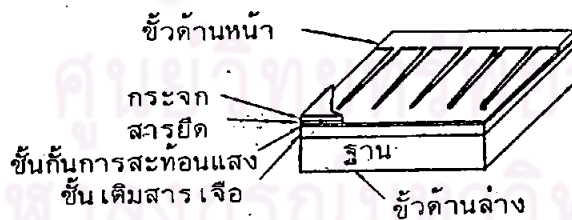


ทฤษฎีของ เซลแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic device) ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อป้อนให้แก่โหลด (load) ที่เหมาะสม<sup>(2)</sup> เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามวิธีการและวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์ได้ดังนี้คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็น แบบ Schottky barrier แบบ MIS แบบ SIS และแบบ Heterojunction

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำเดียวกัน

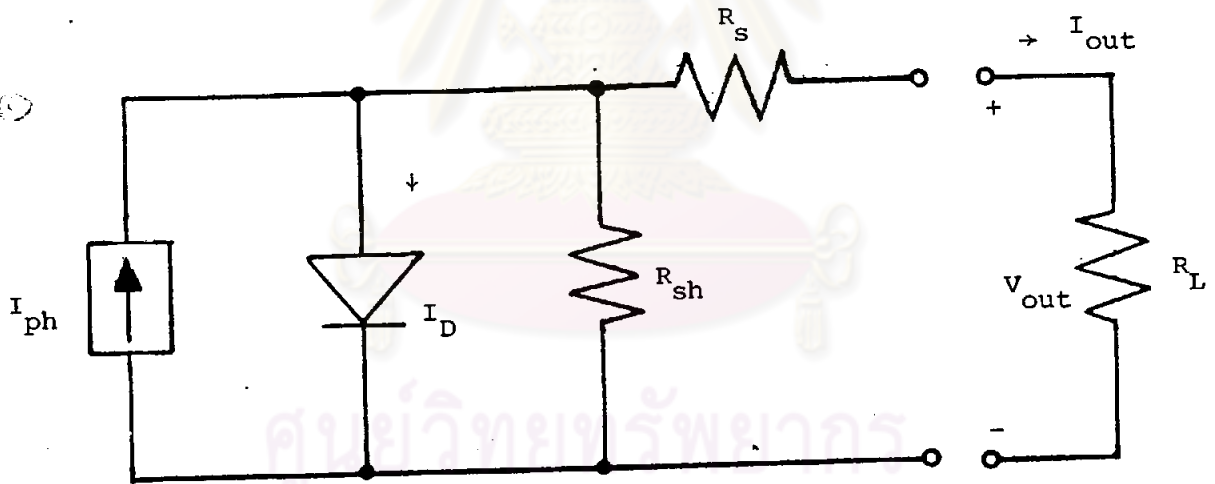
เซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็นที่ประดิษฐ์จากซิลิกอน แกลเลียมอาร์ซีไนด์ อินเดียมฟอสไฟด์ เป็นต้น โดยปกติแล้วหัวต่อจะเป็น เอ็นบนพีหรือพีบนเอ็นก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำเริ่มต้น แต่โดยทั่วไปชั้นรับแสงด้านบนจะต้องเติมสารเจือสูงมาก (heavily doped) และความลึกของหัวต่อ (junction depth) จะไม่เกิน 1 ไมครอน



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็น

### 2.1.1 วงจรสมมูลของ เซลแสงอาทิตย์ (Equivalent circuit) (2)

วงจรสมมูลของ เซลแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.2 มีตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า (current source) ซึ่งกระแสนี้คือกระแสโฟโต ( $I_{ph}$ ) จะมีทิศตรงข้ามกับกระแสไบแอสตาม (forward bias current) ของไดโอด ความต้านทานขนาน (shunt resistance) ซึ่งเขียนแทนด้วย  $R_{sh}$  เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของหัวต่อในกระบวนการเติมสารเจือตรงบริเวณที่มี dislocations หรือ grain boundaries หรือเกิดจากการเชื่อมต่อของโลหะระหว่าง microcracks grain boundaries หรือ defects ของผลึกสารกึ่งตัวนำขณะที่ทำขั้วโลหะของเซลล์ ความต้านทานอนุกรม (series resistance) ซึ่งเขียนแทนด้วย  $R_s$  เกิดจากความต้านทานของโลหะที่ใช้ทำขั้ว ความต้านทานของผิวสัมผัส (contact resistance) ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ กระแสมืด ( $I_D$ ) เป็นกระแสที่ไหลผ่านไดโอดขณะที่เซลล์ไม่ได้รับแสง



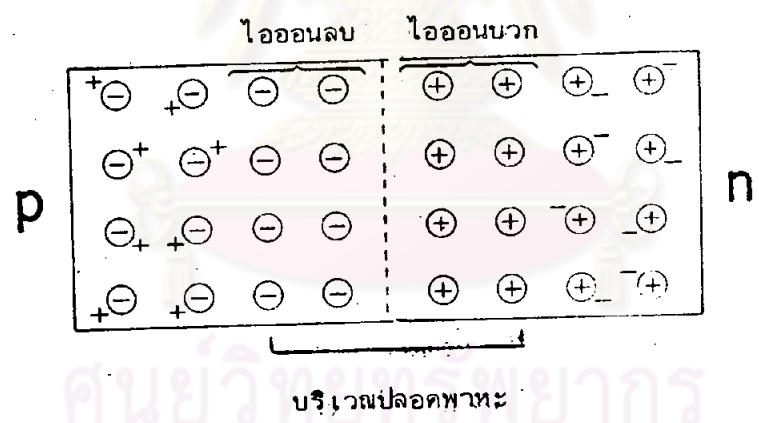
รูปที่ 2.2 เป็นวงจรสมมูลของ เซลแสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็น

จะได้ความสัมพันธ์ของปริมาณข้างต้นดังสมการที่ (2.1)

$$I_{ph} = I_{out} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) + I_D + \frac{V_{out}}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

2.1.2 การเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์แบบห้วต่อ พี-เอ็น (2) - (5)

[เมื่อพิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นภายในจะมีอิเล็กตรอน 1 ตัวอยู่คู่กับไอออนบวก (positive ion) ของอะตอมสารกึ่งตัวนำ 1 ไอออน ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีโฮล (hole) 1 ตัวอยู่คู่กับไอออนลบ (negative ion) ของอะตอมของสารกึ่งตัวนำ 1 ไอออน] เมื่อทำห้วต่อพี-เอ็นตรงบริเวณใกล้ ๆ ห้วต่อจะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นผ่านห้วต่อ (junction) มารวม (recombine) กับโฮลทางด้านพี และโฮลจากด้านพีก็จะเคลื่อนที่ผ่านห้วต่อไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น ยังผลให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้ามีทิศจากด้านพีมายังด้านเอ็นแล้ว เกิดภาวะสมดุลย์อันหนึ่ง กระแสไฟฟ้าจะหยุดไหลเนื่องจากการรวมตัวของพาหะ (carrier) ทั้งสองก่อให้เกิดบริเวณของไอออนบวกทางด้านเอ็นและบริเวณของไอออนลบทางด้านพี กลักับห้วต่อเรียกว่าบริเวณปลอดพาหะ (depletion layer) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดบริเวณปลอดพาหะในห้วต่อพี-เอ็น

บริเวณปลอดพาหะจะเกิดสนามไฟฟ้ามีทิศต้านการเคลื่อนที่ผ่านห้วต่อของพาหะที่เหลือทำให้พาหะหยุดเคลื่อนที่ผ่านห้วต่อซึ่งเกิดภาวะสมดุลย์อันหนึ่ง

เมื่อเอาเซลล์ ฯ มารับแสง ฯ จะเป็นตัวกำเนิดพาหะส่วนเกินขึ้นมาโดย เฉพาะชั้นของสารกึ่งตัวนำข้างบนจะมีพาหะเกิดขึ้นมาก พาหะที่เกิดขึ้นนี้จะถูกสนามไฟฟ้าจากบริเวณ

ปลดพาหะกวาดให้เคลื่อนที่ผ่านหัวต่อ เป็น เหตุให้ เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกมาจาก เซลแสงอาทิตย์

การเกิดพาหะเมื่อมีแสงตกกระทบเซลล์  $\tau$  สามารถ เขียนได้ดังสมการที่ (2.2) (2), (6)

$$G(\lambda) = \alpha(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) x) \quad (2.2)$$

โดยที่  $G(\lambda)$  เป็นอัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงมีความยาวคลื่น  $\lambda$   
ตกกระทบ

$\alpha(\lambda)$  เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเซลล์  $\tau$

$F(\lambda)$  เป็นจำนวนโฟตอน (photon) ที่ตกกระทบเซลล์  $\tau$  ต่อ  
หนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

$R(\lambda)$  เป็นอัตราการสะท้อนของแสงที่ผิวหน้าของเซลล์  $\tau$

$x$  เป็นระยะห่างจากผิวถึงจุดภายในเซลล์  $\tau$  ที่สนใจ

จากกระแสไฟโตซึ่ง เกิดจากพาหะสามารถ เขียน เป็นสมการการต่อเนื่อง

(continuity equation) ของพาหะส่วนน้อย (minority carrier) ได้ดังนี้ (2), (7)

สมการของโฮลด้าน เอ็น เขียน เป็น

$$\frac{1}{e} \frac{dJ_p}{dx} - G_p + \frac{1}{\tau_p} (p_n - p_{no}) = 0 \quad (2.3)$$

สมการของอิเล็กตรอนด้านพี เขียน เป็น

$$\frac{1}{e} \frac{dJ_n}{dx} + G_n - \frac{1}{\tau_n} (n_p - n_{po}) = 0 \quad (2.4)$$

กระแสจากโฮลด้าน เอ็น เป็น

$$J_p = e \mu_p p_n E - e D_p \frac{dp_n}{dx} \quad (2.5)$$

กระแสจากอิเล็กตรอนด้านพีเป็น

$$J_n = e n_p E + e D_n \frac{dn_p}{dx} \quad (2,6)$$

โดยที่

- $J_p$  เป็นความหนาแน่นของกระแสซึ่งเกิดจากโฮลในด้านเอ็น
- $J_n$  เป็นความหนาแน่นของกระแสซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนในด้านพี
- $G_p$  เป็นอัตราการเกิดโฮลในด้านเอ็น
- $G_n$  เป็นอัตราการเกิดอิเล็กตรอนในด้านพี
- $\tau_p$  เป็นช่วง เวลาชีวิตของโฮล
- $\tau_n$  เป็นช่วง เวลาชีวิตของอิเล็กตรอน
- $p_n$  เป็นจำนวนโฮลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในด้านเอ็น เมื่อแสงตกกระทบบเซล ฯ
- $p_{no}$  เป็นจำนวนโฮลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในด้านเอ็นก่อนแสงตกกระทบบเซล ฯ
- $n_p$  เป็นจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในด้านพีเมื่อแสงตกกระทบบเซล ฯ
- $n_{po}$  เป็นจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในด้านพีก่อนแสงตกกระทบบเซล ฯ
- $\mu_p$  เป็นความคล่องตัวของโฮลในด้านเอ็น
- $\mu_n$  เป็นความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในด้านพี
- $D_p$  เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮลในด้านเอ็น

$D_n$  เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนในด้านพี

$E$  เป็นสนามไฟฟ้าภายในเซลล์  $\tau$

$e$  เป็นประจุของอิเล็กตรอน =  $1.602 \times 10^{-16}$  คูลอมบ์

เพื่อจะหาคำตอบค่าเงื่อนไขขอบเขตและการประมาณค่าเงื่อนไขขอบเขตไว้เป็นกรณีต่าง ๆ คือ

1. กรณีที่ปริมาณสารเจือทั้งสองมีค่าสม่ำเสมอ (uniform)

การเติมสารเจือสม่ำเสมอทั้ง 2 ด้านจะไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกบริเวณปลอดพาหะเมื่อเซลล์  $\tau$  เป็นแบบเอ็นบีพีจะได้

$$D_p \frac{d^2}{dx^2} (p_n - p_{no}) + \alpha F(1-R) \exp(-\alpha x) - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} = 0 \quad (2.7)$$

จะได้คำตอบเป็น

$$(p_n - p_{no}) = A \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha F(1-R) \tau_p \exp(-\alpha x)}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \quad (2.8)$$

โดยที่

$L_p$  เป็นระยะในการแพร่ของโฮลในด้านเอ็น

$$L_p = \{ D_p \tau_p \}^{1/2}$$

ค่าเงื่อนไขขอบเขตคือ 1. ผิวหน้าจะเกิดการรวมตัว (recombination)

$$\text{ที่ } x = 0; D_p \frac{d(p_n - p_{no})}{dx} = S_p (p_n - p_{no}) \quad (2.9)$$

2. พาทะที่รอยต่อจะถูกสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะกวาดไปหมด

จะได้

$$p_n - p_{no} = 0 \quad (2.10)$$

จากค่าเงื่อนไขขอบเขตทั้ง 2 สามารถที่จะเขียนสมการ(2.8) ได้เป็น

$$(p_n - p_{no}) = \frac{\alpha F(1-R) \tau_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \left[ \frac{\left( \frac{S L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \sinh \frac{x_j - x}{L_p} + \exp(-\alpha x_j) \left( -\frac{S L_p}{D_p} \sinh \frac{x}{L_p} + \cosh \frac{x}{L_p} \right)}{\frac{S L_p}{D_p} \sinh \frac{x_j}{L_p} + \cosh \frac{x_j}{L_p}} - \exp(-\alpha x) \right] \quad (2.11)$$

จะได้กระแสโวลต์ดังนี้

$$J_p = \frac{eF(1-R)\alpha L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \left[ \frac{\left( \frac{S L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - \exp(-\alpha x_j) \left( -\frac{S L_p}{D_p} \cosh \frac{x_j}{L_p} + \sinh \frac{x_j}{L_p} \right)}{\frac{S L_p}{D_p} \sinh \frac{x_j}{L_p} + \cosh \frac{x_j}{L_p}} - \alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right] \quad (2.12)$$

การหากระแสอิเล็กตรอนซึ่งเกิดในชั้นฐาน (base) จากสมการ (2.4) และ

(2.6) มีเงื่อนไขขอบเขตเป็น

$$(n_p - n_{po}) = 0 \quad \text{ที่} \quad x = x_j + W \quad (2.13)$$

และ 
$$S_n (n_p - n_{po}) = -D_n \frac{d}{dx} (n_p - n_{po}), \text{ที่} \quad x = H \quad (2.14)$$

โดยที่

W เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

H เป็นความหนาของเซลล์

จากเงื่อนไขขอบเขตจะได้จำนวนอิเล็กตรอนส่วนเกินในด้านพีเป็น

$$\begin{aligned}
 n_p - n_{po} = & \frac{F(1-R)\tau_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \exp(-\alpha(x_j + W)) \left[ \cosh \frac{x - x_j - W}{L_n} - \exp(-\alpha(x - x_j - W)) \right. \\
 & - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left[ \cosh \frac{H - x_j - W}{L_n} - \exp(-\alpha(H - x_j - W)) \right]}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \frac{H - x_j - W}{L_n} + \cosh \frac{H - x_j - W}{L_n}} \sinh \frac{x - x_j - W}{L_n} \\
 & + \left. \frac{\sinh \frac{H - x_j - W}{L_n} + \alpha L_n \exp(-\alpha(H - x_j - W))}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \frac{H - x_j - W}{L_n} + \cosh \frac{H - x_j - W}{L_n}} \sinh \frac{x - x_j - W}{L_n} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

จะได้กระแสอิเล็กตรอนดังนี้

$$\begin{aligned}
 J_n = & \frac{eF(1-R) L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \exp\{-\alpha(x_j + W)\} \left[ \alpha L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left[ \cosh \frac{H - W - x_j}{L_n} - \exp(-\alpha(H - W - x_j)) \right]}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \frac{H - W - x_j}{L_n} + \cosh \frac{H - W - x_j}{L_n}} \right. \\
 & + \left. \frac{\sinh \frac{H - W - x_j}{L_n} + \alpha L_n \exp(-\alpha(H - W - x_j))}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \frac{H - W - x_j}{L_n} + \cosh \frac{H - W - x_j}{L_n}} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$



ส่วนกระแสซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าจากบริเวณปลอดพาหะกวาดเอาพาหะผ่านหัวต่อขณะที่มีแสงตกกระทบบนเซลล์ ซึ่งเรียกว่ากระแส drift ดังสมการ (2.17)

$$J_{dr} = eF (1-R) \exp(-\alpha x_j) \{ 1 - \exp(-\alpha W) \} \quad (2.17)$$

กระแสลัดวงจรก็จะ เป็นผลรวมของกระแสทั้ง 3 นี้คือผลบวกของสมการ (2.12) (2.16) และ (2.17)

กระแส injection เกิดจากอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่จากด้านเอ็นผ่านบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้า (potential barrier) เข้าไปในด้านพีด้วยการแพร่และ drift จะเกิดการรวมตัวตรงบริเวณผิวหรือภายในเนื้อเซลล์ (bulk) กระแสนี้ส่วนหนึ่งเกิดจากโฮลฉีดจากด้านพีมายังด้านเอ็น สามารถที่จะใช้สมการ (2.3) (2.4) โดยไม่มีเทอมอัตราการเกิดพาหะ ( $G_n, G_p$ ) สมการ (2.5) และ (2.6) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$\text{ที่ } x = 0; p_n = p_{no} \exp(eV_j/kT) \quad (2.18)$$

$$\text{ที่ } x = x_j + W; n_p = n_{po} \exp(eV_j/kT) \quad (2.19)$$

$$\text{ที่ } x = 0; S_p(p_n - p_{no}) = D_p \frac{d}{dx}(p_n - p_{no}) - \mu_p p_n E_p \quad (2.20)$$

$$\text{ที่ } x = H; S_n(n_p - n_{po}) = -D_n \frac{d}{dx}(n_p - n_{po}) - \mu_n n_p E_n \quad (2.21)$$

โดยที่  $S_p$  เป็นความเร็วในการรวมตัวที่ผิวด้านเอ็นของโฮล

$S_n$  เป็นความเร็วในการรวมตัวที่ผิวด้านพีของอิเล็กตรอน

$V_j$  เป็นแรงดันคร่อมหัวต่อเมื่อมีการไบอัส

$k$  เป็นค่าคงที่ของ Boltzmann =  $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV}^\circ\text{K}$



$E_p$  เป็นสนามไฟฟ้าด้านพี

$E_n$  เป็นสนามไฟฟ้าด้านเอ็น

จะได้  $J_{inj} = J_0 (\exp(eV_j/kT) - 1)$  (2.22)

โดยที่  $J_0 = \frac{eD_p n_i^2}{L_p N_d} \left[ \frac{(S_p L_p / D_p) \cosh(x_j / L_p) + \sinh(x_j / L_p)}{(S_p L_p / D_p) \sinh(x_j / L_p) + \cosh(x_j / L_p)} \right]$   
 $+ \frac{eD_n n_i^2}{L_n N_a} \left[ \frac{(S_n L_n / D_n) \cosh(H - x_j - W) / L_n + \sinh(H - x_j - W) / L_n}{(S_n L_n / D_n) \sinh(H - x_j - W) / L_n + \cosh(H - x_j - W) / L_n} \right]$  (2.23)

2. กรณีที่สนามไฟฟ้าภายใน เซมิคอนดักเตอร์

สนามไฟฟ้าสามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปของความชันของขอบแถบพลังงาน (band edge) ได้เป็น

$$E = \frac{1}{e} \frac{dE_c}{dx} = \frac{1}{e} \frac{dE_v}{dx}$$

$$= \frac{D}{\mu N} \frac{dn}{dx}$$

โดยที่  $E_c$  เป็นค่าของคอนดักชันแบนด์

$E_v$  เป็นค่าของวาเลนซ์แบนด์

$N$  เป็นความหนาแน่นของอะตอมของสาร เจือที่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน

(ionized) จากสมการ (2.3) และ (2.5) จะได้กระแสโฟโตในด้านเอ็นเป็น

$$\frac{d}{dx} \left( D_p \frac{dp_n}{dx} \right) - \frac{d}{dx} (\mu_p p_n E) + \alpha F (1-R) \exp(-\alpha x) - \frac{1}{\tau_p} (p_n - p_{no}) = 0 \quad (2.24)$$

เงื่อนไขขอบเขต เป็น

$$\text{ที่ } x = 0; \quad D_p \frac{dp_n}{dx} - \mu_p p_n E = S_p (p_n - p_{no}) \quad (2.25)$$

$$\text{ที่ } x = x_j; \quad p_n - p_{no} = 0 \quad (2.26)$$

$$\text{จะได้ } J_p = \frac{eF(1-R)\alpha L_{pp}}{(\alpha + E_{pp})^2 L_{pp}^2 - 1} \left[ \frac{(\alpha + E_{pp}) L_{pp} \exp(E_{pp} x_j) - \exp(x_j (L_{pp}^{-1} - \alpha))}{\left( \frac{S_p L_{pp}}{D_p} + E_{pp} L_{pp} \right) \sinh \frac{x_j}{L_{pp}} + \cosh \frac{x_j}{L_{pp}}} \right. \\ \left. + \frac{\left( \frac{S_p L_{pp}}{D_p} + E_{pp} L_{pp} \right) \exp(E_{pp} x_j) - \exp(x_j (L_{pp}^{-1} - \alpha))}{\left( \frac{S_p L_{pp}}{D_p} + E_{pp} L_{pp} \right) \sinh \frac{x_j}{L_{pp}} + \cosh \frac{x_j}{L_{pp}}} - \exp(-\alpha x_j) \{ (\alpha + E_{pp}) L_{pp}^{-1} \} \right] \quad (2.27)$$

$$E_{pp} = eE/2kT \quad (2.28)$$

$$L_{pp}^{-1} = \left\{ E_{pp}^2 + L_p^{-2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.29)$$

ในทำนองเดียวกันกระแสโฟโตในด้านพีตาได้จากสมการ (2.4) และ (2.6) เป็น

$$\frac{d}{dx} \left( D_n \frac{dn_p}{dx} + \mu_n p_n E \right) + F(1-R) \exp(\alpha(x_j + w - x)) - \frac{1}{\tau_n} (n_p - n_{po}) = 0 \quad (2.30)$$

ค่าเงื่อนไขขอบเขต เป็น

$$\text{ที่ } x = x_j + W ; \quad n_p - n_{po} = 0 \quad (2.31)$$

$$\text{ที่ } x = H ; \quad D_n \frac{dn_p}{dx} + \mu_n n_p E = -S_n (n_p - n_{po}) \quad (2.32)$$

สามารถที่จะหาค่ากระแสได้ดังสมการ (2.33)

$$J_n = \left[ \frac{e\alpha F(1-R)L_{nn} \exp(-E_{nn} x_j - \alpha W)}{(\alpha - E_{nn})^2 L_{nn}^2 - 1} \right] \times$$

$$\left[ \{(\alpha - E_{nn})L_{nn} - 1\} \exp(-x_j(\alpha - E_{nn})) + \exp\{-(H-W)(\alpha - E_{nn})\} \right] \times$$

$$\left[ \exp\{(H-x_j-W)(\alpha - E_{nn} - L_{nn}^{-1})\} - (\alpha - E_{nn})L_{nn} - (E_{nn} + S_n/D_n)L_{nn} \left[ \exp\{(H-x_j-W)x_j(\alpha - E_{nn} - L_{nn}^{-1})\} - 1 \right] \right]$$

$$\times \left[ (E_{nn} + S_n/D_n)L_{nn} \sinh\left(\frac{H-x_j-W}{L_{nn}}\right) + \cosh\left(\frac{H-x_j-W}{L_{nn}}\right) \right]^{-1} \quad (2.33)$$

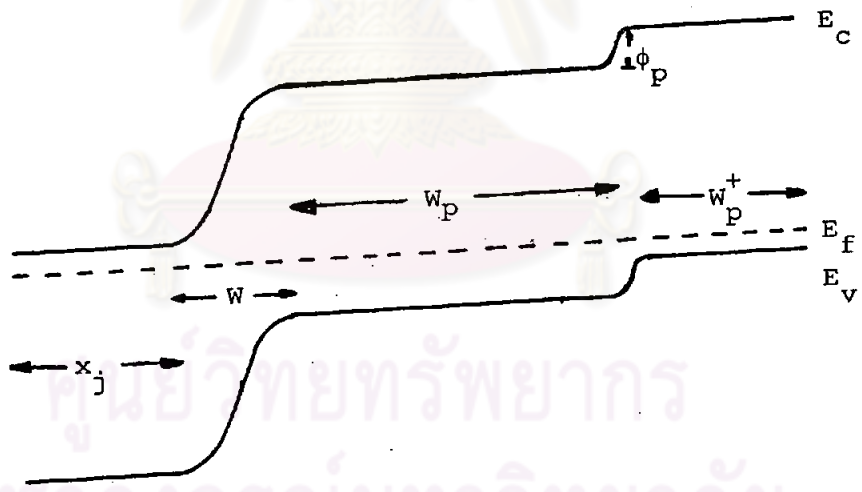
ส่วนกระแส injection ของกรณีที่มีค่ากระแสมืด (dark current) เป็น

$$J_o = \frac{eD_n^2}{L_{pp} N_d} \left[ \frac{\sinh(x_j/L_{pp}) + (S_{pp} L_{pp} / D_{pp} + E_{pp} L_{pp}) \cosh(x_j/L_{pp}) - E_{pp} L_{pp}}{((S_{pp} L_{pp} / D_{pp}) + E_{pp} L_{pp}) \sinh(x_j/L_{pp}) + \cosh(x_j/L_{pp})} \right]$$

$$+ \frac{en_i^2}{N_a} \left[ \frac{D_n}{L_{nn}} \coth\left(\frac{H-x_j-W}{L_{nn}}\right) - E_{nn} D_n \right] \quad (2.34)$$

3. กรณีที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง (back surface field) <sup>(2), (8), (9)</sup>

แทนที่จะนำขั้วโลหะด้านหลังกับสารกึ่งตัวนำซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะสูง ก็กลับเติมสารเจือลงไปให้มีปริมาณสูงมาก (heavily doped) แล้วถึงค่อยทำขั้วโลหะด้านหลัง ผลจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่มีความต้านทานจำเพาะสูงกับความต้านทานจำเพาะต่ำ ดังรูปที่ 2.4 จะเห็นว่ามีแนวพลังงานศักย์  $\phi_p$  ตรงรอยต่อของฐานทั้งสอง เป็นตัวดึงพาหะส่วนน้อยจากการรวมตัวที่มีค่าสูงมากตรงขั้วสัมผัสด้านหลัง ถ้าค่าความกว้างของบริเวณที่ 1 น้อยกว่าหรือพอ ๆ กับค่าความยาวในการแพร่ของอิเล็กตรอนด้านพีโอเลคตรอนแทนที่จะเกิดการรวมตัวที่ผิวด้านหลัง กลับถูกสนามไฟฟ้ากวาดให้ผ่านหัวต่อมายังด้านหน้า เป็นผลให้กระแสที่ได้จากเซลล์มีมากขึ้น นอกจากนี้สนามไฟฟ้าด้านหลังยังทำให้กระแสมืดของเซลล์  $J_D$  มีค่าลดลง เพราะการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลังน้อยลงซึ่งผลอันนี้ทำให้เซลล์  $J_D$  แรงดันวงจรเปิด (open circuit voltage) มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของเซลล์  $\text{Si}$  ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง

ในกรณีนี้เมื่อพิจารณากระแส injection จะมีกระแสมืดด้านฐานเป็น

$$J_D(\text{base}) = \frac{eD_n n_i^2}{L_n N_a} \left[ \frac{(SL_n/D_n) \cosh(W_p/L_n) + \sinh(W_p/L_n)}{\cosh(W_p/L_n) + (SL_n/D_n) \sinh(W_p/L_n)} \right] \quad (3.35)$$

โดยที่ 
$$S = \frac{N_a D_n^+ (S_n L_n^+ / D_n^+) \cosh(W_p^+ / L_n^+) + \sinh(W_p^+ / L_n^+)}{N_a L_n^+ \cosh(W_p^+ / L_n^+) + (S_n L_n^+ / D_n^+) \sinh(W_p^+ / L_n^+)} \quad (3.36)$$

$N_a^+$  เป็นจำนวนอะตอมของสารเจือชนิดรับต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในบริเวณที่ 2

$D_n^+$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของอิเล็กตรอนในบริเวณที่ 2

$L_n^+$  เป็นความยาวในการแพร่ของอิเล็กตรอนในบริเวณที่ 2

$W_p^+$  เป็นความกว้างของบริเวณที่ 2

กระแสอีกส่วนหนึ่งซึ่งเกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในบริเวณปลอดพาหะซึ่งทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสส่วนนี้เรียกว่า space charge layer recombination current จากการคำนวณหาค่ากระแสส่วนนี้ในขณะไบแอสตาม โดยถือว่าอะตอมของสารเจือทั้ง 2 ด้านของหัวต่อมีค่าเท่า ๆ กัน จะได้

$$J_{rg} = \frac{e n_i W}{\left\{ \tau_{po} \tau_{no} \right\}^{1/2}} \frac{2 \sinh(eV_j / 2kT)}{e(V_d - V_j) / kT} f(b) \quad (2.37)$$

โดยที่  $J_{rg}$  เป็นกระแสในขณะไบแอสตาม

$\tau_{po}$  เป็นช่วงเวลาชีวิตของโฮลในภาวะสมดุล

$\tau_{no}$  เป็นช่วงเวลาชีวิตของอิเล็กตรอนในภาวะสมดุล

$V_d$  เป็นแรงดันสูงสุดของเซลล์

$$V_d = E_g - (E_c - E_F) - (E_F - E_v) \quad (2.38)$$

$$= \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (2.39)$$

$f(b)$  เป็นแฟคเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน trap กับช่วง เวลาชีวิต

ทั้งสอง

$$f(b) = \int_0^{\infty} \frac{dx}{x^2 + 2bx + 1} \quad (2.40)$$

$$b = \exp(-eV_j/2kT) \cosh \left\{ (E_t - E_i)/kT + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{T_{po}}{T_{no}}\right) \right\} \quad (2.41)$$

$E_i$  เป็นระดับพลังงาน intrinsic Fermi

$E_t$  เป็นระดับพลังงานของ trap

กระแสอีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นส่วนของกระแสมีดคือกระแส tunneling กระแสส่วนนี้จะมีผลเมื่อสิ่งประดิษฐ์มีการเติมสารเจือทั้ง 2 ด้านของหัวต่อมีปริมาณสูงมาก ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.42) (5)

$$J_{tun} = K_{\ell} N_t \exp(BV_j) \quad (2.42)$$

$K_{\ell}$  เป็นค่าคงที่

$N_t$  เป็นความหนาแน่นของระดับพลังงานที่เหมาะสมกับอิเล็กตรอนและโฮลจะ tunnel ได้

$$B = \frac{4}{3\hbar} \left\{ \frac{m^* \epsilon_j}{N_{d,a}} \right\}^{1/2}$$

### 2.1.3 การตอบสนองต่อแสง (spectral response)

การตอบสนองต่อแสงก็คือการเกิดจำนวนคู่อิเล็กตรอนและโฮลเทียบกับจำนวนของโฟตอนที่ตกกระทบเข้ามาในเนื้อสารในขณะที่เกิดการสควจอร์ จึงเขียนได้เป็น

$$SR(\lambda) = \{ J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda) \} / \{ eF(\lambda)(1-R(\lambda)) \} \quad (2.43)$$

การตอบสนองต่อแสงของเซลล์  $\eta$  ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซลล์  $\eta$  เช่น ถ้ามีการรวมตัวของพาหะที่ผิวมาก ช่วงเวลาชีวิตของพาหะจะมีค่าน้อย และระยะในการแพร่ของพาหะมีค่าน้อย ก็จะส่งผลให้การตอบสนองต่อแสงน้อยลง ในทางกลับกันถ้าพารามิเตอร์ข้างต้นมีค่ากลับกับที่ได้กล่าวมาแล้ว การตอบสนองต่อแสงของเซลล์  $\eta$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น

### 2.1.4 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของเซลล์ $\eta$ เมื่อไม่มีการสูญเสียที่ $R_s$ และ $R_{sh}$

เมื่อไม่มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่  $R_s$  และ  $R_{sh}$  สามารถเขียนสมการของกระแสเป็น (2), (10)

$$I_D = I_{oo} \{ \exp(eV_j/A_o kT) - 1 \} \quad (2.44)$$

$A_o$  เป็นแฟคเตอร์ความสมบูรณ์ของหัวต่อ

$I_{oo}$  เป็นการประมาณค่าผลบวกของ  $I_{inj}$  กับ  $I_{rg}$  โดยถือว่าช่วงเวลาชีวิตของพาหะมีค่ามาก

ในภาวะอันนี้สมการ (2.1) เขียนได้เป็น<sup>(2)</sup>

$$I_{out} = I_{ph} - I_{oo} \{ \exp(eV_{out}/A_o kT) - 1 \} \quad (2.45)$$





ดังนั้นสามารถ เขียนสมการของกระแสตรงจอร์ได้เป็น

$$I_{sc} = I_{ph}$$

และแรงดันวงจร เปิด เป็น

$$\begin{aligned} V_{oc} &= \frac{A_o kT}{e} \{ \ln (I_{sc}/I_{oo}) + 1 \} \\ &= \frac{A_o kT}{e} \{ \ln (J_{sc} A_a/J_{oo} A_t) + 1 \} \end{aligned} \quad (2.47)$$

โดยที่

$A_a$  เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์  $\alpha$  (Active area)

$A_t$  เป็นพื้นที่ทั้งหมดของเซลล์  $\alpha$

กำลังไฟฟ้าที่เซลล์  $\alpha$  จ่ายออกมาสามารถเขียนอยู่ในรูปของกระแสและแรงดันดังนี้

$$P_{out} (max) = I_m V_m \quad (2.48)$$

$$I_m = (I_{sc} + I_{oo}) \frac{eV_m/A_o kT}{1 + (eV_m/A_o kT)} \quad (2.49)$$

$I_m$  เป็นกระแสที่เซลล์  $\alpha$  ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

$V_m$  เป็นแรงดันที่เซลล์  $\alpha$  ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

ฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor) เป็นอัตราส่วนระหว่างผลคูณของ  $I_m V_m$  กับ

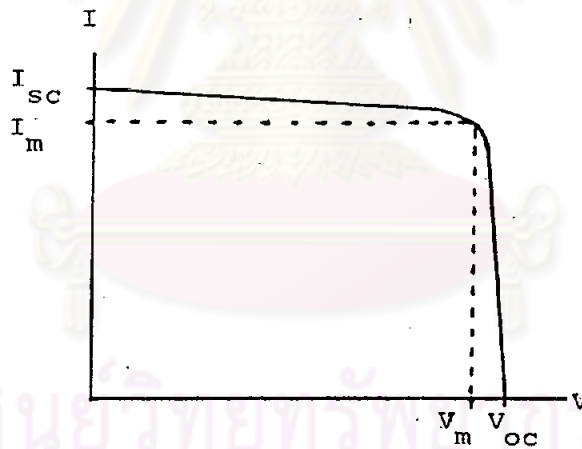
ผลคูณของ  $I_{sc} V_{oc}$

$$F.F = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.50)$$

$$= V_m \left[ \frac{1 - (I_{oo}/I_{sc}) \{ \exp(eV_m/A kT) - 1 \}}{(A kT/e) \ln(I_{sc}/I_{oo}) + 1} \right]$$

$$= V_m \left[ \frac{1 - (J_{oo} A / J_{sc} A) \exp(eV_m/A kT) - 1}{(A kT/e) \ln(J_{sc} A / J_{oo} A) + 1} \right]$$

$$= \frac{V_m}{V_{oc}} \left[ 1 - \frac{\exp eV_m/A kT - 1}{\exp eV_{oc}/A kT - 1} \right] \quad (2.51)$$



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของเซลล์ ๓ ขั้วที่รับแสง

ประสิทธิภาพของเซลล์ ๓ ขั้วสามารถเขียนได้ดังข้างล่าง

$$\eta \text{ (max)} = \frac{I_m V_m}{P_{in}}$$

$$= \frac{F.F. \cdot I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (2.52)$$

เมื่อไม่คิดการสูญเสียที่  $R_s, R_{sh}$  จะได้

$$\eta = \frac{F \cdot F \cdot A_o \cdot kT A_a \ln((I_{sc}/I_{oo}) + 1) \int_0^{\infty} F(\lambda) SR(\lambda) d\lambda}{A_t \int_0^{\infty} F(\lambda) \left(\frac{hc}{\lambda}\right) d\lambda} \quad (2.53)$$

### 2.1.5 ค่าต่าง ๆ ที่ทำให้เซลล์ $\eta$ มีประสิทธิภาพสูงสุด

ตัวกำหนดประสิทธิภาพของเซลล์  $\eta$  คือ ตัวที่กำหนดค่ากระแสและแรงดันซึ่งมีดังนี้<sup>(8)</sup>, (12)

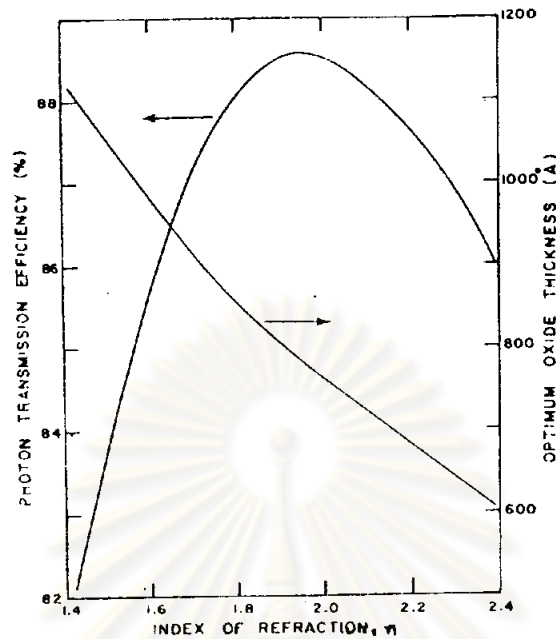
1. สเปกตรัมของแสง
2. ความสามารถที่จะให้แสงผ่านเข้ามา (transparent efficiency)
3. สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
4. ช่วงเวลาชีวิตของพาหะ
5. ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือและผลต่างของความหนาแน่นของอะตอม

สารเจือที่บริเวณใด ๆ ในเนื้อสาร (doping gradients)

6. สัมประสิทธิ์ในการแพร่และความคล่องตัวของพาหะ
7. ความกว้างของด้านพี ด้านเอ็น และบริเวณปลอดพาหะ
8. การรวมตัวของพาหะที่ผิว

ค่าสเปกตรัมของแสงและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีค่าคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่และความคล่องตัวของพาหะมีค่าคงที่สำหรับปริมาณสารเจือค่าหนึ่ง ๆ ดังนั้น ประสิทธิภาพสูงสุดจึงขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะให้แสงผ่านเข้ามาสูง ความกว้างของด้านพี ด้านเอ็น และบริเวณปลอดพาหะมีค่าน้อย และช่วงเวลาอายุของพาหะมีค่าสูง

การเพิ่มความสามารถในการให้แสงผ่านเข้ามาโดยการทำชั้นกันการสะท้อนของแสง (Antireflecting layer) ซึ่งทำจากออกไซด์บาง ๆ บนผิวหน้าของเซลล์  $\eta$  ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของออกไซด์ (refractive index) กับความหนาของออกไซด์ที่ใช้และความสามารถให้แสงผ่านเข้ามากับดัชนีหักเหของออกไซด์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการผ่านเข้ามาของแสง และความหนาที่เหมาะสมของออกไซด์กับครชนีหักเหของออกไซด์ ซึ่งอยู่บนผิวหน้าของซิลิกอน (8)

ช่วง เวลาชีวิตของพาหะและความหนาแน่นของสาร เจือมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.53) (3)

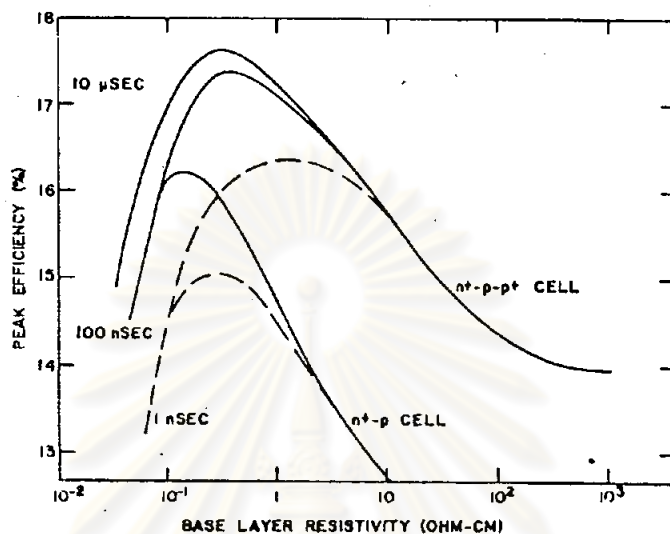
$$\tau_p = \tau_n = \tau_{no} \left( \frac{p_o + p_1}{p_o + n_o} \right) + \tau_{po} \left( \frac{n_o + n_1}{p_o + n_o} \right) \quad (2.53)$$

$p_o, n_o$  เป็นความหนาแน่นของโฮล อิเล็กตรอนที่ภาวะสมดุลย์ ตามลำดับ

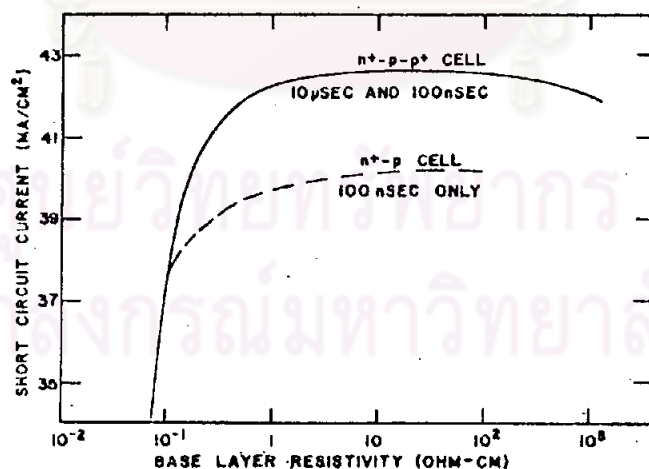
$p_1, n_1$  เป็นความหนาแน่นของโฮลในวาเลนซ์แบนด์ อิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์ เมื่อมี trapping center ระหว่างแบนด์ทั้งสอง

ช่วง เวลาชีวิตของพาหะมีค่าสูงจะทำให้กระแสสังวจรมีค่าสูง กระแสมีมีค่าต่ำ ซึ่งส่งผลให้แรงดันวงจร เบ็ดมีค่าสูง ค่าช่วง เวลาชีวิตของพาหะมีความสัมพันธ์แบบผกผัน กับค่าของปริมาณสาร เจือที่เติม เข้าไปในสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นฐาน (base layer doping concentration)

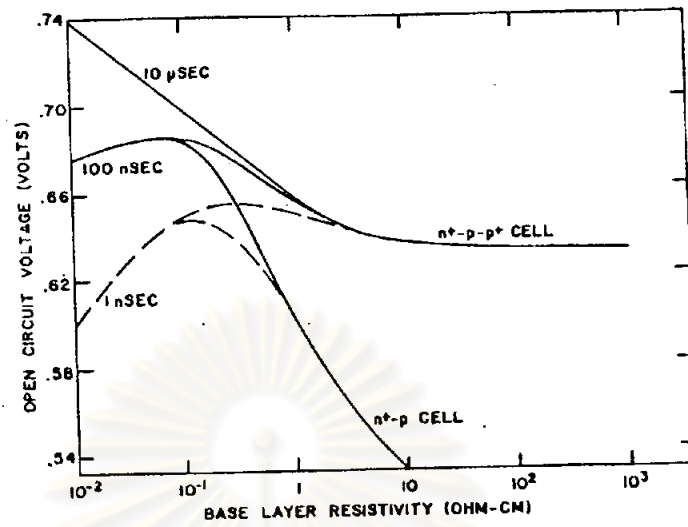
รูปที่ 2.7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่สำคัญของ เซล ๓ กับความต้านทานจำเพาะของแวนผลึกฐานโดยค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังที่แสดงในตารางที่ 2.1



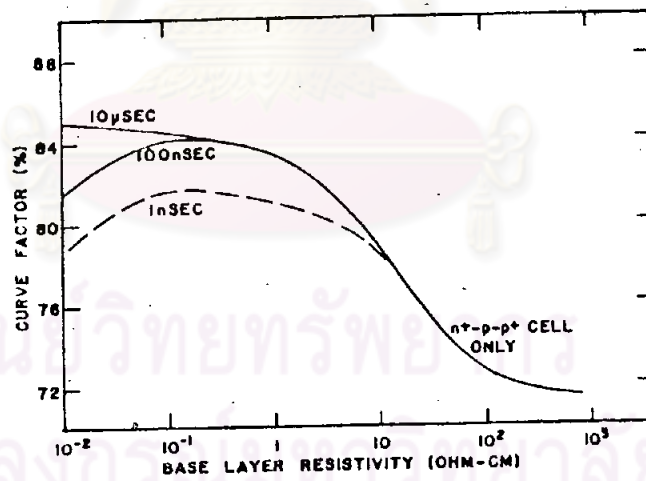
รูปที่ 2.7 a) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของ เซล ๓ กับความต้านทานจำเพาะของแวนผลึกฐาน (8)



รูปที่ 2.7 b) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรกับความต้านทานจำเพาะของแวนผลึกฐาน (8)



รูปที่ 2.7 c) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจร เปิดกับความต้านทานจำเพาะของแวนผลึกฐาน (8)



รูปที่ 2.7 d) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟคเตอร์กับความต้านทานจำเพาะของแวนผลึกฐาน (8)

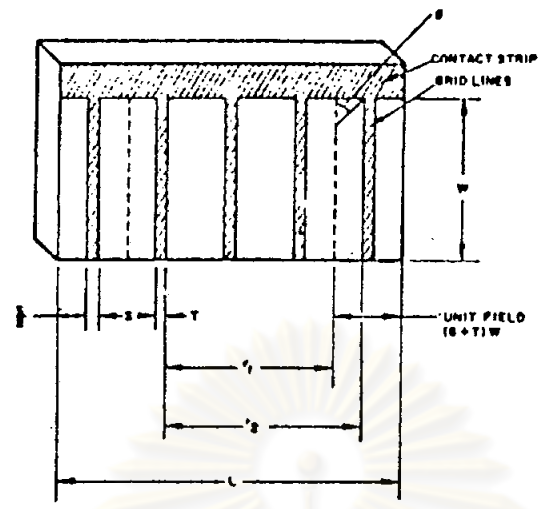


ตารางที่ 2.1 เป็นค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์  
ของรูปที่ 2.7<sup>(8)</sup>

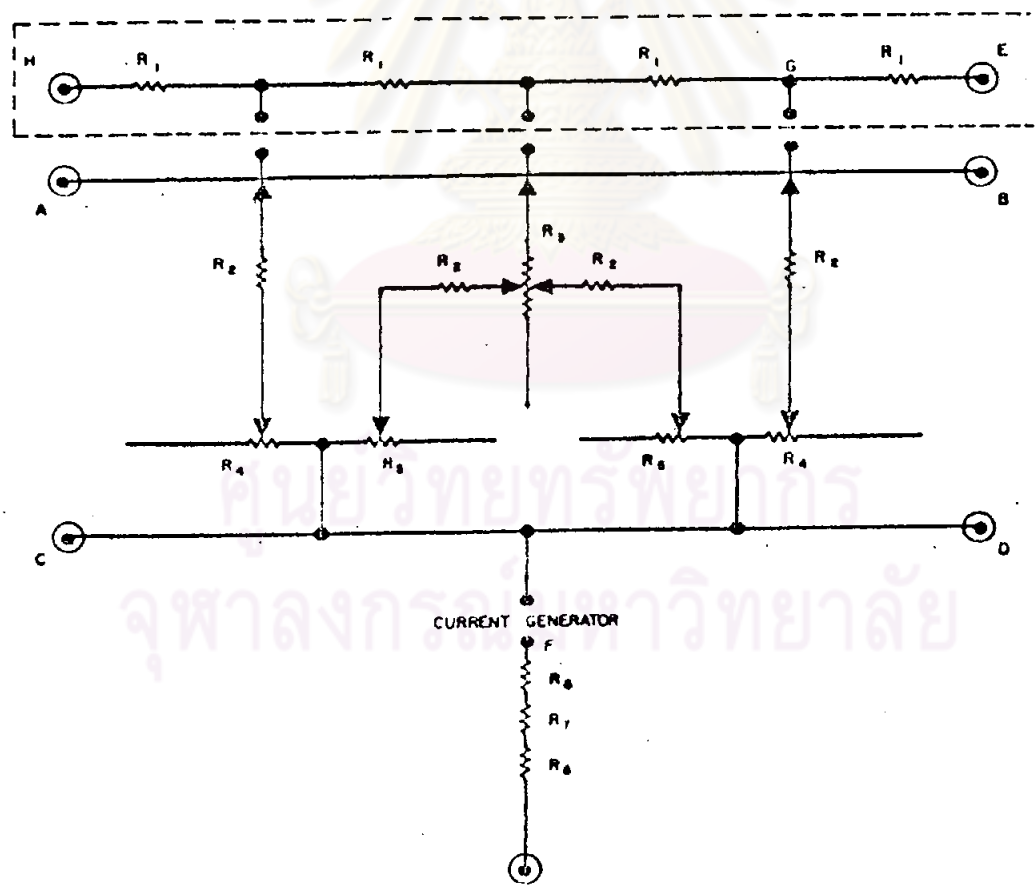
ความหนาของชั้น $n^+$	0.25 $\mu\text{m}$
ความหนาของชั้น p	250 $\mu\text{m}$
ความหนาของชั้น $p^+$	5 $\mu\text{m}$
ความหนาแน่นของพาหะชั้น $n^+$	$10^{20} / \text{cm}^3$
ความหนาแน่นของพาหะชั้น p	แปรได้ (variable)
ความหนาแน่นของพาหะชั้น $n^+$	$10^{19} / \text{cm}^3$
ช่วง เวลาชีวิตของพาหะในชั้น $n^+$	10 $\mu\text{sec}$ 100 nsec หรือ 1 nsec
ช่วง เวลาชีวิตของพาหะในชั้น p และ $p^+$	ขึ้นอยู่กับปริมาณสารเจือที่เติม
ความเร็วในการรวมตัวที่ผิว	$10^3 \text{ cm/sec}$
ความหนาของชั้นกั้นการสะท้อนของแสง (SiO)	800 $\text{\AA}$
ความเข้มของแสงที่ใช้	AMO

#### 2.1.6 ค่าของความต้านทานอนุกรม (series resistance)

ความต้านทานอนุกรมเป็นพารามิเตอร์ที่จะลดประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์  $\eta$  ลง  
เพื่อจะให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดจึงต้องลดค่าความต้านทานอนุกรมให้มีค่าต่ำสุด ซึ่งความต้าน  
ทานอนุกรมจะมาจากส่วนของความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่เติมสารเจือชั้นบน ความ  
ต้านทานของรอยสัมผัส (contact resistance) และความต้านทานของ grid<sup>(13), (14)</sup>



รูปที่ 2.8 เป็นรูปทรง เรขาคณิตของ เซลแสงอาทิตย์ (13)



รูปที่ 2.9 เป็นรูปวงจรสมมูลของความต้านทานของ เซลแสงอาทิตย์ (13)



$R_1$  เป็นความต้านทานของ contact strip

$R_2$  เป็นความต้านทานระหว่างขั้ว (electrodes) กับชั้นสารกึ่งตัวนำ  
ด้านบน (diffused layer)

$R_3$  เป็นความต้านทานของ grid strip

$R_4$  เป็นความต้านทานของชั้นสารกึ่งตัวนำด้านบน เมื่อพาหะเคลื่อนที่ไปยัง  
contact strip

$R_5$  เป็นความต้านทานของชั้นสารกึ่งตัวนำด้านบน เมื่อพาหะเคลื่อนที่ไปยัง  
grid strip

$R_6$  เป็นความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ (bulk region)

$R_7$  เป็นความต้านทานของผิวสัมผัส (contact resistance) ระหว่างเนื้อ  
สารกึ่งตัวนำกับขั้วด้านล่าง (bottom electrode)

$R_8$  เป็นความต้านทานของขั้วด้านล่าง

จากรูปที่ 2.9 เส้น HE จะเป็นแถบของตัวนำพาหะที่เคลื่อนที่ผ่าน grid จะผ่านความต้านทาน  $R_3$  และผ่านความต้านทานของ  $R_1$  รวมกัน  $2R_1$  ส่วนพาหะที่ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำด้านบนแล้วผ่าน contact strip ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายของ grid strip จะผ่านความต้านทานเฉลี่ยเป็น  $R_1$  และพาหะที่ผ่าน contact strip แต่อยู่ทางด้านขวาของ grid strip จะเห็นความต้านทานเป็น  $3R_1$  โดยคิดว่า contact strip มีศักดาไฟฟ้าเท่ากัน (equipotential) และมีกระแสไหลผ่านสม่ำเสมอตลอดทั้ง strip

เมื่อคิดว่าจุด H เป็นจุดต่อออกไป (connection) จะได้ค่าความต้านทานรวม  
เป็น (12)

$$R_T = R_1 + \frac{1 + \frac{R_1}{R_3 + \frac{1}{2}(R_2 + R_5)} + \frac{R_1}{(R_1 + R_2 + R_4)}(R_2 + R_4)}{2 + \frac{R_1 + R_2 + R_4}{R_3 + \frac{1}{2}(R_2 + R_5)}} + R_6 + R_7 + R_8 \quad (2.54)$$

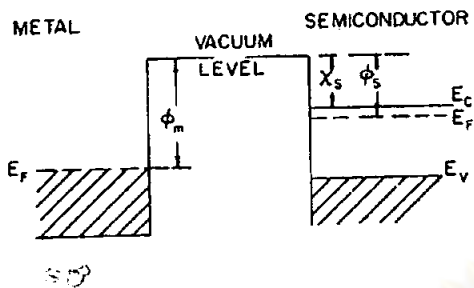
## 2.2 เซลแสงอาทิตย์แบบ Schottky MIS และ SIS

เนื่องจากเซลล์  $\alpha$  ทั้ง 3 แบบนี้มีลักษณะคล้ายกันจึงจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

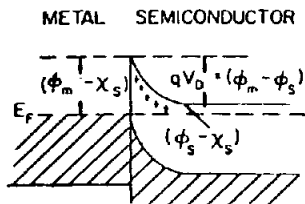
### 2.2.1 เซลแสงอาทิตย์แบบ Schottky

โครงสร้างของเซลล์  $\alpha$  แบบนี้มีชั้นโลหะบาง ๆ อยู่บนชั้นของสารกึ่งตัวนำด้านฐาน ซึ่งสามารถทำได้ง่าย สะดวกและค่าใช้จ่ายในการทำถูกกว่าแบบหัวต่อพี-เอ็น จึงน่าจะเป็นแนวทางสำคัญในการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตกำลังไฟฟ้า แต่ก็มีปัญหาตรงที่กระแสและแรงดันที่ได้ยังไม่สูงพอ

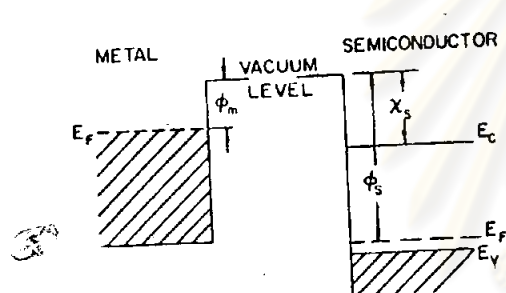
เมื่อมีผิวสัมผัสของโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะผ่านผิวสัมผัสเพื่อให้เกิดการสมดุลของพลังงาน ซึ่งค่า work function ของโลหะและของสารกึ่งตัวนำจะเป็นตัวควบคุม ปรากฏการณ์ Schottky จะเกิดขึ้นต่อเมื่อค่า work function ของโลหะมากกว่าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และค่า work function ของโลหะน้อยกว่าของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเท่านั้น เพราะในผิวสัมผัสดังกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะผ่านผิวสัมผัสแล้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น การเคลื่อนที่ของพาหะ



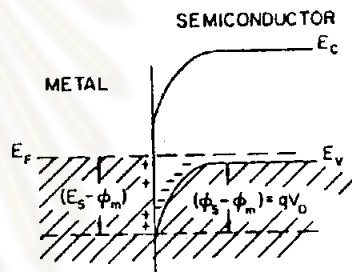
รูปที่ 2.10 a)



รูปที่ 2.10 b)



รูปที่ 2.10 c)



รูปที่ 2.10 d)

รูปที่ 2.10 a), b) แสดงแถบพลังงานก่อนและหลังทำผิวสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (15)

รูปที่ 2.10 c), d) แสดงแถบพลังงานก่อนและหลังทำผิวสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำชนิด พี (15)

โลหะที่ทำผิวสัมผัสจะต้องบาง เพื่อให้แสงทะลุผ่านได้ แสงจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในโลหะที่มีพลังงานเท่ากับค่าพลังงานศักย์ตรงผิวสัมผัส (barrier height,  $\phi_{b0}$ ) เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำซึ่งทำให้เราสามารถวัดค่าของ  $\phi_{b0}$  ได้โดยใช้ผลอันนี้ ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าจะผ่านทะลุเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำก่อให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮลซึ่งโฮลจะเคลื่อนที่เข้ามาบริเวณผิวสัมผัสและพาหะที่เกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะถูกสนามไฟฟ้ากวาดไปก่อนที่จะเกิดการรวมตัวตรงผิวสัมผัส ทำให้เกิดกระแสไหลขึ้นในเซลล์ ฯ

กระแสที่ไหลใน เซล ๓ ส่วนที่เกิดจากผลของสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลดพาหะเขียน  
ได้เป็น

$$J_{dr} = e T(\lambda) F(\lambda) (1 - \exp(-\alpha W)) \quad (2.55)$$

$T(\lambda)$  เป็นการยอมให้แสงผ่านของโลหะที่ทำผิวสัมผัส

$W$  เป็นความกว้างของบริเวณปลดพาหะสามารถเขียนได้เป็น<sup>(5)</sup>

$$W = \left[ \frac{2\varepsilon_s}{eN_d} \left( V_d - V_j - \frac{kT}{e} \right) \right]^{1/2} \quad (2.56)$$

$\varepsilon_s$  เป็นค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ

กระแสซึ่งเกิดจากชั้นฐาน (base) ของ เซล ๓ แบบ Schottky ถ้าเป็น  
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถเขียนกระแสที่เกิดขึ้นได้เป็น<sup>(2)</sup>

$$J_p = \frac{eF\alpha L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} T \exp(-\alpha W) \left[ L_p - \frac{(SL_p/D_p) \{ \cosh(H'/L_p) - \exp(-\alpha H') \}}{(SL_p/D_p) \sinh(H'/L_p) + \cosh(H'/L_p)} + \frac{(H'/L_p) + \alpha L_p \exp(-\alpha H')}{SL_p/D_p \sinh(H'/L_p) + \cosh(H'/L_p)} \right] \quad (2.57)$$

ถ้ามีชั้นสนามไฟฟ้าด้านหน้าจึงสามารถเขียนเป็น<sup>(2)</sup>

$$J_p = \frac{eF\alpha L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} T \exp(-\alpha W) \left[ \alpha L_p - \frac{\cosh(H'/L_p) - \exp(-\alpha H')}{\sinh(H'/L_p)} \right] \quad (2.58)$$

$H'$  เป็นความหนาของ เซล ๓ - ความกว้างของบริเวณปลดพาหะ

$$H' = H - W$$

กระแสของเซลล์ แบบ Schottky ส่วนใหญ่เกิดโดยวิธี thermionic emission ของพาหะส่วนใหญ่ ซึ่งกระแส Schottky เขียนได้เป็น (5), (16)

$$J = A^{**2} \exp(-e\phi_b/kT) \left[ \exp(eV_j/kT) - 1 \right] \quad (2.59)$$

$$A^{**} = \frac{f_P f_Q A^*}{\left[ 1 + (f_P f_Q v_R/v_0) \right]} \quad (2.60)$$

$A^{**}$  เป็นค่าคงที่ของ Richardson =  $4\pi emk^2/h^3$

$$f_P = \exp\left(-\frac{x_m}{\lambda_{01}}\right) = \exp\left\{-\left(\frac{e}{16\pi\epsilon_s\epsilon}\right)^{1/2} / \left(\lambda_{00} \tanh \frac{E_P}{2kT}\right)\right\} \quad (2.61)$$

$f_P$  เป็นโอกาสที่จะเกิดการปล่อยอิเล็กตรอนบริเวณที่มีพลังงานศักย์สูงสุด

$\lambda_{01}$  เป็นระยะเฉลี่ยก่อนชน (mean free path) ของ optical phonon

$\lambda_{00}$  เป็นระยะเฉลี่ยก่อนชนของ phonon ที่มีพลังงานสูง ๆ ที่อุณหภูมิต่ำ

$E_P$  เป็นพลังงานของ optical phonon

$$f_Q = \int_{-\infty}^{\infty} P_Q e^{-E/kT} \frac{dE}{dT} \quad (2.62)$$

$P_Q$  เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน Schottky barrier ของอิเล็กตรอนทางด้านกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanical transmission coefficient)

$f_Q$  เป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสทั้งหมดที่ไหลโดยวิธี tunneling และ quantum mechanical reflection กับกระแสที่ไม่คิดผลอันนี้

### 2.2.2 เซลแสงอาทิตย์แบบ MIS

เซลล์แบบนี้ต่างกับเซลล์แบบ Scottky ตรงที่มีชั้นคั่นกลางซึ่งเป็นฉนวนบาง ๆ คั่นอยู่ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งชั้นคั่นกลางมีคุณสมบัติดังนี้

1. สมประสิทธิในการเคลื่อนที่ผ่านของพาหะขึ้นอยู่กับความกว้างของแถบพลังงาน-ต้องห้ามของสารชั้นคั่นกลาง
2. ประจุไฟฟ้าในชั้นคั่นกลางเกิดจากการ tunneling ของอิเล็กตรอนระหว่างโลหะกับสถานะในชั้นคั่นกลางและจากปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์และวาเลนซ์แบนด์ของสารกึ่งตัวนำโดยถือว่าประจุอยู่ใกล้รอยต่อของชั้นคั่นกลาง
3. เกิดความต่างศักย์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่ขอบทั้ง 2 ของชั้นคั่นกลางและค่าจะแปรตามศักย์ที่ไบแอส

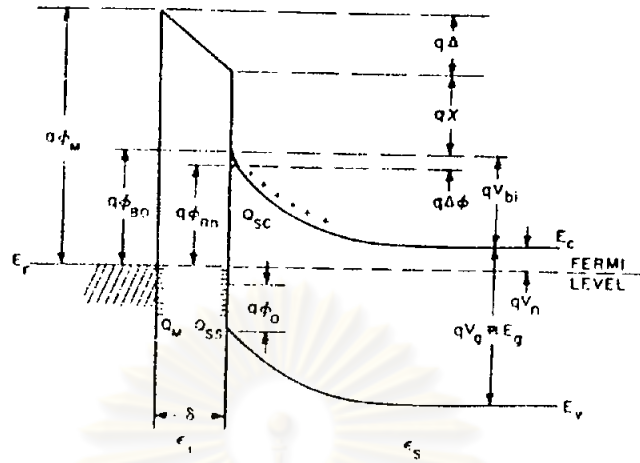
จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดัน กับความหนาและความสูงของ barrier ของชั้นคั่นกลางดังสมการ (2.63) และ (2.64) <sup>(17), (18)</sup>

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \left[ \ln(J_{sc}/J_0) + \chi^2 \right] \quad (2.63)$$

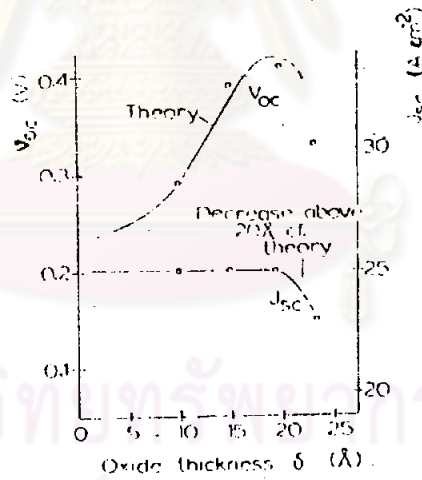
$$J = A T^2 \exp(-e\phi_{bo}/kT - \chi^2 \delta) \left( \exp \frac{eV}{kT} - 1 \right) \quad (2.64)$$

$\chi$  เป็นความสูงของ barrier ของสารในชั้นคั่นกลาง

$\delta$  เป็นความหนาของชั้นคั่นกลาง



รูปที่ 2.11 เป็นแผนภาพแสดงแถบพลังงานของ เซลล์แสงอาทิตย์แบบ MIS สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น (5)

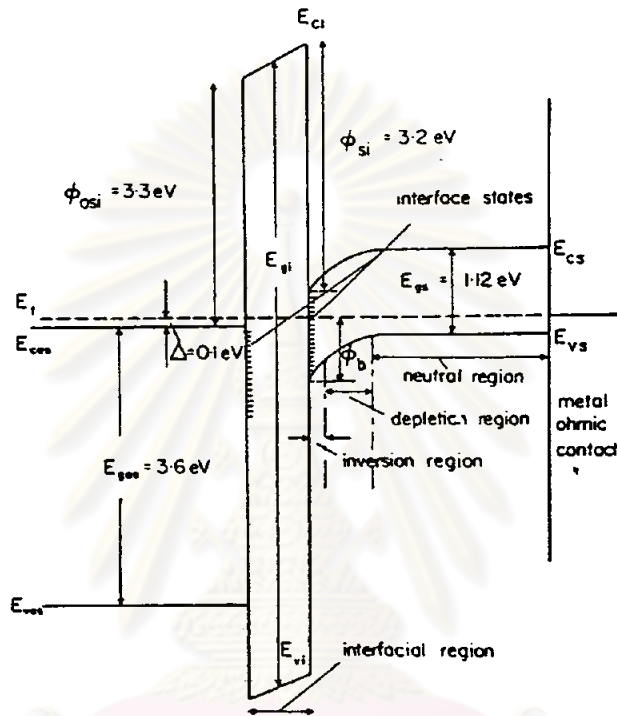


รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด กระแสลัดวงจร กับความหนาของออกไซด์ที่เป็นชั้นกั้นกลาง (18)



### 2.2.3 เซลแสงอาทิตย์แบบ SIS

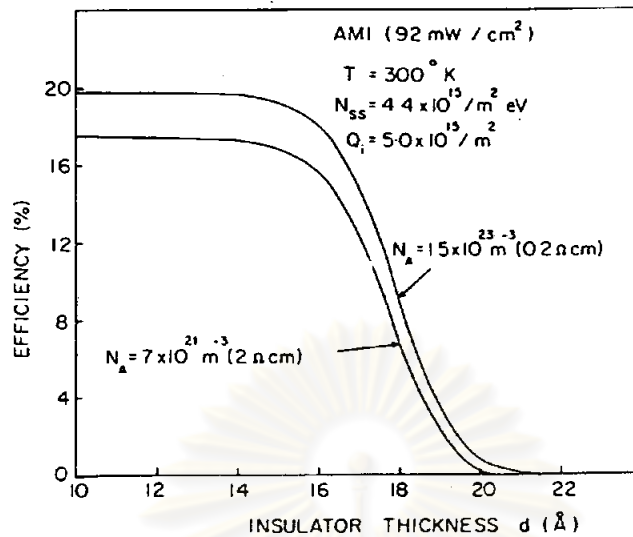
เซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้คล้ายกับแบบ MIS คือชั้นบนแทนที่จะเป็นโลหะกลับ เป็น สารกึ่งตัวนำซึ่งมีความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามมากกว่าสารกึ่งตัวนำชั้นล่าง



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของ เซลล์แสงอาทิตย์แบบ SIS ที่สมมูล (19)

เซลล์ ๓ แบบนี้ความหนาของชั้นฉนวนบาง ๆ มีความสำคัญต่อการกำหนดประสิทธิภาพของเซลล์ ๓ เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ก็สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์ ๓ กับความหนาของชั้นฉนวนบาง ๆ ดังรูปที่ 2.14





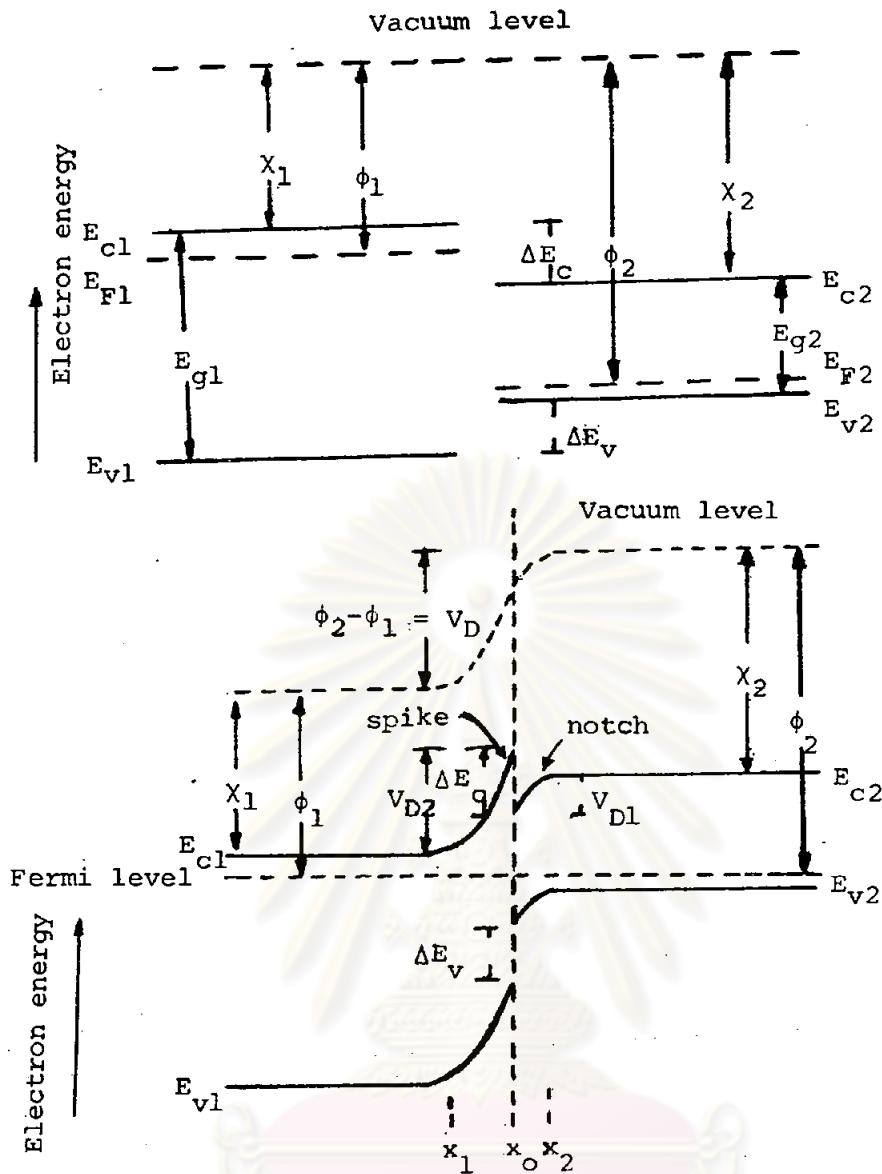
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์ กับความหนาของออกไซด์ชั้นกั้นกลางของเซลล์ ITO-SiO<sub>2</sub>-pSi<sup>(20)</sup>

ลักษณะสมบัติของแรงดัน-กระแสโดยทั่วไปจะถือว่ามีการเคลื่อนที่ของพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ของพาหะและเกิดจากการรวมตัวของพาหะซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้<sup>(19), (21) - (23)</sup>

$$J = eCT^3 \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{n_1 kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV}{n_1 kT}\right) - 1 \right] + \frac{eWC^{3/2} T^{3/2}}{2\tau_d} \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{n_2 kT}\right) \times \left[ \exp\left(\frac{eV}{n_2 kT}\right) - 1 \right] \quad (2.65)$$

### 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Heterojunction

เซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามต่างกัน ค่า work function ต่างกัน ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกต่างกัน ค่า electron affinity ต่างกัน ซึ่งเขียนแผนภาพแถบพลังงาน ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานที่สมดุลของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ก่อนและหลังทำหัวต่อพี-เอ็น (24)

2.3.1 เซลแสงอาทิตย์แบบหัวต่อพีเอ็น Heterojunction

เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Heterojunction เป็นเซลล์  $\pi$  ซึ่งประกอบด้วย สารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน ดังรูปที่ 2.15 เป็นแบบเอ็นบนพีซึ่งความกว้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำด้านบนจะมีค่ามากกว่าของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ข้างล่าง ดังนั้นแสงที่มีพลังงานน้อยกว่า  $E_{g1}$  แต่มากกว่า  $E_{g2}$  จะผ่านสารกึ่งตัวนำด้านบนและได้รับการดูดกลืนจากสารกึ่งตัวนำชั้นล่าง ส่วนแสงที่มีพลังงานมากกว่า  $E_{g1}$  จะได้รับการดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำด้านบน

กระแสเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะที่เกิดขึ้นทั้งใน เนื้อสารและบริเวณปลอดพาหะ เช่นเดียวกับในเซลล์  $\pi$  แบบหัวต่อพีเอ็นของสารชนิดเดียวกัน (n on p homojunction) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น (24)

$$J_{dr} = eF(1-R) \left[ e^{-\alpha_1 x_j} (1 - e^{-\alpha_1 W_1}) + e^{-\alpha_1 (W_1 + x_j)} (1 - e^{-\alpha_2 W_2}) \right] \quad (2.66)$$

โดยถือว่าการไม่ต่อเนื่องของคอนดัคชันแบนด์มีน้อย มีการคล้อยจองของร่างแหของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 เป็นอย่างดี (good lattice match) และไม่มี interface traps ใกล้เคียงและในบริเวณปลอดพาหะ

เซลล์  $\pi$  แบบนี้มีข้อได้เปรียบเซลล์  $\pi$  แบบหัวต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน ดังนี้

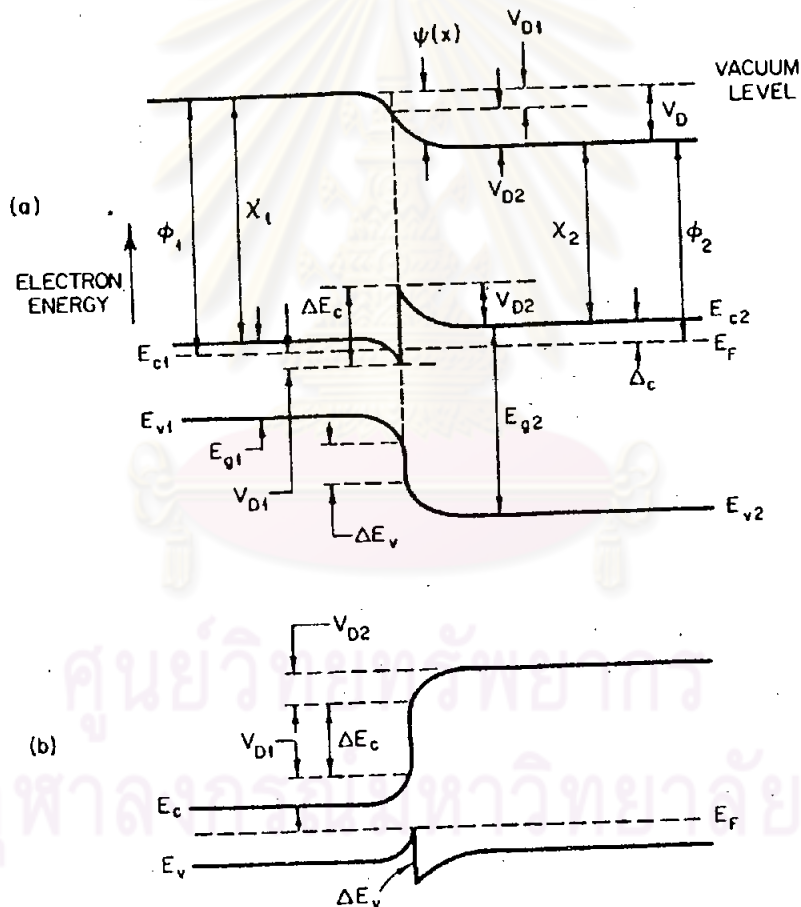
1. การตอบสนองต่อแสงช่วงคลื่นสั้นจะดีกว่าเพราะแสงจะได้รับการดูดกลืนจากสารกึ่งตัวนำชั้นบน
2. ความต้านทานอนุกรมจะน้อยกว่า เนื่องจากสารกึ่งตัวนำด้านบนสามารถเติมสารเจือมาก ๆ (heavily dope) โดยที่ไม่ได้ส่งผลต่อคุณสมบัติการส่งผ่านของแสง
3. สามารถทนทานต่อการแผ่รังสีที่มีพลังงานสูงได้มากกว่า เนื่องจากสารกึ่งตัวนำด้านบนมีความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามสูง

### 2.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Heterojunction ของสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน (isotype) (16), (24)

เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำขึ้นจากสารกึ่งตัวนำต่างกันแต่เป็นชนิดเดียวกัน ซึ่งก็มีแบบพีพีกับแบบเอ็นเอ็น เซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้กระแสที่ไหลในเซลล์  $\pi$  จะมาจากพาหะส่วนใหญ่ (majority carrier) มีแบบ (model) ในการอธิบายการเกิดกระแสในเซลล์ที่สำคัญ 2 แบบคือ แบบการปลดปล่อย (Emission model) และแบบไดโอด Schottky คู่ (Double-Schottky diode model)

2.3.2.1 แบบการปลดปล่อย (Emission model)

Anderson เป็นผู้เสนอแบบนี้ขึ้นมา มีเงื่อนไขว่าไม่มีสถานะรอยต่อ (interface states) ตรงรอยต่อสารกึ่งตัวนำทั้งสองมีการนำไฟฟ้าเท่ากัน เกิด spike และ notch ขึ้นตรงรอยต่อ มีชั้นปลดพาหะในด้านสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานต้องห้ามมากกว่าและมีชั้นสะสมประจุ (accumulation layer) ซึ่งมีความกว้างน้อยกว่าชั้นปลดพาหะในสารกึ่งตัวนำอีกด้านหนึ่ง แรงดันของเซลล์ จะมาจากสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานต้องห้ามมากกว่า เป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 2.16 เป็นแผนภาพแถบพลังงานที่สมมูลของ เซลล์แสงอาทิตย์แบบ heterojunction  
รูป (a) เป็นหัวต่อเอ็น-เอ็น  
รูป (b) เป็นหัวต่อพี-พี<sup>(16)</sup>

จะได้ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันดังสมการ (2.67) (24)

$$I = B \exp\left(-\frac{eV_{D2}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV_2}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{eV_1}{kT}\right) \right] \quad (2.67)$$

โดยที่

$V_{D2}$  เป็นแรงดัน built-in ในสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้างของแถบพลังงาน ต้องห้ามมากกว่า

$B$  เป็นค่าคงที่  $= AeT_e N_{D2} (kT/2 m_n^*)^{1/2}$

$A$  เป็นพื้นที่ของหัวต่อ

$T_e$  เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอิเล็กตรอนตรงหัวต่อของสารทั้งสอง

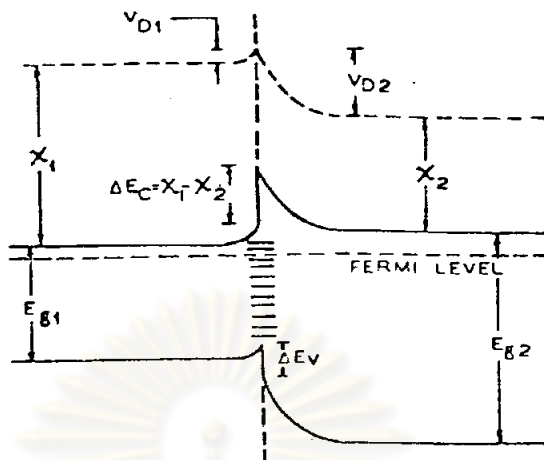
$m_n^*$  เป็นมวลยังผลของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามมากกว่า

$N_{D2}$  เป็นจำนวนพาหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของสารเจือแบบให้ (donor) ของสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามมากกว่า

2.3.2.2 แบบไดโอด Schottky คู่ (Double Schottky diode model)

Oldham และ Milnes เป็นผู้เสนอแบบนี้นี้ขึ้นมา มีเงื่อนไขว่า มี defect และ interfacial dislocation ทำให้เกิดสถานะตรงรอยต่อ (interface states) การจับพาหะของสถานะตรงรอยต่อจะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะอยู่ทั้งสองด้านของชั้นรอยต่อบาง ๆ ซึ่งก็จะเหมือนกับไดโอด 2 ตัวที่ด้านหลังประกบกัน กระแสเกิดจากรีการ 2 วิธีคือ การปล่อยอิเล็กตรอนผ่านค่านบนของบริเวณศักย์โดยสถานะรอยต่อไม่ได้จับอิเล็กตรอนไว้ และอีกวิธีเป็นการจับอิเล็กตรอนจากชั้นรอยต่อที่ 1 แล้วปล่อยอิเล็กตรอนผ่าน

บริเวณศักย์ที่ 2



รูปที่ 2.17 เป็นแผนภาพรอยต่อพลังงานของ เซลแสงอาทิตย์แบบ Heterojunction หัวต่อเอ็น-เอ็น โดยใช้แบบไดโอด Schottky คู่ (24)

ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันเป็นดังสมการ (2.68) (24)

$$I = \frac{2I_{01}I_{02} \sinh(eV/2kT)}{I_{02} \exp(eV/2kT) + I_{01} \exp(-eV/2kT)} \quad (2.68)$$

โดยที่

$I_{01}$  เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด 1

$I_{02}$  เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด 2