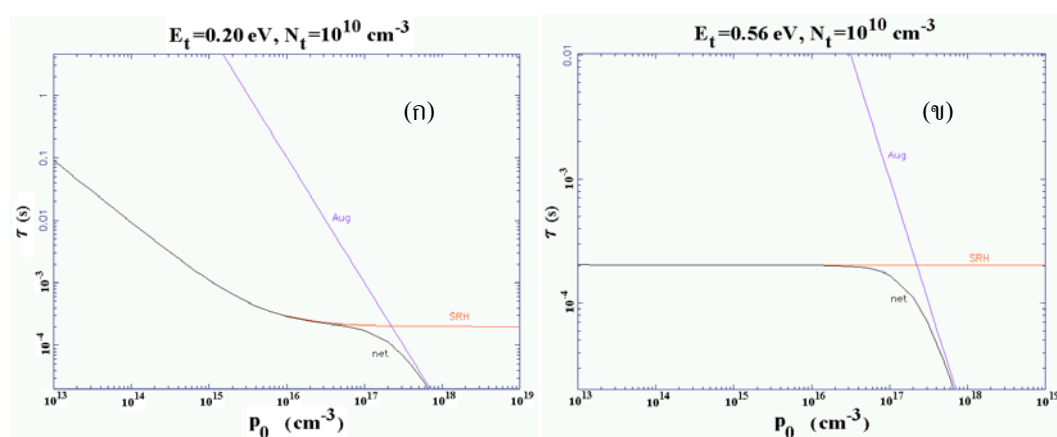
รูปที่ 6.36 แสดงความน่าจะเป็นที่จะเกิดการรวมตัวกันของพาหะที่บริเวณต่างๆของช่องว่างพลังงาน

$P_c(E_T)$ 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)



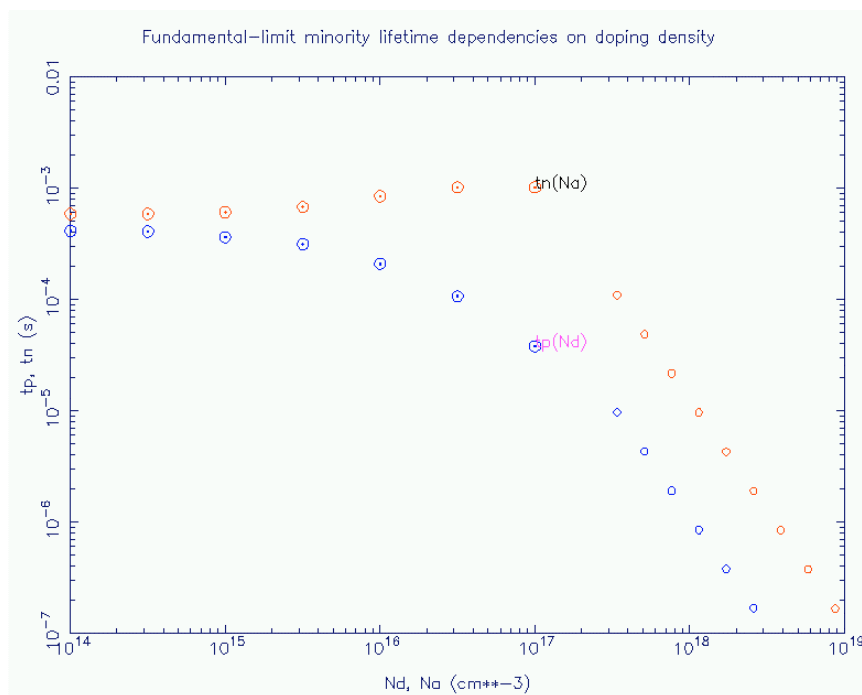
รูปที่ 6.37 แสดงผลของพลังงานแตรปที่มีต่อเวลาอายุการรวมตัวของพาหะเมื่อมีการโดปน้อยๆ

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)

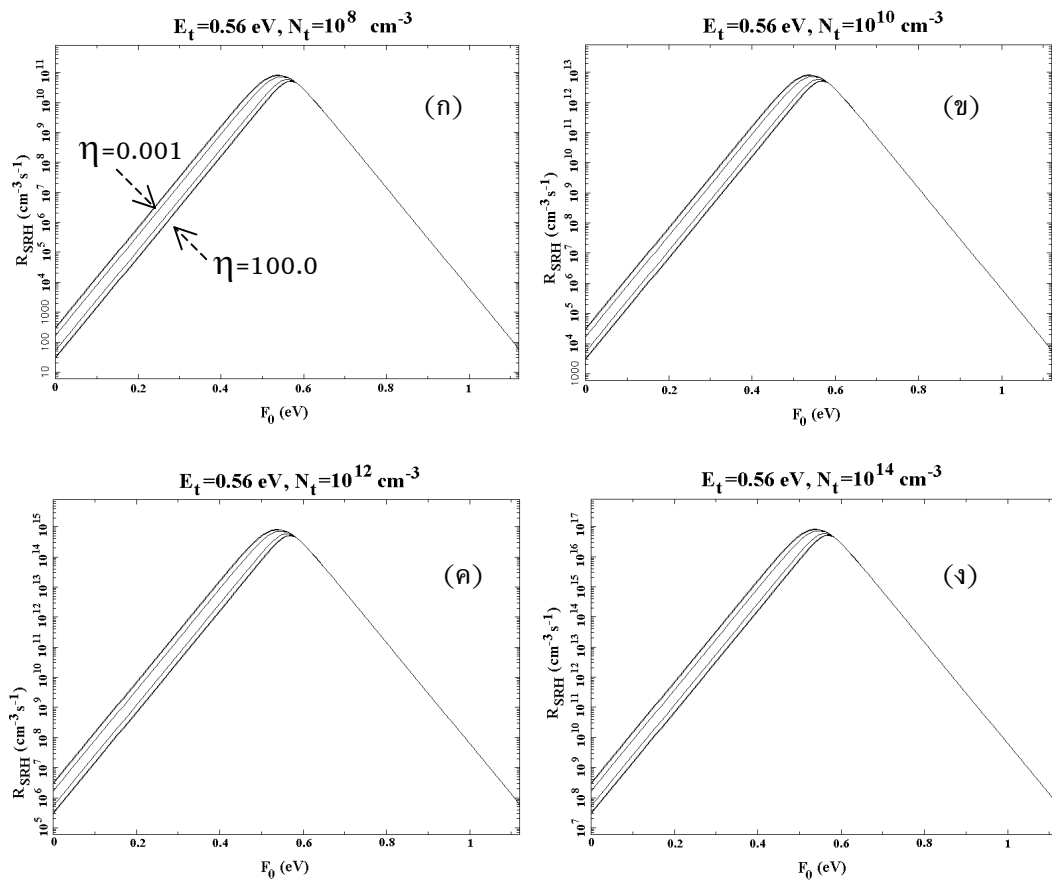
อัตราการรวมตัวของพาหะ มีหน่วยเป็น $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ จะพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ

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) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

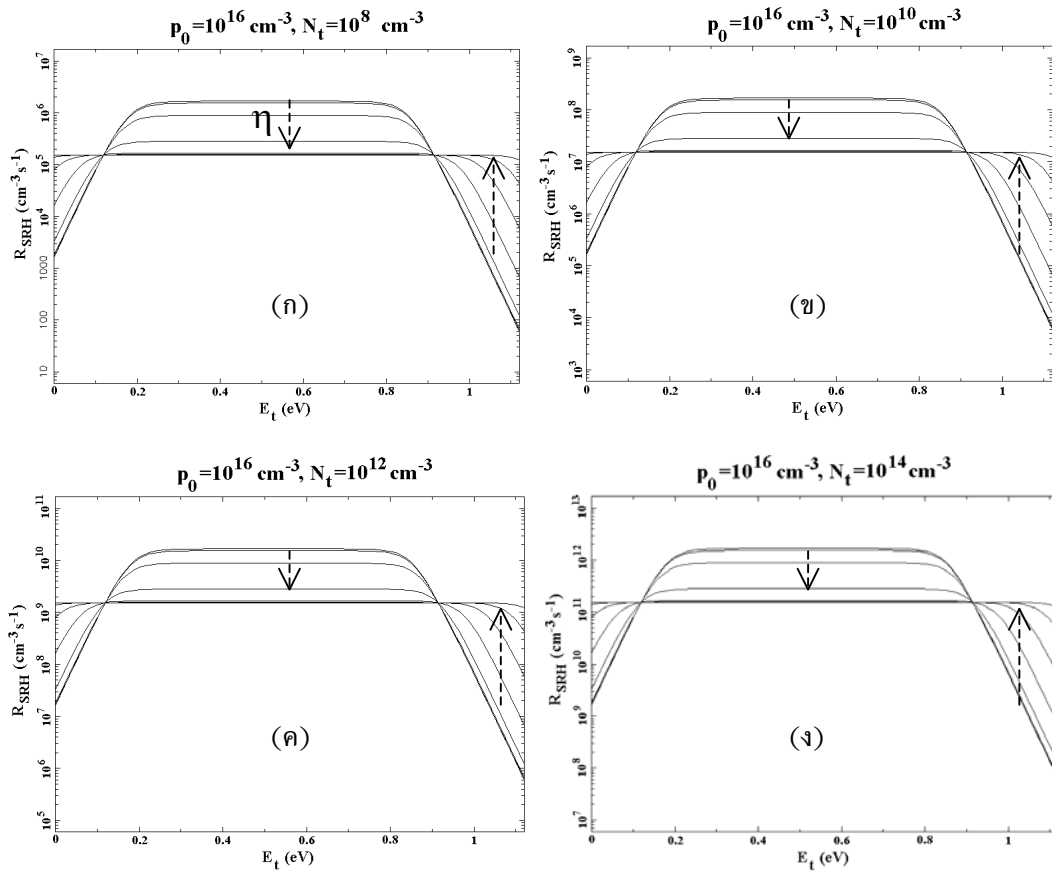
ค) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

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 เมื่อการเจือปนสูงขึ้นถึง $\eta > 100.0$ อัตราการรวมตัวของพาหะจะมีค่าเกือบเท่ากันตลอดช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 6.40 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

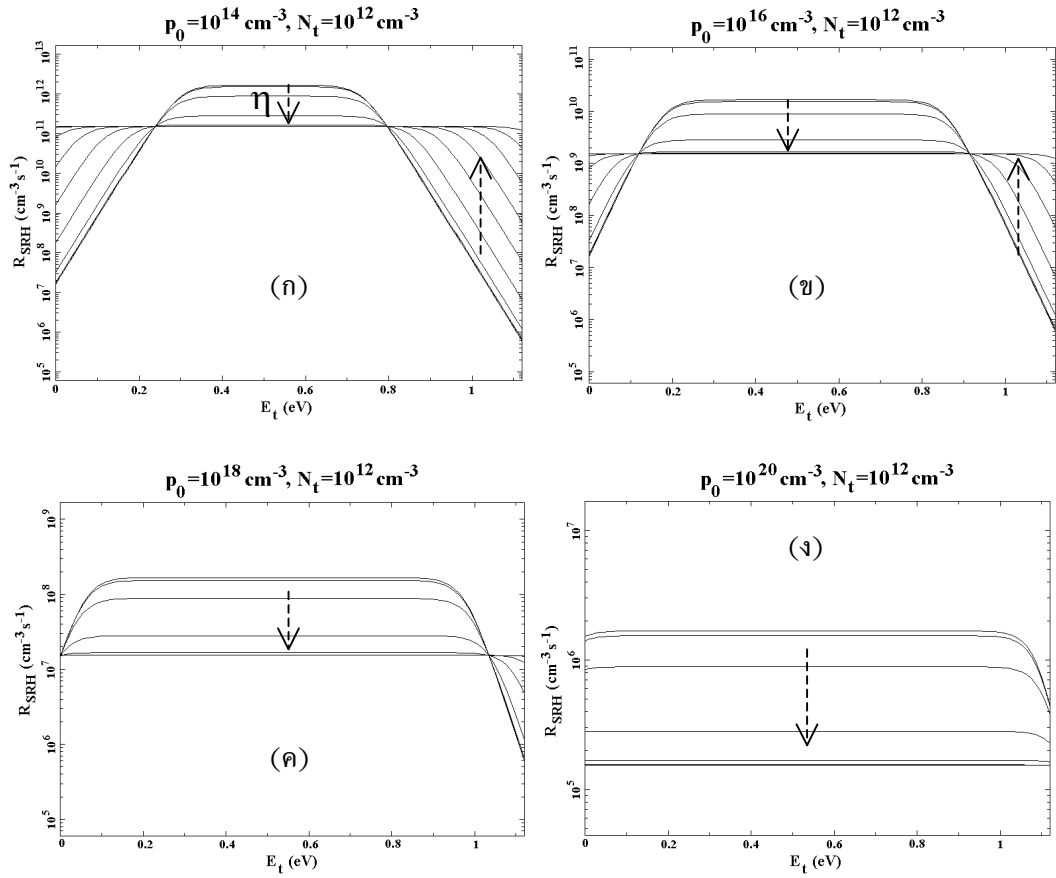
ก) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$

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 แต่มีปริมาณการโด๊ปต่างกัน จะเกิดอัตราการรวมตัวของพาหะดังรูปที่ 6.40 เมื่อมีการโด๊ปสูงขึ้น ในกระบวนการ SRH จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะน้อยลงไปเรื่อย ๆ



รูปที่ 6.41 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการ SRH มี $N_t=10^{12} \text{ cm}^{-3}$

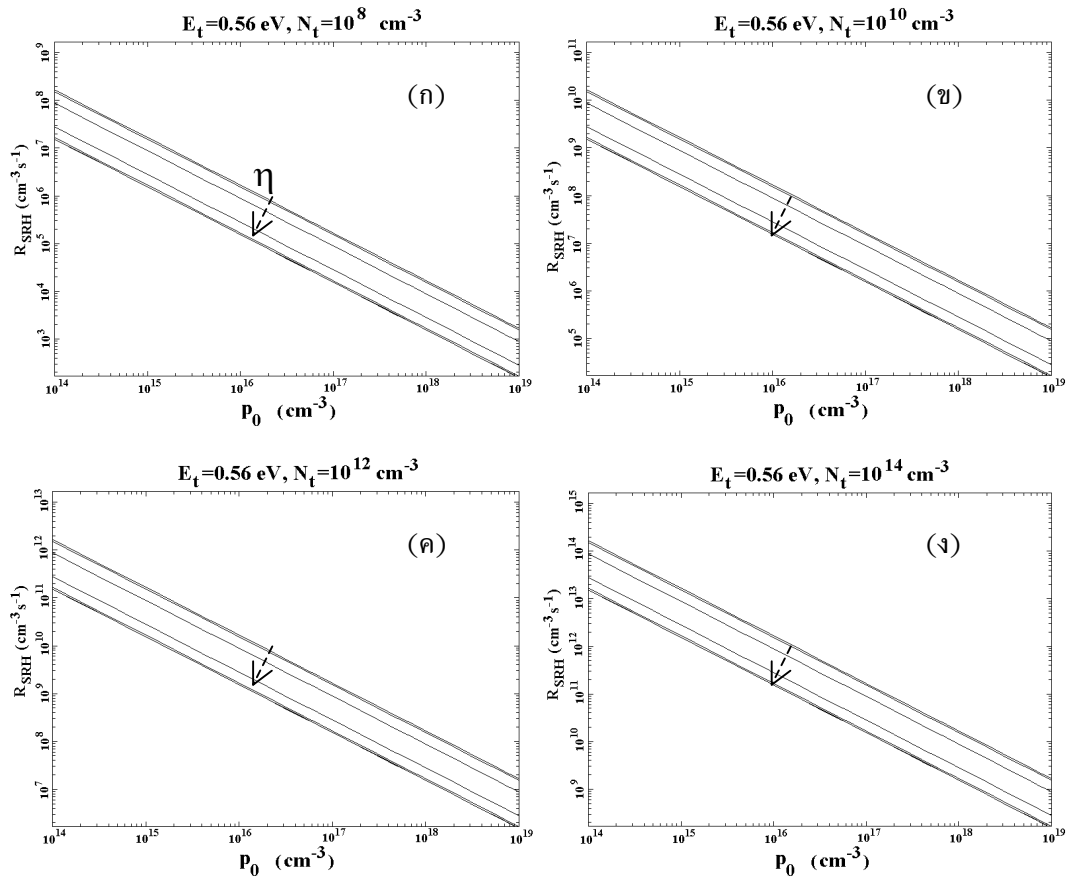
ก) $p_0=10^{14} \text{ cm}^{-3}$

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) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$

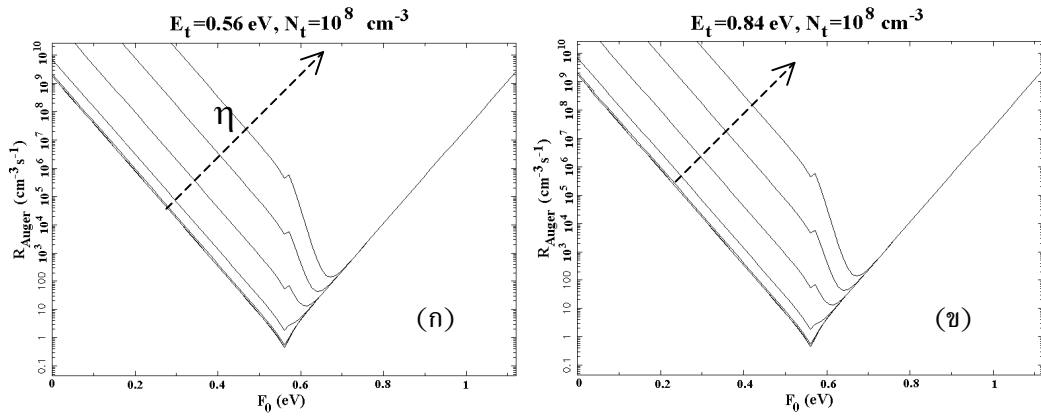
ข) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

ค) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

ง) $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

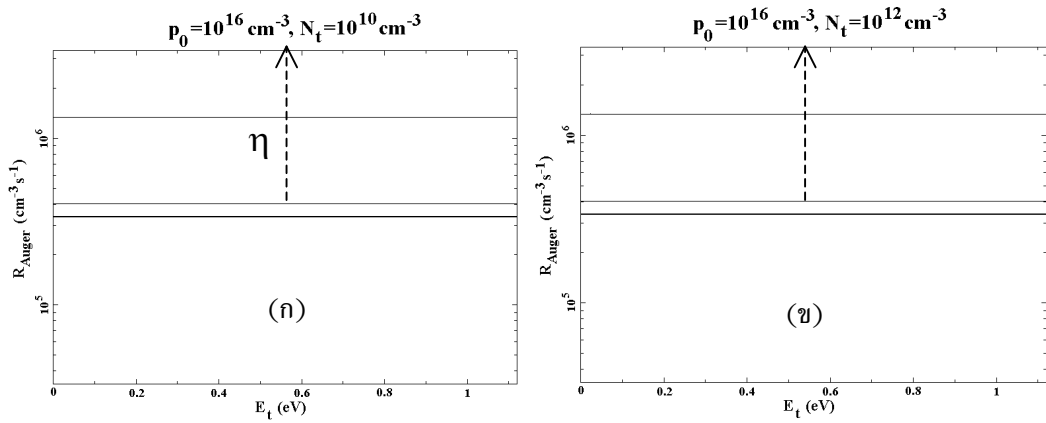
สำหรับอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการแบบออเจอร์ จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งระดับพลังงานเฟอร์มิ ดังรูปที่ 6.43

จากรูปที่ 6.44 อัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการแบบออเจอร์ จะไม่ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานและความหนาแน่นของสารเจือปน แต่จะขึ้นอยู่กับระดับการฉีดพาหะ(η)



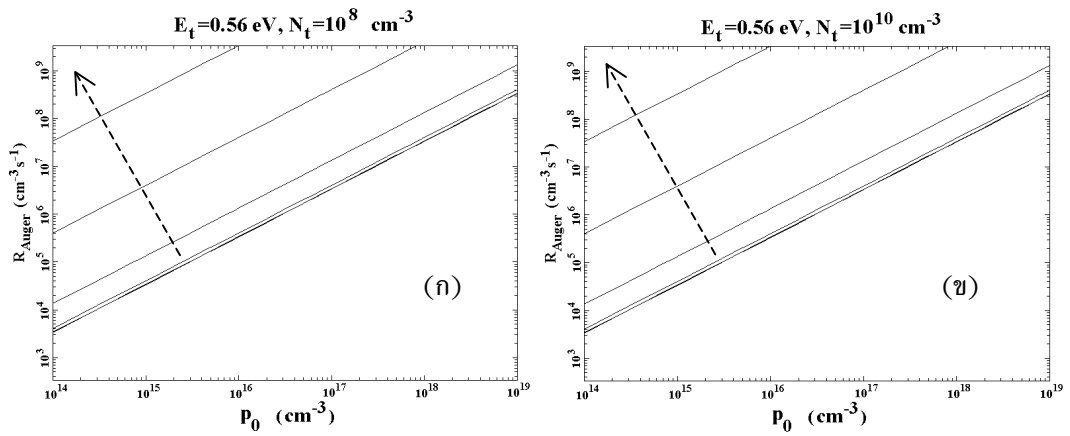
รูปที่ 6.43 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์

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) $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

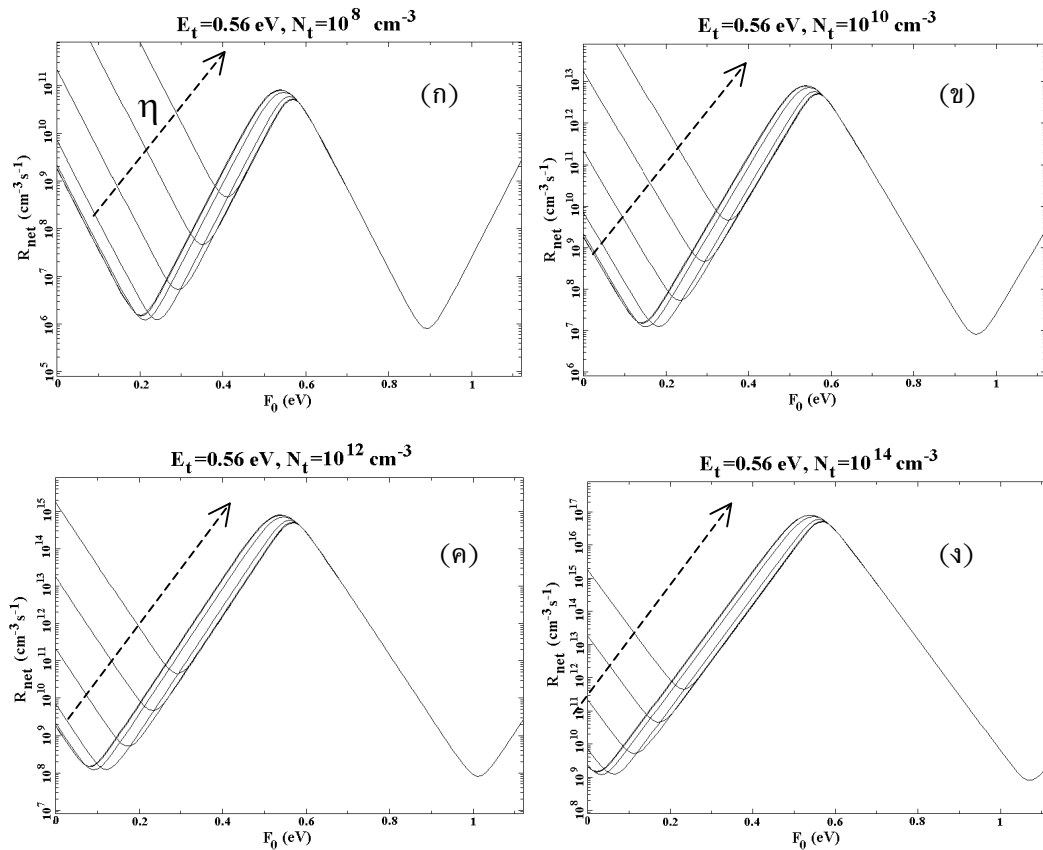


รูปที่ 6.45 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะในกระบวนการออเจอร์ ที่ $E_t = 0.56 \text{ eV}$

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) $N_t = 10^8$ cm⁻³

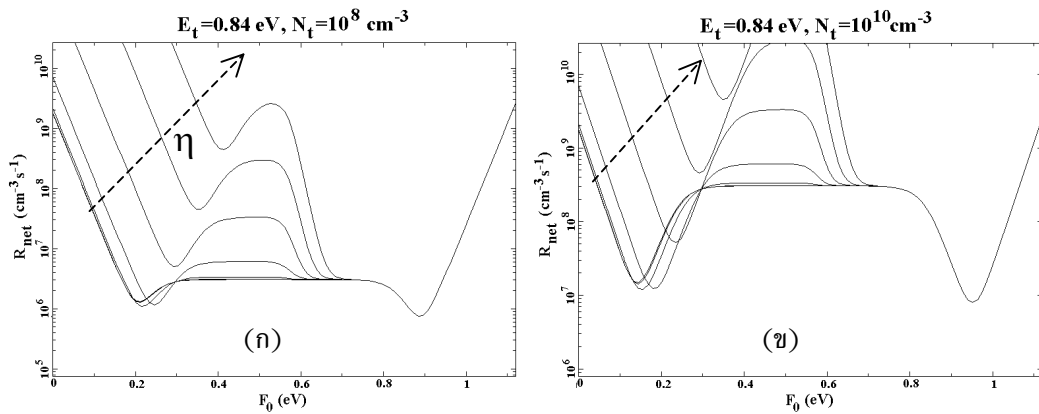
ข) $N_t = 10^{10}$ cm⁻³

ค) $N_t = 10^{12}$ cm⁻³

ง) $N_t = 10^{14}$ cm⁻³

หลังจากพิจารณาทั้งสองกระบวนการที่เกิดขึ้นแล้ว เมื่อมีการฉีดพาหะต่ำ ($\eta < 0.001$) จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะมากที่สุดในบริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน และจะมีค่าลดลงเมื่อระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่ห่างออกไปจากบริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน และถ้ามีการฉีดพาหะมากขึ้น อัตราการรวมตัวของพาหะบริเวณใกล้ๆ แถววาเลนซ์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

สำหรับสารเจือปนที่มีระดับพลังงานอื่นเช่น $E_t = 0.84$ eV เป็นต้น จะมีผลการจำลองแบบดังรูปที่ 6.47 เมื่อสารเจือปนที่มีระดับพลังงานเข้าใกล้ขอบของช่องว่างพลังงานมากขึ้น การฉีดพาหะต่ำๆ จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะในบริเวณ 0.3–0.8 eV เท่าๆ กัน แต่ถ้ามีการฉีดพาหะสูงขึ้นอัตราการรวมตัวของพาหะในแต่ละบริเวณจะแตกต่างกันไป



รูปที่ 6.47 แสดงค่าอัตราการรวมตัวของพาหะรวม มี $E_t = 0.84$ eV

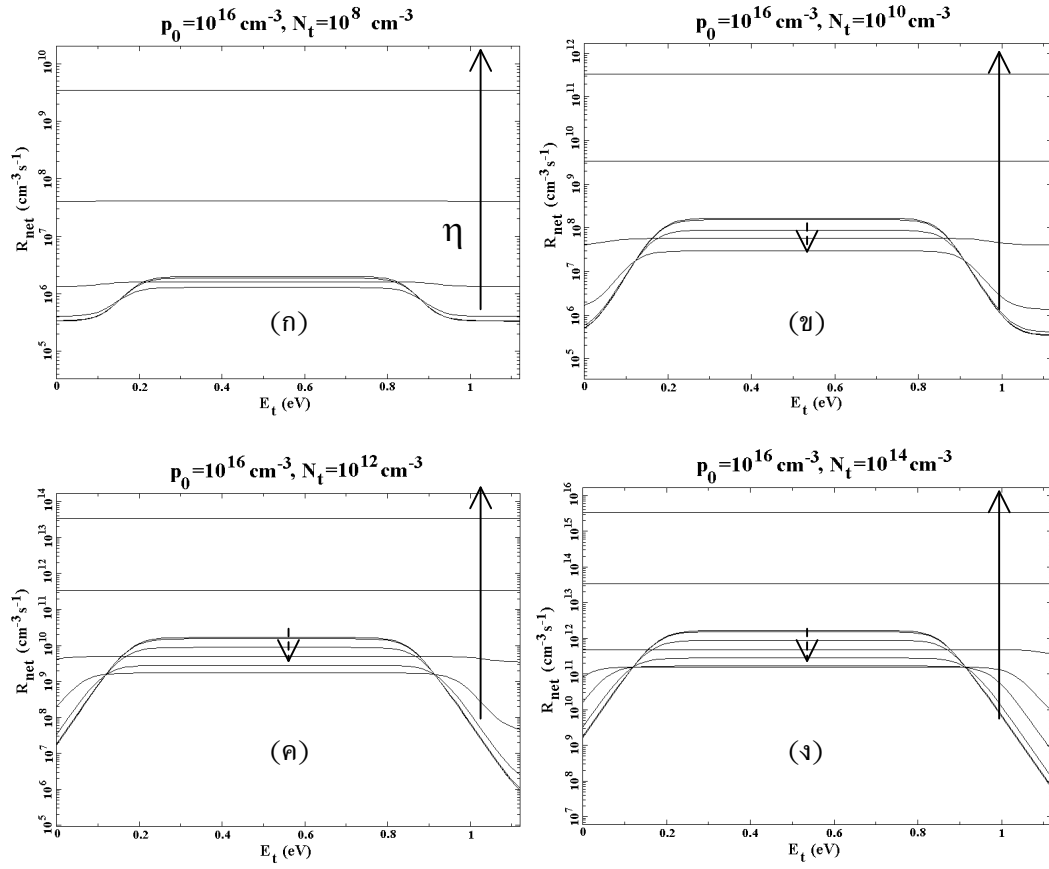
ก) $N_t = 10^8$ cm⁻³ ข) $N_t = 10^{10}$ cm⁻³

ผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่ออัตราการรวมตัวของพาหะ เมื่อ $p_0 = 10^{16}$ cm⁻³ ดังรูป 6.51 จะเห็นได้ว่า อัตราการรวมตัวของพาหะจะมีค่าเท่าๆกัน เมื่อระดับพลังงานสารเจือปนอยู่ระหว่าง 0.2–0.8 eV โดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีการฉีดพาหะต่ำๆ ($\eta < 0.001$) และจะมีค่าน้อยลงเมื่อมีการฉีดพาหะสูงขึ้นจนกระทั่งไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อ $\eta > 100.0$ เมื่อระดับพลังงานสารเจือปนเข้าใกล้ขอบของช่องว่างพลังงาน อัตราการรวมตัวของพาหะก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว

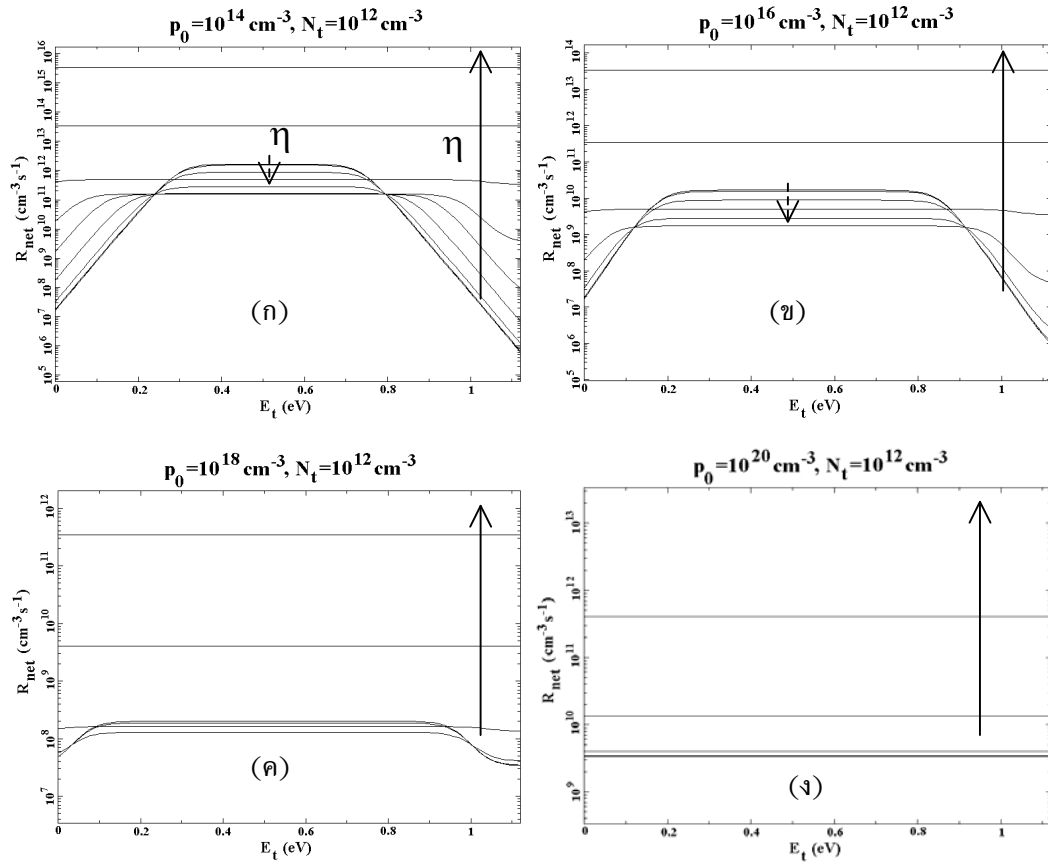
จากรูปที่ 6.48 ก)–ง) เมื่อสารเจือปนมีความหนาแน่นมากขึ้น อัตราการรวมตัวของพาหะก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

เมื่อมีการฉีดพาหะน้อยๆ ในบริเวณกลางช่องว่างพลังงานจะมีอัตราการรวมตัวของพาหะเท่าๆกัน เมื่อการฉีดพาหะเพิ่มขึ้น อัตราการรวมตัวของพาหะจะลดตามทฤษฎีเส้นประ และเมื่อการฉีดพาหะสูงๆ ($\eta > 100.0$) อัตราการรวมตัวของพาหะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามทฤษฎีเส้นทึบ สาเหตุเนื่องมาจากกระบวนการออเจอร์ที่มีพาหะส่วนเกินมาก ๆ นั้นเอง

และเช่นเดียวกัน เมื่อมีการโด๊ปด้วยพาหะข้างมากให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น และกำหนดให้สารเจือปนมีความหนาแน่น $N_t = 10^{10}$ cm⁻³ ปรากฏผลดังรูปที่ 6.49

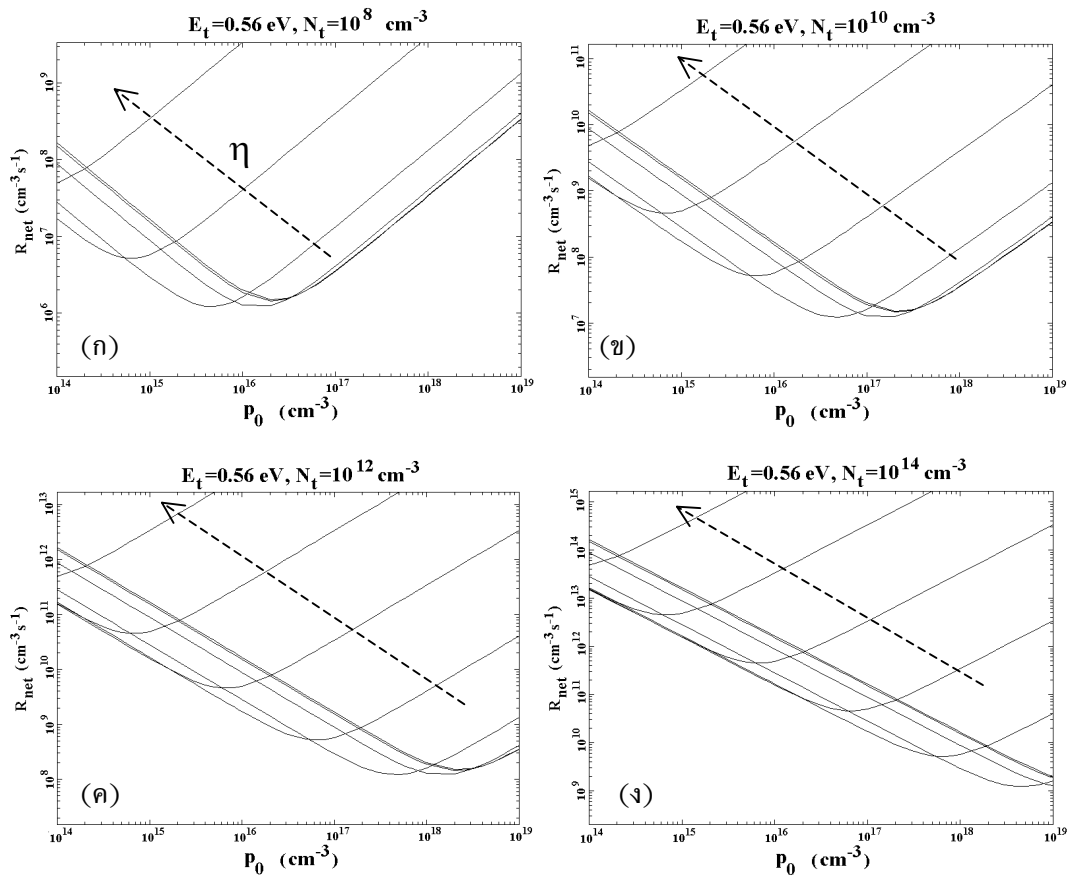


รูปที่ 6.48 แสดงผลของระดับพลังงานสารเจือปนต่ออัตราการรวมตัวของพาหะรวม ที่ $p_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 ก) $N_t = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ข) $N_t = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ค) $N_t = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ง) $N_t = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$



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) $p_0 = 10^{20}\text{ cm}^{-3}$

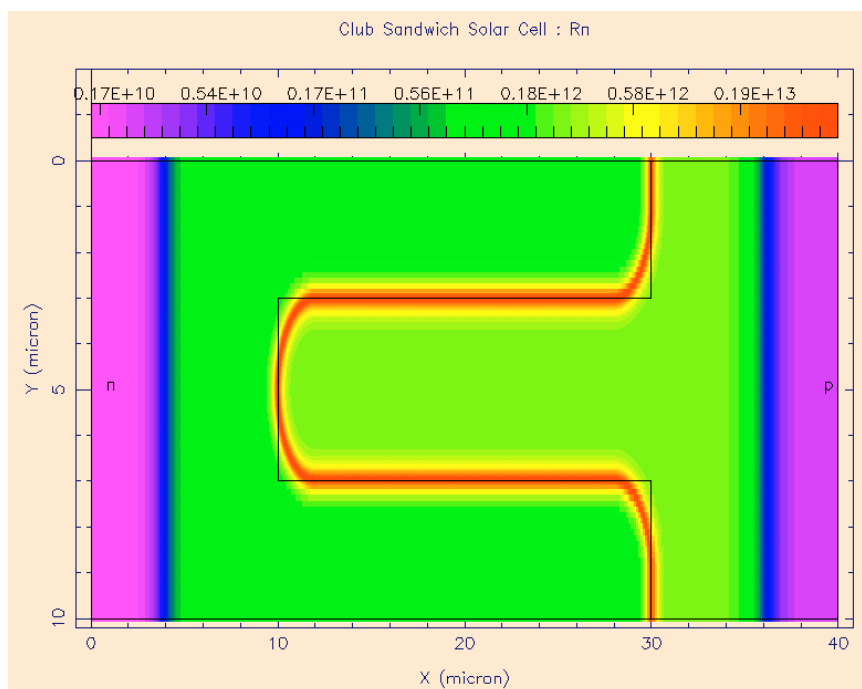
เมื่อพาหะข้างมากเพิ่มขึ้นและสารเจือปนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการรวมตัวของพาหะรวมเปลี่ยนไปดังรูปที่ 6.50



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 $^{-3}$

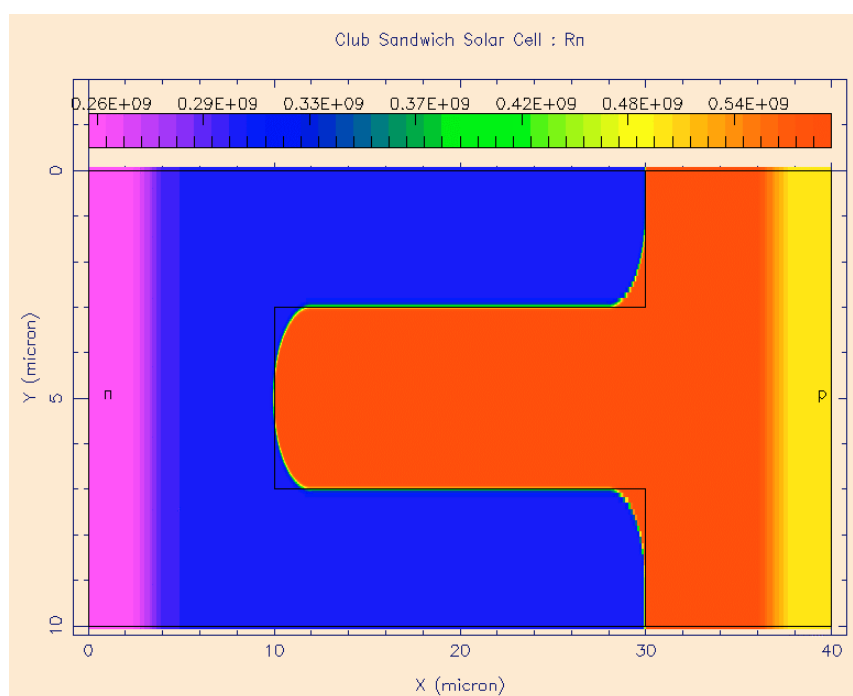
ความหนาแน่นของพาหะข้างมากจะมีผลทำให้อัตราการรวมตัวของพาหะเปลี่ยนแปลงและความหนาแน่นของสารเจือปนจะทำให้อัตราการรวมตัวของพาหะมีค่าน้อยลงด้วย นอกจากนี้เมื่อมีพาหะส่วนเกินมาก ๆ อัตราการรวมตัวของพาหะก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามทิศทางของลูกศร

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

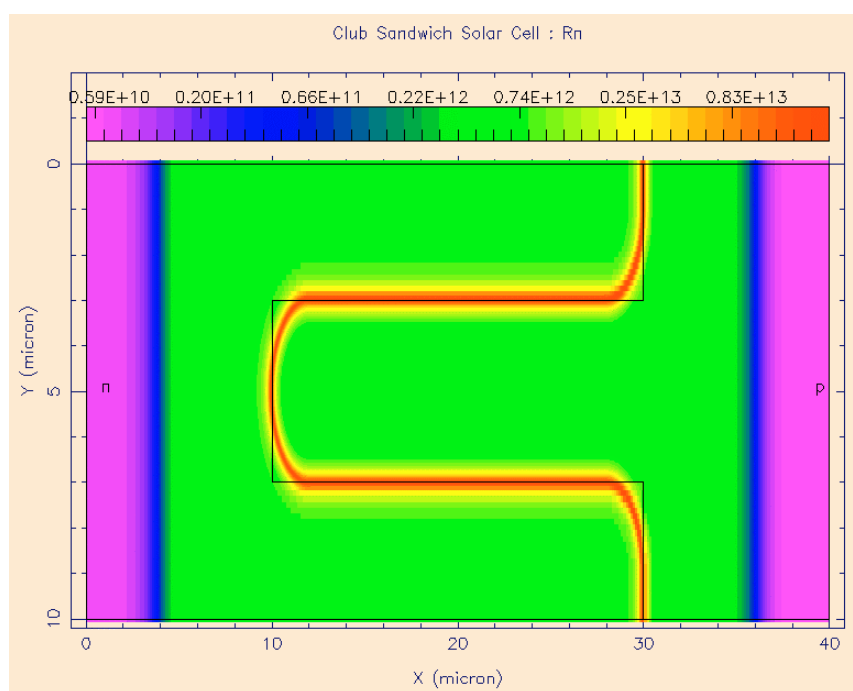
ที่ระดับความหนาแน่นของสารเจือปนเท่า ๆ กัน สารเจือปนที่มีระดับพลังงานใกล้เคียงของแถบพลังงาน จะมีอัตราการรวมตัวของพาหะน้อยกว่าสารเจือปนที่มีระดับพลังงานบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน

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

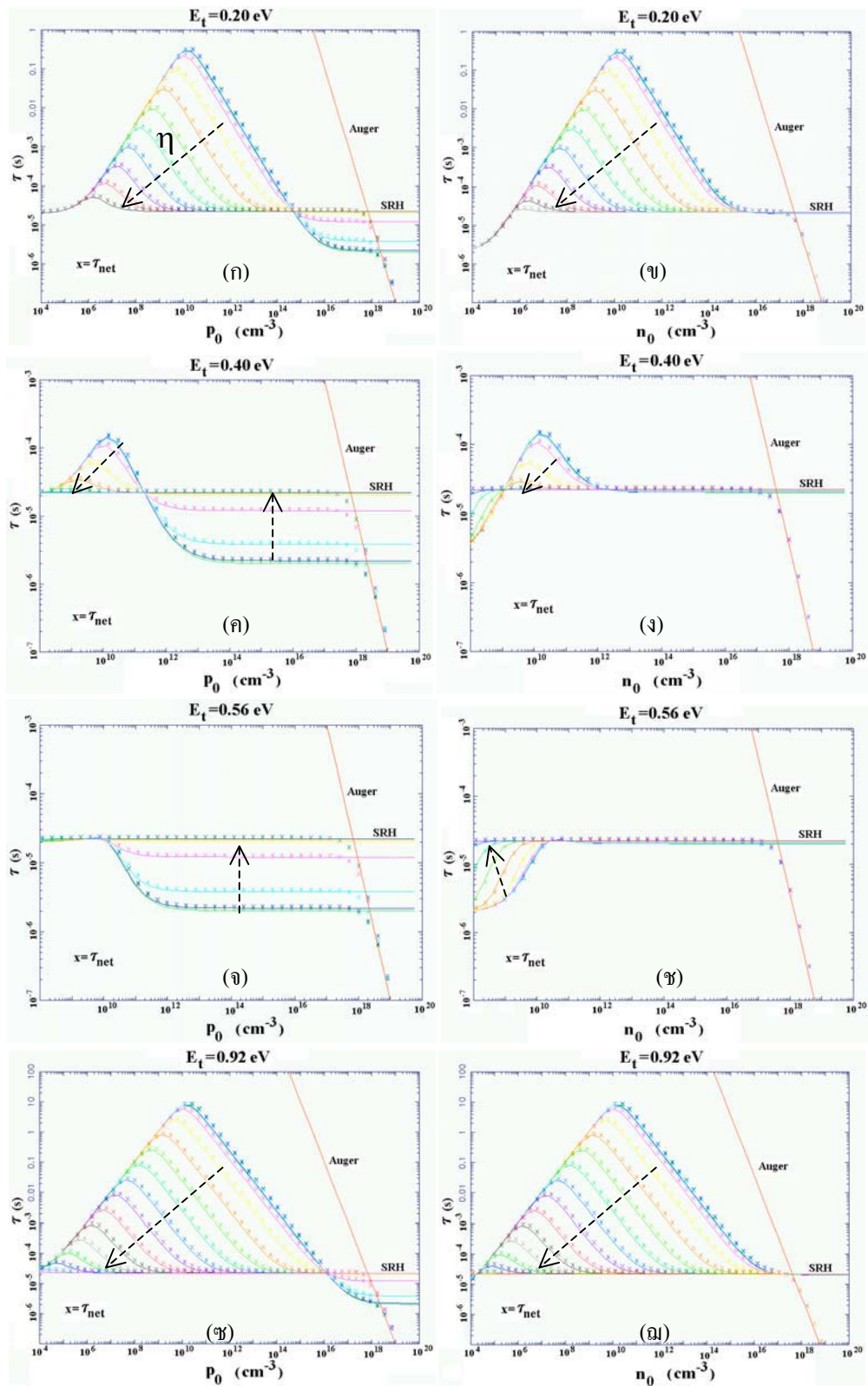


รูปที่ 6.53 แสดงค่าอัตราการรวมตัวรวมของพาหะจากข้อมูลที่สืบค้น

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 “แบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบคลับแซนด์วิช” (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 และการเพิ่มเวลาของการรวมตัวกันของพาหะให้นานขึ้นโดยการโดปสารกึ่งตัวนำไม่ให้สูงจนเกินไปและลดปริมาณของสารเจือปนที่ไม่ต้องการลงให้มากที่สุด 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

การหาชุดสมการเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลที่ได้จากการสับคั่นเป็นคู่อันดับ (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 และใช้วิธีนี้เนื่องจากเป็นการแก้ปัญหาคณិតที่แต่ละจุด 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($k_j - kold_j$) > MaxERROR THEN

MaxERROR = ABS($k_j - kold_j$)

END LOOP2

IF MaxERROR < epsilon THEN EXIT MainLOOP

END MainLOOP

เมื่อคำนวณค่า 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