

บทที่ 2

ทฤษฎี



### โครงสร้างและนิยามพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง (Direct Energy Conversion) โดยมีอัตราส่วนพลังงานที่ได้นับต่อหน้าพื้นที่น้อยที่สุด

#### โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (รูปที่ 1)

ก. ฐาน (Base) ทำจากแวนดีกซ์ซิลิกอนหรือสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ มีความหนาอยู่ในช่วง 380 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) ผิวส่วนบนผ่านขบวนการแพร่ซึม เพื่อสร้างหัวต่อพีเอ็นหนาประมาณ 0.2 - 0.5 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ )

ข. ผิวสัมผัสทางไฟฟ้า (Electrical Contact) เป็นผิวสัมผัสทางโอห์มมิก ประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน

1. ผิวสัมผัสด้านหน้า อยู่บนชั้นแพร่ซึม แต่ต้องมีโครงสร้างที่สามารถปล่อยให้แสงตกกระทบชั้นแพร่ซึมมากที่สุด และสามารถดึงพลังงานออกมามากที่สุด

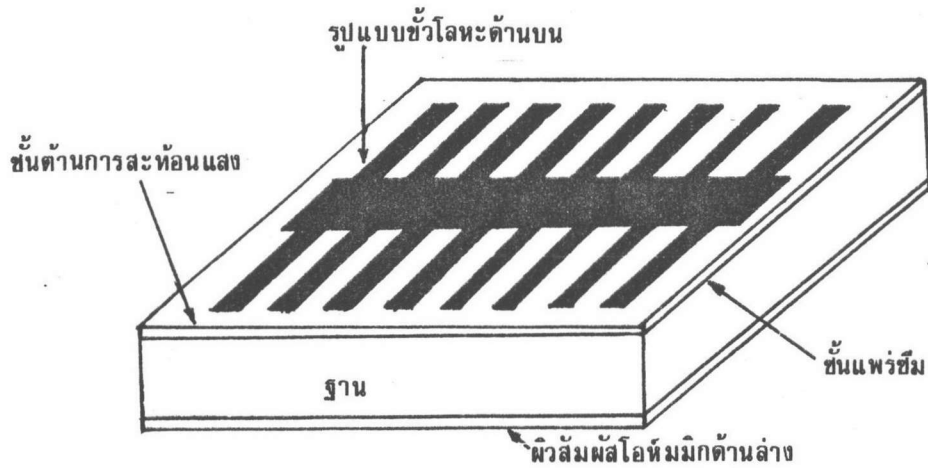
2. ผิวสัมผัสด้านหลัง เป็นผิวสัมผัสที่อยู่ด้านล่างของฐาน

ค. ชั้นด้านการสะท้อนแสง (Antireflection Coating) เป็นชั้นที่ทำขึ้นบนชั้นแพร่ซึม เพื่อลดการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบชั้นแพร่ซึม

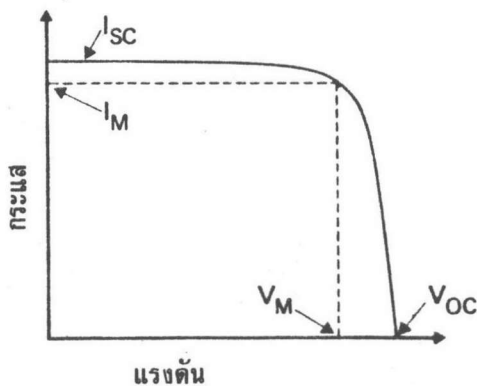
#### ตัวหลักสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ (Device Parameter) (รูปที่ 2)

การพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์ เราพิจารณาจากตัวหลักสำคัญ 3 ตัว ด้วยกันคือ

ก. ค่าแรงดันวงจรเปิด (Open Circuit Voltage,  $V_{OC}$ ) เป็นค่าแรงดันขาออก เมื่อความต้านทานโหลดมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับความต้านของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าแรงดันวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบหั่วต่อพีเอ็น มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความกว้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ที่ใช้ทำเซลล์ฯ และมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของหั่วต่อพีเอ็น ( $I_0$ ) และค่าแฟคเตอร์แห่งความสมบูรณ์ของหั่วต่อ (Perfection Factor,  $A_0$ ) (1) ดังนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

$$V_{oc} = A_o (kT/q) \ln [(I_{sc}/I_o) + 1] \quad (1)$$

ข. ค่ากระแสลัดวงจร (Short Circuit Current,  $I_{sc}$ ) เป็นค่ากระแสขาออก เมื่อค่าความต้านทานโหลดมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานของเซลล์ ค่ากระแสลัดวงจรขึ้นอยู่กับสเปกตรัมของต้นกำเนิดแสงและการตอบสนองทางแสง ของสารกึ่งตัวนำ (Spectral Response)

ค. ฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF.) คืออัตราส่วนระหว่างค่ากำลังขาออกสูงสุดกับผลคูณระหว่าง  $V_{oc}$  กับ  $I_{sc}$  (ค่าแรงดันและกระแสที่ ตำแหน่งกำลังขาออกสูงสุด คือจุด  $V_m$  และ  $I_m$  ตามรูปที่ 2) ค่า FF. จะพิจารณาได้จากค่า  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $A_o$ , ค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ), ค่าความต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) กล่าวคือ FF. มีค่าสูงเมื่อ  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $R_{sh}$  มีค่าสูง และ  $A_o$ ,  $R_s$  มีค่าต่ำ

ตัวหลักสำคัญ 3 ตัวนี้ จะใช้เป็นตัวพิจารณาว่า ประสิทธิภาพของเซลล์ เป็นอย่างไร และ ลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน ของเซลล์ เหมาะสมต่อการใช้งานหรือไม่

### การเกิดกระแสทางแสง

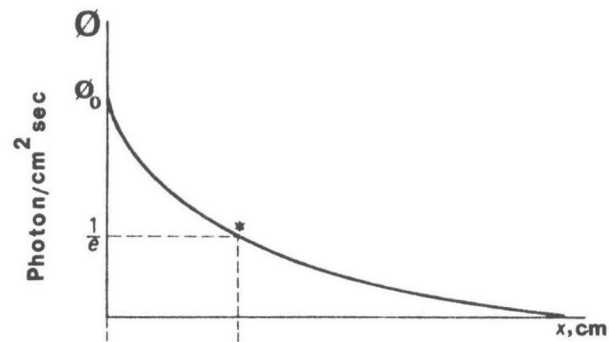
#### คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

ความสามารถของสารกึ่งตัวนำในการดูดกลืนแสงที่ความยาวช่วงคลื่นที่กำหนดให้ กำหนดด้วยสัมประสิทธิ์แห่งการดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็นส่วนกลับของระยะทาง ส่วนความหนาแน่นของโฟตอนจะแปรผันกับระยะทาง(รูปที่ 3) ตามสมการ<sup>(2)</sup>

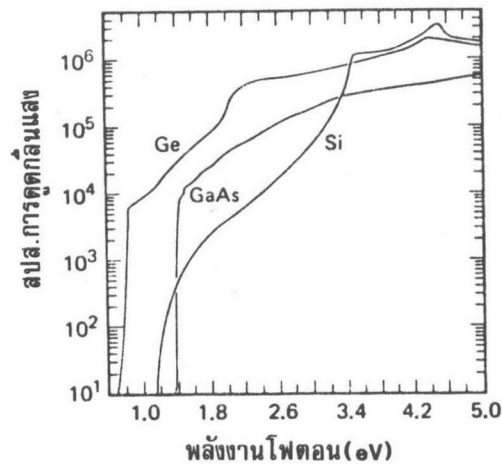
$$\phi = \phi_o \exp(-\alpha x) \quad (2)$$

$\phi$  มีหน่วยเป็น Photon  $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$

X ระยะทางจากผิวรับแสง หน่วย cm

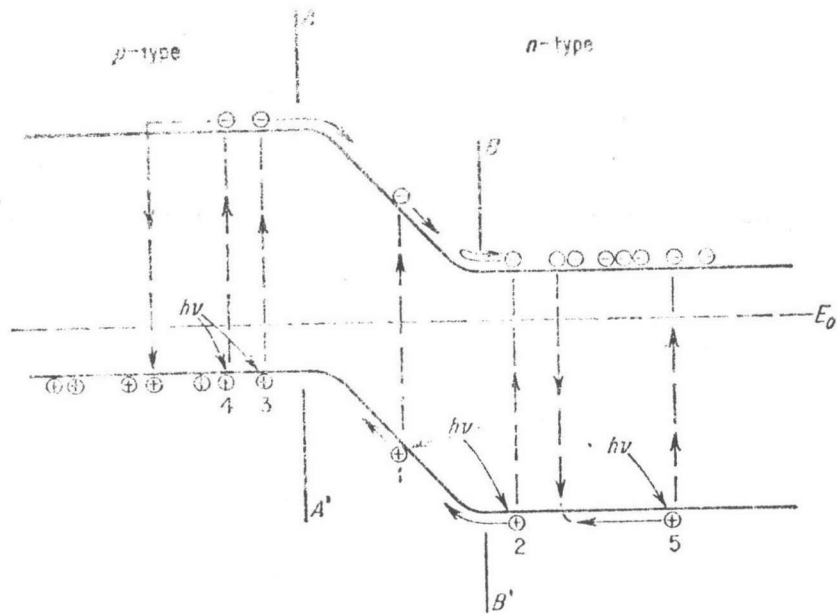


รูปที่ 3 การลดค่าความหนาแน่นของโฟตอนเมื่อสารกึ่งตัวนำหนา  $x$  (2)



รูปที่ 4 แสดงค่า Intrinsic Absorption Coefficients ของ Si (1)

โดยทั่วไป ยิ่งความกว้างของแถบพลังงานมีค่ามากสัมประสิทธิ์แห่งการดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) สำหรับค่าความยาวคลื่นที่กำหนดจะมีค่าน้อยลง นอกจากนี้สัมประสิทธิ์แห่งการดูดกลืนแสง ยังขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ สภาพผิว ความหนาแน่นของสารเจือปน และความหนาแน่นของพาหะอิสระ ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "Free Carrier Absorption" (3,4) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการเกิด กระแส-แรงดัน

ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพีเอ็น

รูปที่ 5 แสดงปรากฏการณ์ในขณะที่แสงตกกระทบผิวหน้าของเซลล์ โฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่วงกว้างของแถบพลังงาน ( $h\nu > E_g$ ) จะถูกดูดกลืนไว้ กระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามจาก Valence Band ไป Conduction Band ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ปรากฏการณ์นี้เกิดที่ ตำแหน่งต่างๆ ของหัวต่อพีเอ็น กล่าวคือ ถ้าเกิดอยู่ระหว่าง AA' กับ BB' (ตำแหน่งหมายเลข 1) ซึ่งเป็นบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้า ในบริเวณนี้สามารถเร่งพาหะที่เกิดให้ข้ามหัวต่อก่อนจะรวมตัวกัน ดังนั้นกระแสในบริเวณนี้ จึงพิจารณาได้เท่ากับโฟตอนที่ถูกดูดกลืน ถ้าคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดทางด้านเอ็น (หมายเลข 2) พาหะข้างน้อย (โฮล) จะถูกพาพัดเข้าหาหัวต่อแล้วข้ามไปทางด้านพี และถ้าคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นทางด้านพี (หมายเลข 3) อิเล็กตรอนจะถูกพาพัดเข้าหาหัวต่อ แล้วข้ามไปทางด้านเอ็น นั่นเอง พาหะบางส่วนจะถูกพาพัดออกจากหัวต่อ เกิดการสูญเสียพาหะเหล่านี้ไป ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

ก. การรวมตัวกันในแว่นผลึก (Bulk Recombination) (หมายเลข 5) อาจรวมกันโดยตรงระหว่างโฮลกับอิเล็กตรอน หรือโดยการผ่านศูนย์รวมตัวตรงกลาง (Intermediate Recombination Center) ถ้า  $N_R$  คือจำนวน Intermediate Recombination Center ที่ระดับพลังงาน  $E_R$  และ  $\sigma_n, \sigma_p$  คือ Capture Cross Section สำหรับอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ เราจะได้ค่าช่วงชีวิต (Life Time) ทางด้านเอ็นของหัวต่อเป็น (1)

$$\tau_p = (1/\sigma_p v_{th} N_R) [(1 + (N_C/n_{no}) \exp\{-(E_C - E_R)/kT\}) + (\sigma_p/\sigma_n) (N_V/n_{no}) \exp\{-(E_R - E_V)/kT\}] \quad (3)$$

โดยที่  $n_{no}$  = จำนวนอิเล็กตรอนอิสระทางด้านเอ็น ซึ่งมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของสารเจือปน

$v_{th}$  = thermal velocity

$k$  = Boltzman's constant

$E_C, E_V$  = ขอบของแถบพลังงานทางด้าน Conduction และ Valence ตามลำดับ

ข. การรวมตัวกันที่ผิว (Surface Recombination Center) การรวมตัวกันของพาหะที่ผิวสามารถอธิบายได้ด้วยความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิว (Surface Recombination Velocity,  $S$ ) ในรูปของความหนาแน่นของกระแส (1)

$$\begin{aligned} J_{\text{surface}} &= qS_p (p_n - p_{no}) \text{ สำหรับสารชนิดเอ็น} \\ &= qS_n (n_p - n_{po}) \text{ สำหรับสารชนิดพี} \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่  $p_n$  และ  $n_p$  = ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย

$p_{no}$  และ  $n_{po}$  = ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยในภาวะสมดุล

ความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิว เป็นสิ่งสำคัญมากที่เดียวเนื่องจากจำนวนพาหะที่เกิดขึ้น สำหรับค่าความยาวคลื่นหนึ่งๆ นั้นจะมีค่าสูงที่สุดที่ผิว และลดลงอย่างเอ็กโปเนนเชียล เมื่อลึกลงไป ในตัวเซลา ค่า  $S$  ที่สูงที่ผิวรวมกับค่าช่วงชีวิตที่ต่ำในผลึก ทำให้เกิดการสูญเสียพาหะข้างน้อยอย่างมาก

#### การเกิดกระแสทางแสง

เมื่อแสงความยาวคลื่น  $\lambda$  ส่องลงบนผิวของสารกึ่งตัวนำ อัตราการเกิดคูโฮล-อิเล็กตรอน จะเป็นฟังก์ชันกับระยะทาง  $X$  จากผิว<sup>(1)</sup> คือ

$$G(\lambda) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1-R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda) \cdot X) \quad (5)$$

โดยที่  $F(\lambda) =$  จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบผิวต่อตารางซม. ต่อวินาที

$R(\lambda) =$  จำนวนโฟตอนที่สะท้อนจากผิว

จากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกที่กล่าวมาแล้ว รวมทั้งสมการที่ (5) และ สมการคอนทิวนิตี้สำหรับพาหะข้างน้อย สามารถหากระแสทางแสง ( $J_{pho}$ ) ได้ กล่าวคือ<sup>(1)</sup>

$$J_{pho} = J_p + J_n + J_{dr} \quad (6)$$

ในเมื่อ  $J_p$  เป็นค่ากระแสทางแสงส่วนที่เกิดจากบริเวณชั้นบนของเซลล์ชนิด เอ็น/พี

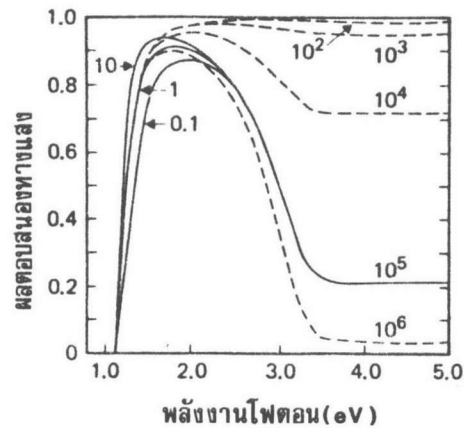
$J_n$  เป็นกระแสทางแสงที่เกิดที่ขอบของหัวต่อ (Base Region)

$J_{dr}$  เป็นกระแสทางแสงที่เกิดบริเวณปลดพาหะ

#### ผลตอบสนองทางแสง (Spectral Response)

ผลตอบสนองทางแสง คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสทางแสงที่เกิดขึ้น ต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบผิวของเซลล์ โดยแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

ก. ผลตอบสนองทางแสงภายใน (Internal Spectral Response) คือจำนวนของคูโฮล-อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำดังนั้น ผลตอบสนองทางแสง (SR) จะได้ดังสมการที่ (7)



รูปที่ 6 ผลตอบสนองทางแสงภายในจากการคำนวณของเซลล์ แบบเอ็น/พี ทำจากแวนดีลีเนียม ซึ่งมีสารเจือปนสมำเสมอทั้ง 2 ด้าน เส้นที่แสดงผลตอบสนอง เมื่อความต้านทานของแวนดีลีเนียมเป็น 10, 1 และ 0.1 โอห์ม-ซม. ตามลำดับ และมี  $S_{\text{front}} = 10^5$  ซม./วินาที ส่วนเส้นขาด แสดงผลตอบสนองทางแสงของแวนดีลีเนียม 1 โอห์ม-ซม. เมื่อค่า  $S_{\text{front}}$  เปลี่ยนไปสำหรับค่าอื่น ความหนา ( $H$ ) = 450  $\mu\text{m}$  ความลึกของหัวต่อ ( $X_j$ ) = 0.5  $\mu\text{m}$   $S_{\text{back}} = \infty$  และไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกเขตปลอดพาหะ (1)

$$SR(\lambda) = \frac{J_p(\lambda)}{qF(\lambda)(1-R(\lambda))} + \frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)(1-R(\lambda))} + \frac{J_{dr}(\lambda)}{qF(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (7)$$

ข. ผลตอบสนองทางแสงภายนอก (External Spectral Response) คือจำนวนของคู่อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบผิวทั้งหมด ดังนั้น

$$SR(\lambda)_{\text{ext}} = SR(\lambda) [1-R(\lambda)] \quad (8)$$

#### การคำนวณหาผลตอบสนองทางแสง

ผลตอบสนองทางแสงภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดเอ็น/พี ที่ทำจากสารซิลิกอน โดยถือว่ามีการเจือปนสมำเสมอบนและล่าง แสดงไว้ตามรูปที่ 6 ซึ่งคำนวณจากสมการ (7) โดยใช้ค่าต่างๆ ที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 เส้นที่แสดงผลจากการเปลี่ยนความต้านทานของฐาน โดย



ตารางที่ 1

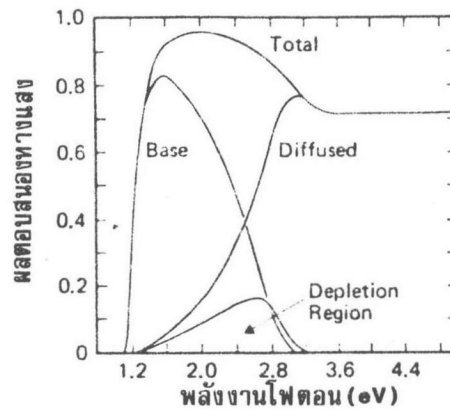
แสดงค่าคงที่ต่างๆของเซลล์ ทำจากแวนผลึกซิลิกอน (1)

เซลล์ เอ็น/พี  $N_d = 5 \times 10^{19}$ ,  $D_p = 1.295$ ,  $\tau_p = 0.4 \times 10^{-6}$

$\rho_{Base}$ ( $\Omega\text{-cm}$ )	$N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ )	$D_n$ ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )	$\tau_n$ (sec)	$L_n$ ( $10^{-4}$ cm)	$W(0 \text{ bias})$ ( $10^{-4}$ cm)	$V_d$ (V)
10	$1.25 \times 10^{15}$	1390	36	$15 \times 10^{-6}$	232	0.93	0.867
1	$1.5 \times 10^{16}$	1040	27	$10 \times 10^{-6}$	164	0.28	0.930
0.1	$5 \times 10^{17}$	420	10.9	$2.5 \times 10^{-6}$	52.2	0.05	1.022

เซลล์ พี/เอ็น  $N_a = 5 \times 10^{19}$ ,  $D_n = 2.15$ ,  $\tau_n = 1. \times 10^{-6}$

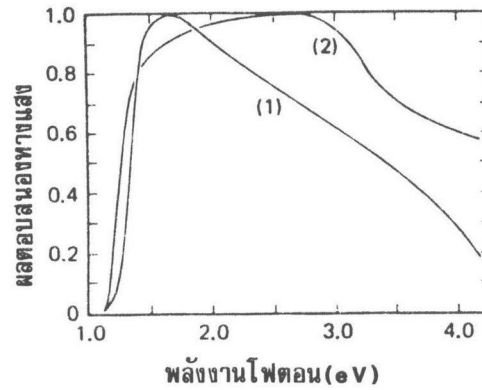
$\rho_{Base}$ ( $\Omega\text{-cm}$ )	$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ )	$D_p$ ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )	$\tau_p$ (sec)	$L_p$ ( $10^{-4}$ cm)	$W(0 \text{ bias})$ ( $10^{-4}$ cm)	$V_d$ (V)
10	$4.5 \times 10^{14}$	580	15	$15 \times 10^{-6}$	150	1.5	0.814
1	$5.1 \times 10^{15}$	500	13	$7.5 \times 10^{-6}$	98.5	0.47	0.877
0.1	$8.5 \times 10^{16}$	350	9	$1.5 \times 10^{-6}$	36.9	0.12	0.950



รูปที่ 7 ผลตอบสนองทางแสงภายในจากการคำนวณของเฮลซาแบบ เอ็น/พี ทำจากแวนผลึกซิลิกอน โดยแยกให้เห็นผลตอบสนองของแต่ละส่วน (1)

ให้ความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิว และความลึกของรอยต่อคงที่ การเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือปน ทำให้ค่าช่วงชีวิต และความยาวแห่งการแพร่ซึมของฐานลดลง เพิ่มการสูญเสีย ของพาหะที่เกิด ลึกๆ และลดผลตอบสนองกับโฟตอนที่มีพลังงานต่ำ ส่วนเส้นประแสดงผลที่เกิดขึ้น เมื่อผิวมีค่าความเร็ว แห่งการรวมตัวที่ผิวต่างๆกัน ตามรูปเห็นได้ว่า เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูง พาหะส่วนมากเกิดที่ผิว ทั้งนี้ เพราะสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูง ดังนั้นการสูญเสียจึงมีมาก เพราะความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิวสูง ( $S_p$ ) และค่าช่วงชีวิตต่ำ และเมื่อพลังงานสูงถึง 3.5 eV ผลตอบสนองทางแสง ทั้งหมดจะเกิด จากบริเวณเอ็นและอิมัวที่ค่า SR ค่าหนึ่ง สำหรับค่าความเร็วแห่งการรวมตัวต่ำ ผลตอบสนอง จะยังคงสูงและค่อนข้างเรียบ ตลอดช่วงทุกความถี่

ในรูปที่ 7 เป็นสเปกตรัมของผลตอบสนองทางแสงของเฮลซา ชนิดเอ็น/พี ซึ่งทำจากแวนผลึกซิลิกอน 1 โอห์ม-ซม. ที่แสดงไว้ในรูปที่ 6 ถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือส่วนที่เกิดจากฐาน จากบริเวณแพร่ซึม และบริเวณปลอดพาหะ เมื่อพลังงานต่ำ พาหะส่วนมากเกิดในฐาน เนื่องจาก สัมประสิทธิ์แห่งการดูดกลืนต่ำ แต่เมื่อพลังงานโฟตอนสูงเกิน 2.4 eV พาหะจากบริเวณแพร่ซึมจะ มากขึ้น และถ้าความลึกของหัวต่อน้อยกว่า 0.5 ไมครอน พาหะจากฐานจะมากขึ้นทีละน้อย และ จุดตัดระหว่างเส้นโค้งของฐานกับบริเวณแพร่ซึมจะสูงขึ้น นอกจากนี้ส่วนที่เกิดจากบริเวณแพร่ซึมจะ มากขึ้น ถ้าสามารถลดความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิวได้ ส่วนพาหะที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะ



รูปที่ 8 Relative Spectral Response ของเซลล์ ซิลิกอนแบบเอ็น/พี ที่วัดได้ (1) ค่าช่วงชีวิตต่ำ (Dead Layer) ค่าความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิวสูง และ  $x_j = 0.3-0.4 \mu\text{m}$  (1)  
(2) ไม่มี Dead Layer,  $x_j = 0.1-0.2 \mu\text{m}$

จะเด่นชัดในช่วง 2.0 ถึง 2.9 eV และจะมากขึ้นถ้าความต้านทานฐานมากขึ้น แต่ไม่เคยมากกว่า ส่วนที่เกิดจากบริเวณแพร์ซึม

#### การวัดผลตอบสนองทางแสง

วัดโดยใช้แสงสีเดียวเช่นแสงเลเซอร์และเพื่อให้เข้าใจง่าย ให้ผลตอบสนองทางแสงเป็น 1 หน่วย ที่ความยาวคลื่น ที่มีผลตอบสนองทางแสงสูงสุด ผลที่ได้เรียกว่า "Relative Spectral Response"

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Relative Spectral Response กับพลังงาน โฟตอนของเซลล์ ซึ่งทำจากแวนผลึกซิลิกอน 10 โอห์ม-ซม. ผลตอบสนองทางแสงเริ่มจากช่วง กว้างของแถบ พลังงานถึงจุดสูงสุดที่ 1.5 eV แล้วลดลง เมื่อเพิ่มพลังงานโฟตอน ทั้งนี้เนื่องจาก ค่าช่วงชีวิตในบริเวณแพร์ซึมสั้นและค่าความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิวสูง

#### ค่ากระแสลัดวงจร (Short Circuit Current)

การตอบสนองทางแสงแสดงถึงจำนวนพาหะที่เกิดขึ้นจากโฟตอนที่ตกกระทบ ดังนั้น นอก

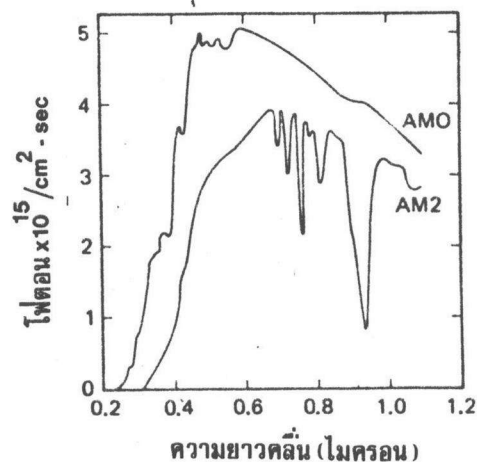
จากใช้ศึกษาลักษณะของเซลล์แล้ว ยังใช้หากระแสลัดวงจรได้ กล่าวคือ

$$J_{ph} = q \int_0^{\infty} F(\lambda) SR(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

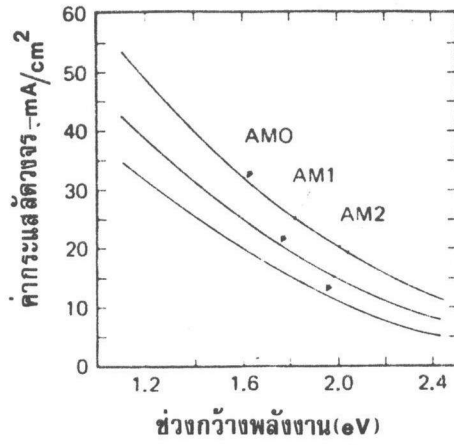
ความสัมพันธ์อันนี้ใช้ได้ตลอดไป ตราบเท่าที่พาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นโดยแสงยังมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับพาหะข้างมากของสิ่งประดิษฐ์

ตามรูป 9 แสดงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ในเทอมของจำนวนโฟตอน ต่อตารางซม.-  
วินาที ในช่วง 100 อังสตรอม จากความยาวคลื่น 0.2 ถึง 1.2 ไมครอน เส้นบนแสดงสเปกตรัม  
แสงอาทิตย์ภายนอกโลก เส้นล่างแสดงสเปกตรัมแสงที่ได้รับที่ผิวโลกโดยเฉลี่ย ขณะที่ค่อนข้างจะมี  
เมฆคลุม อัตราที่บรรยากาศโลกมีผลต่อสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่ได้รับบนผิวเซลล์ เรียกว่า "Air  
Mass"

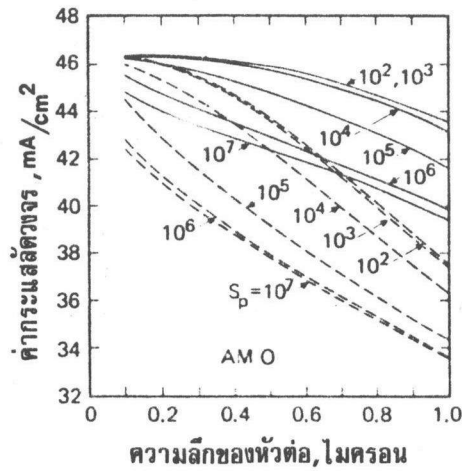
Air Mass 0 (AM0) ในรูปที่ 9 แสดงแสงอาทิตย์ภายนอกโลกซึ่งพลังงานรวมทุกค่า  
ความยาวคลื่นเท่ากับ  $135.3 \text{ mW/cm}^2$  AM2 แสดงแสงอาทิตย์บนผิวโลก เมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม  
 $60^\circ$  โดยมีพลังงานเท่ากับ  $72-75 \text{ mW/cm}^2$  ส่วน AM1 แสดงแสงอาทิตย์บนผิวโลก สำหรับ  
บรรยากาศที่พอเหมาะ พลังงานรวมประมาณ  $100 \text{ mW/cm}^2$  โดยมีขนาดอยู่ระหว่าง AM0  
กับ AM2 ในรูปที่ 9 ความแตกต่างระหว่างแสงอาทิตย์นอกโลกกับแสงอาทิตย์บนผิวโลกก็คือ แสง  
อุลตราไวโอเล็ต และ อินฟราเรด



รูปที่ 9 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ในช่วง  $100 \text{ \AA}$  Bandwidth (1)

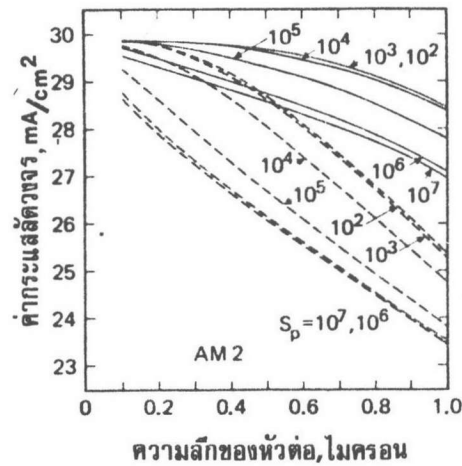


รูปที่ 10 ค่ากระแสแสงตัววงจรในอุดมคติ (1)

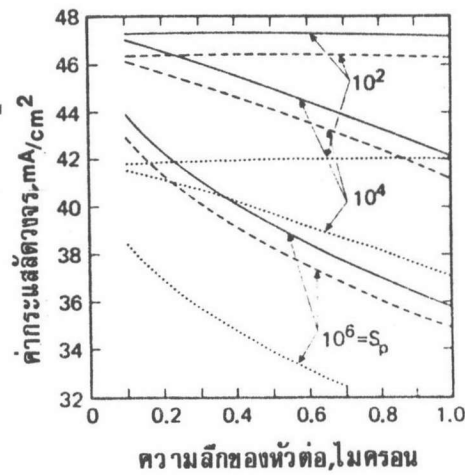


รูปที่ 11 แสดงค่ากระแสแสงตัววงจรที่ AMO ซึ่งได้จากการคำนวณ กับความลึกของหัวต่อ  
เส้นที่มีสนามไฟฟ้าด้านบน ส่วนเส้นขาดไม่มี ทั้งหมดไม่มีสนามไฟฟ้าในฐาน  $S_{back} = \infty$  (1)

เป็นที่รู้กันว่า สารที่มีช่วงกว้างแถบพลังงานมากให้  $V_{oc}$  สูงกว่าสารที่มีแถบพลังงานแคบ  
แต่ในทางกลับกันก็ให้กระแสทางแสงน้อยกว่า รูปที่ 10 แสดงค่ากระแสทางแสงกรณีอุดมคติ กล่าวคือ  
Relative Spectral Response เท่ากับ 1 ตลอดช่วงสเปกตรัม ที่มีพลังงานมากกว่าช่วงกว้าง



รูปที่ 12 ค่ากระแสแสงตัวจรที่ AM2 ซึ่งได้จากการคำนวณกับความลึกของหัวต่อ เส้นทึบ มีสนามไฟฟ้าบริเวณบน เส้นขาดไม่มี นอกนั้นเหมือนรูปที่ 11 (1)



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสแสงตัวจรที่ AMO ซึ่งได้จากการคำนวณกับ ค่าความต้านทานฐาน และความลึกของหัวต่อ (1)

ของแถบพลังงาน ( $h\nu > E_g$ ) และเท่ากับศูนย์ เมื่อพลังงานน้อยกว่า ( $h\nu < E_g$ ) แต่ตามความเป็นจริงแล้วกระแสแสงตัวจร มีค่าน้อยกว่าค่านี้เสมอ เนื่องจากการรวมตัวภายในและที่ผิว ซึ่งถ้า

ลดความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิวและด้านหลังแล้ว เพิ่มค่าความยาวแห่งการแพร่ซึมในบริเวณทั้งสอง จะสามารถลดการสูญเสียและทำให้ค่าใกล้เคียงกับค่าอุดมคติมากขึ้น วิธีการ 2 วิธีการที่จะลดการสูญเสียจากการรวมตัว ก็คือการลดความลึกของหัวต่อ และให้มีสนามไฟฟ้าอยู่ภายนอกเขตปลอดพาทะ

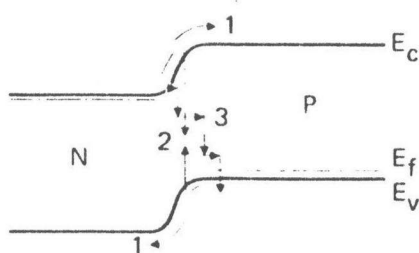
รูปที่ 11 และรูปที่ 12 แสดงค่ากระแสทางแสงที่คำนวณได้ที่ AM0 และ AM2 ตามลำดับ สำหรับเซลล์ ชนิดเอ็น/พี ทำจากแวนผลึกซิลิกอน 1 โอห์ม-ซม. โดยใช้ค่าต่างๆ ในตารางที่ 1 (ยกเว้น ค่าช่วงชีวิต ของโฮล และความยาวแห่งการแพร่ซึมให้เท่ากับ 3 nsec และ  $0.62 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งเสมือนกับเป็น Dead Layer ที่วัดกันได้ในสารที่มีฟอสฟอรัสเป็นสารเจือปน) ค่ากระแสทางแสงจะมากขึ้น เมื่อความลึกของหัวต่อน้อยลง และจะมากขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าข้างนอก จะเห็นได้ว่าความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิวสูง และค่าช่วงชีวิตต่ำ มีความสำคัญน้อยลง เมื่อความลึกของหัวต่อน้อยลง กระแสบางส่วนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียน้อยลง บางส่วนเกิดเพิ่มขึ้นจากบริเวณฐาน และเขตปลอดพาทะ

นอกจากนี้ค่ากระแสทางแสงจะมากสำหรับฐานที่มีความต้านทานสูง เพราะความยาวแห่งการแพร่ซึม และค่าช่วงชีวิตมีค่าสูง มากกว่าฐานที่มีความต้านทานต่ำ รูปที่ 13 แสดงค่ากระแสที่ได้จากฐาน 10,1 และ 0.1 โอห์ม-ซม. ของเซลล์ ชนิดเอ็น/พี ตามลำดับ

#### ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพีเอ็น

ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของเซลล์ เมื่อไม่มีแสงตกกระทบมีความสำคัญพอๆ กันกับลักษณะสมบัติของเซลล์ เมื่อมีแสง ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อไม่มีแสงจะเป็นตัวกำหนดว่าพลังงานที่เซลล์ จะจ่ายได้มีมากน้อยเท่าไร ฟิลล์แฟคเตอร์เท่าไร เป็นพลังงานสูญเสียเท่าไร

เมื่อเซลล์ กำลังจ่ายโหลดจะเกิดแรงดันคร่อมขั้วของมัน ในทิศทางไบแอสตาม ส่วนกระแสมืด (Dark Current) มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสทางแสง ดังนั้นกระแสที่จ่ายให้โหลดจะเท่ากับกระแสทางแสงลบด้วยกระแสมืด จึงจำเป็นที่เซลล์ ที่ดีจะต้องมี กระแสมืดน้อยที่สุด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด



รูปที่ 14 ลักษณะการเกิดกระแสของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อถูกไบแอสตาม (1) กระแสฉีด (2) การรวมตัวภายในเขตปลอดพาหะ (3) ลักษณะการทะลุผ่านเข้าสู่ Energy State

ในหัวต่อพีเอ็น ทั่วไป เมื่อไม่ถูกแสงจะมีกระแสไหลผ่านหัวต่ออยู่ 3 พวก กล่าวคือ

1. กระแสฉีด (Injected Current) (หมายเลข 1 ในรูปที่ 14) ประกอบด้วย อิเล็กตรอนฉีดจากทางด้านเอ็น ข้ามกำแพงศักดา (Potential Barrier) เข้าไปทางด้านพี และโฮลฉีดจากทางด้านพี เข้าสู่ด้านเอ็น โดยการแพร่ซึม (Diffuse) และพาพัด (Drift) ห่างออกจากหัวต่อแล้วค่อยๆ รวมตัวกับพาหะข้างมากในตัวเซลล์หรือที่ผิว
2. Space Charge Layer Recombination Current ( $J_{rg}$ , หมายเลข 2 ในรูปที่ 14) ในขณะที่หัวต่อพีเอ็น ถูกไบแอสตาม อิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และโฮลจากด้านพี จะถูกฉีดข้ามหัวต่อ ดังกล่าวมาแล้ว พาหะเหล่านี้บางส่วนจะรวมตัวกันภายในเขตปลอดพาหะ ทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น
3. กระแสทะลุผ่าน (Tunneling Current, หมายเลข 3 ในรูปที่ 14) เป็นกระแสอีกอันหนึ่งที่เกิดขึ้นในหัวต่อ พีเอ็นเกิดขึ้น โดยการทะลุผ่าน (Tunnel) ของอิเล็กตรอน และโฮล จากแถบ Conduction หรือแถบ Valence เข้าไปในระดับพลังงาน ภายในแถบพลังงาน หรือจะข้ามไปถึงแถบพลังงานตรงข้ามก็ได้ หรือทั้งทะลุผ่าน (Tunnel) และ รวมตัวกัน (Recombine) ก็ได้



ภายในหัวต่อพีเอ็นที่ทำจากเวเนนผลึกซิลิกอนทั่วไป กระแสแบบที่ 3 ไม่มีความสำคัญมากนัก เมื่อเทียบกับ 2 แบบแรก และยังเป็นหัวต่อที่สมบูรณ์แบบแล้ว (High Junction Perfection) แบบที่ 3 ยิ่งไม่สำคัญเลย แต่แบบที่ 2,3 จะมีความสำคัญมากทีเดียว ถ้าผลึกมีความไม่สมบูรณ์ (Defect) ในเขตปลอดพาหะ ความไม่สมบูรณ์เหล่านี้ อาจเนื่องมาจากสารแปลกปลอม (Impurities) ดิสโลเคชันและความไม่สมบูรณ์ต่างๆ ระหว่างการประดิษฐ์เซลล์

### กระแสรวม

เมื่อกระแสมีเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งแบบภายในหัวต่อพีเอ็นเราจะได้

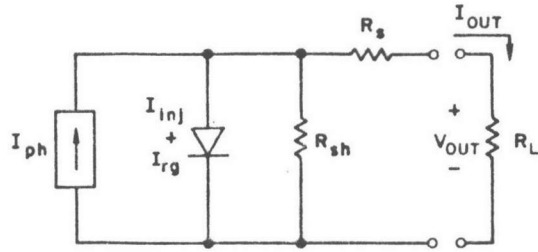
$$J_{\text{dark}} = J_{\text{inj}} + J_{\text{rd}} + J_{\text{tun}} \quad (10)$$

ความแตกต่างระหว่าง  $J_{\text{rd}}$  กับ  $J_{\text{inj}}$  ที่สำคัญก็คือ  $J_{\text{inj}} \propto \exp(qV_j/kT)$  ในขณะที่  $J_{\text{rg}} \propto \exp(qV_j/2kT)$  ดังนั้น  $J_{\text{rg}}$  จะมากกว่า เมื่อแรงดันไบแอสต่ำๆ นอกจากนี้  $J_{\text{inj}} \propto \exp(-E_g/kT)$  ขณะที่  $J_{\text{rg}} \propto \exp(-E_g/2kT)$  ดังนั้น  $J_{\text{rg}}$  จะมีความสำคัญมากสำหรับสารที่มีช่วงกว้างพลังงานมาก และอุณหภูมิต่ำ

### วงจรสมมูล

รูปที่ 15 แสดงวงจรสมมูล อย่างง่ายของเซลล์ กระแสทางแสงแทนด้วยตัวจ่ายไฟ  $I_{\text{ph}}$  และมีทิศทางตรงข้ามกับกระแส  $I_{\text{inj}} + I_{\text{rg}}$  ตอนไบแอสตาม ความต้านทานขนาน (Shunt Resistance) แทนด้วย  $R_{\text{sh}}$  ซึ่งเกิดจากการรั่วของกระแสที่ขอบของเซลล์ ตามแนวของดิสโลเคชันหรือขอบของเกรน (Grain Boundaries) ส่วนความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) เป็นความต้านทานรวมขณะที่กระแสไหลผ่านเซลล์ จากวงจรสมมูลสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสขาออก ( $I_{\text{out}}$ ) กับแรงดันขาออก ( $V_{\text{out}}$ ) ได้ดังนี้

$$I_{\text{out}} (1 + R_s/R_{\text{sh}}) = I_{\text{ph}} - (V_{\text{out}}/R_{\text{sh}}) - (I_{\text{dark}}) \quad (11)$$



รูปที่ 15 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์



ความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ เมื่อไม่คิดผลของ  $R_{sh}$  และ  $R_s$

เมื่อไม่คิดผลของความต้านทานขนานและความต้านทานอนุกรม จะได้ว่า (1)

$$I_{\text{dark}} = I_{\text{oo}} [\exp(qV_j/A_o kT) - 1] \quad (12)$$

โดยที่  $V_j$  = แรงดันที่เกิดขึ้นคร่อมหัวต่ออาจเกิดจากเซลล์ เมื่อโดนแสงส่องหรือรับมาจากภายนอก

$I_{\text{oo}}$  = ค่าอิมิตัวย้อนกลับโดยประมาณของ  $I_{\text{inj}}$  และ  $I_{\text{rg}}$  ซึ่งจะถูกตัดเมื่อค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยมีค่าสูงพอ

ส่วนสมการ (11) จะเขียนได้ใหม่เป็น

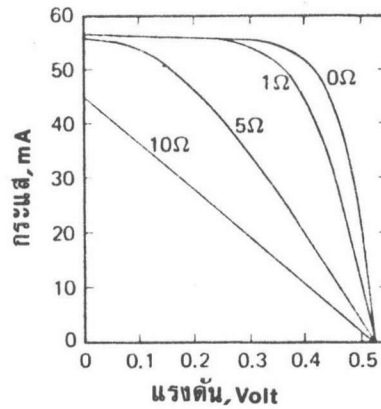
$$I_{\text{out}} = I_{\text{ph}} - I_{\text{oo}} [\exp(qV_{\text{out}}/A_o kT) - 1] \quad (13)$$

ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของสมการ (13) เมื่อ  $A_o = 1$  แสดงไว้ตามรูปที่ 2 แล้ว

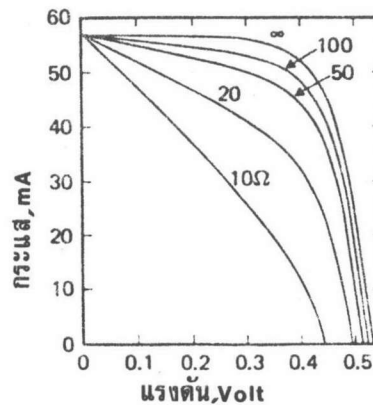
สำหรับค่ากระแสลัดวงจร และแรงดันวงจรเปิด เขียนได้ว่า

$$I_{\text{sc}} = I_{\text{ph}} \quad (14)$$

$$V_{\text{oc}} = A_o (kT/q) \ln [(I_{\text{sc}}/I_{\text{oo}}) + 1] \quad (1)$$



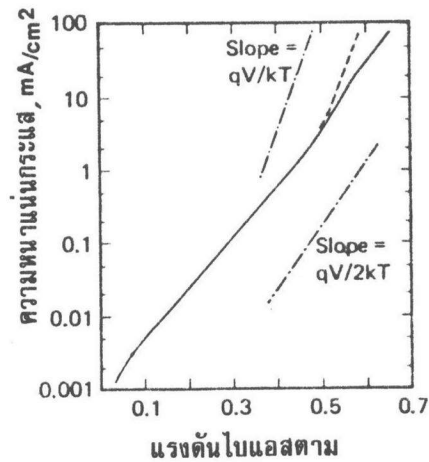
รูปที่ 16 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์<sup>(1)</sup>



รูปที่ 17 ผลของความต้านทานขนานต่อลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์<sup>(1)</sup>

เนื่องจากพลังงานขาออก คือ  $V_{out} I_{out}$  ดังนั้น  $P_{out} (max) = V_m I_m$  หาได้จาก  
ดิฟเฟอเรนเชียล สมการ  $P_{out} = V_{out} I_{out}$  แล้วให้เท่ากับศูนย์

อีกค่าหนึ่งคือค่า ฟิลล์แฟคเตอร์ (FF.) กำหนดให้เท่ากับ  $V_m I_m / I_{sc} V_{oc}$  ซึ่งใช้วัด  
ความเป็นสี่เหลี่ยมของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน



รูปที่ 18 ลักษณะสมบัติแรงดันกระแส เมื่อไม่มีแสงของเซลล์ ซิลิกอนแสดงถึงบริเวณ (1)  
ที่มีค่า Exponential แตกต่างกัน (เส้นขาดแสดงผลของ  $R_S$  เมื่อ  $R_S$  มีค่าน้อยลง)

ผลของ  $R_S$  และ  $R_{sh}$

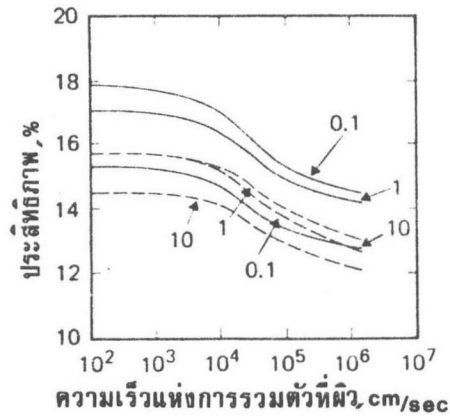
ผลของ  $R_S$  และ  $R_{sh}$  สามารถเห็นได้เด่นชัด โดยการต่อความต้านทานค่าต่างๆ สลับกัน ทั้งขนานและอนุกรมสรุปผลได้ดังรูปที่ 16 และ 17 ผลของ  $R_S$  คือ  $I_{SC}$  และ FF. มีค่าต่ำลงเมื่อ  $R_S$  มีค่าสูงขึ้น ส่วนผลของ  $R_{sh}$  คือ  $V_{OC}$  และ FF. มีค่าต่ำลงเมื่อ  $R_{sh}$  ลดลง

การศึกษาพฤติกรรมของกระแส-แรงดัน

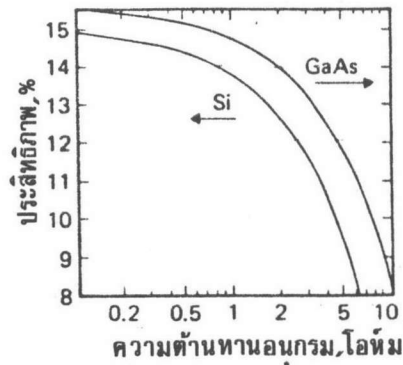
การทดลองพบว่าเซลล์ ที่ทำจากซิลิกอน ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์ จะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่อค่า  $R_S$  และ  $R_{sh}$  เปลี่ยนและยังมี  $I_{rg}$  เกิดมากกว่าในทางทฤษฎี

ในแวนผลึกซิลิกอนทั่วไป ผลของ  $R_{sh}$  หลีกเลียงได้ยาก เพราะอย่างน้อยจะมีการรั่วซึมที่ขอบของแวนผลึก ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของ  $R_{sh}$  ที่ต่ำ

จากรูปที่ 18 แสดงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ทางด้านไบแอสตาม เมื่อไม่มีแสงของเซลล์ ทำจากซิลิกอน จะเห็นว่าประกอบด้วยช่วงที่มีความชัน (Slope) ต่างกันหลายช่วงแสดงว่า

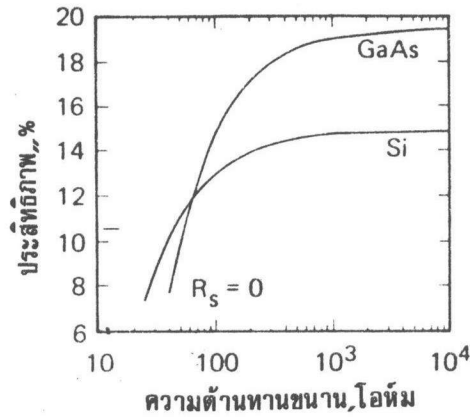


รูปที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Inherent Efficiencies ที่ได้จากการคำนวณที่ AMO ของเซลา ซิลิกอน กับความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิว  $x_j = 0.4 \mu\text{m}$  ไม่มี Drift Field ไม่มี Dead Layer  $S_{\text{back}} = \infty$   $\tau_n, \tau_p$  มีค่าสูง หนา  $457 \mu\text{m}$  (1)



รูปที่ 20 แสดงผลของความต้านทานอนุกรมต่อประสิทธิภาพของเซลาที่ AMO (1)

กระแสมีดประกอบด้วยกระแสหลายแบบ เช่น  $J_{\text{inj}}$  และ  $J_{\text{rg}}$  ในช่วง  $A_0$  เข้าใกล้ 1 (1.1-1.3) กระแสส่วนมากเป็น  $J_{\text{inj}}$  แต่เมื่อ  $A_0$  เข้าใกล้ 2  $J_{\text{rg}}$  มีค่าสูง และเมื่อ  $A_0$  อยู่ระหว่าง 1 กับ 2 กระแสจะประกอบด้วย  $J_{\text{inj}}$  และ  $J_{\text{rg}}$  อยู่ด้วยกัน



รูปที่ 21 แสดงผลของความต้านทานขนานต่อประสิทธิภาพของเซลล์ (1)

### ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งสำคัญที่สุด ในการกำหนดคุณภาพของเซลล์ ประสิทธิภาพของเซลล์ จะสูงได้ต่อเมื่อ กระแสทางแสง แรงดันวงจรเปิดและฟิลล์แฟคเตอร์ มีค่าสูง แต่ Dead Layer ความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิวสูง ค่าช่วงชีวิตต่ำ  $R_s$  สูง และค่า  $R_{sh}$  ต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำลง

### การคำนวณค่าประสิทธิภาพของเซลล์

ประสิทธิภาพของเซลล์ ( $\eta$ ) ในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า หาได้จาก

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (15)$$

$$\text{โดยที่ } P_{in} = A_t \int_0^\infty F(\lambda) (hc/\lambda) d\lambda \quad (16)$$

$$A_t = \text{พื้นที่ทั้งหมดที่รับแสง}$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \text{พลังงานของแต่ละโฟตอน}$$

### Inherent Efficiency

ถ้าคำนวณค่าประสิทธิภาพของเซลล์ โดยการเปลี่ยนแปลงค่า Dead Layer,  $J_{rg}$ ,  $S_p$ ,  $X_j$ , สนามไฟฟ้า และ  $\tau$  โดยไม่สนใจค่า  $R_s$  และ  $R_{sh}$  ( $R_s = 0$ ,  $R_{sh} = \infty$ ) ค่าที่ได้เรียกว่า Inherent Efficiency ตัวอย่างของ Inherent Efficiency ที่สัมพันธ์กับค่า  $S_p$  แสดงตามรูป 19

ค่าประสิทธิภาพที่แท้จริงของเซลล์ น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ในรูปที่ 19 เสมอ ทั้งนี้เนื่องจากการสะท้อนของแสง พื้นที่ที่ไม่โดนแสง เนื่องจากขั้วต่อบัง และพลังงานที่สูญเสียที่  $R_s$  และ  $R_{sh}$  ผลของ  $R_s$  และ  $R_{sh}$  แสดงตามรูปที่ 20 และ 21

### ผิวชำรุดและผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า

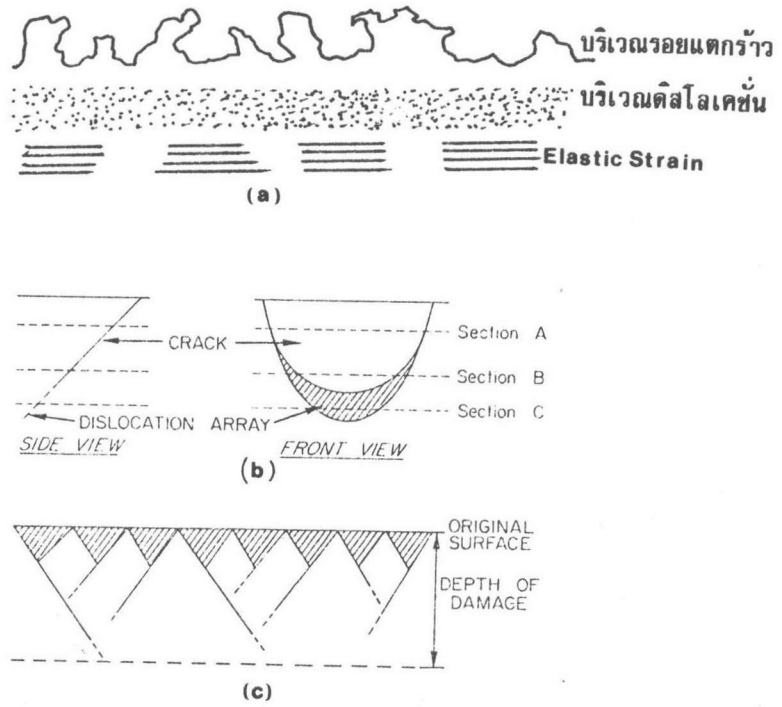
#### ผิวชำรุด (Damaged Surface) (รูปที่ 22)

สภาพผิวชำรุดที่เกิดจากขบวนการ Lapping และ Polishing ในแว่นผลึกซิลิกอนนั้น มีความชำรุดแตกต่างกันไปแล้วแต่กรรมวิธีที่ใช้ ขนาดและชนิดของผงขัด น้ำหนักที่ใช้กด และผิวรองรับด้านล่าง (ผ้าหรือกระดาษ) สิ่งที่เกิดขึ้นอาจเป็นรอยขีดข่วนเล็กๆ น้อยๆ จนกระทั่งถึงรอยชำรุดแตกร้าเป็นแถบๆ ต่อเนื่องกัน (Cracked Material in Bands) พอสรุปได้เป็น 3 แบบ ด้วยกันคือ (5,6)

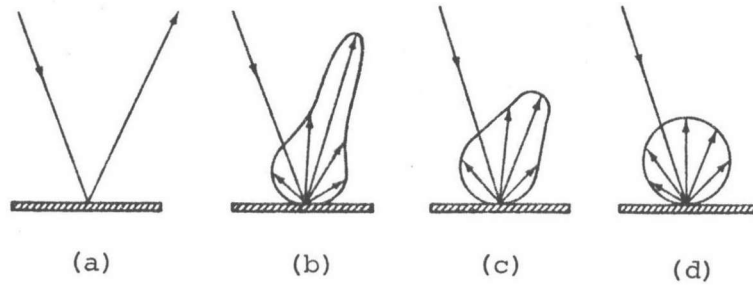
1. รอยแตกร้า (Crack) เป็น Macroscopic Damage สามารถมองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์ มีลักษณะเป็นร่องลึกขรุขระ อยู่ด้านบนสุดของผิวชำรุด มองได้เด่นชัดขึ้นด้วยวิธี Taper Section (7,8) รอยชำรุดชนิดนี้สามารถกำจัดให้หมดสิ้นด้วยวิธี Mechanical Polishing ธรรมดา โดยใช้ผงขัดลดขนาดลงเรื่อยๆ จนถึงการขัดมันขั้นสุดท้าย (Final Polishing) ซึ่งใช้ผงขัดขนาดเล็กที่สุด 0.3 ไมครอน

2. ดิสโลเคชัน\* (Dislocation) เป็น Microscopic Damage อยู่ด้านล่างของรอยแตกร้า อาจเป็นแบบ Single Dislocation เมื่อผงขัดมีขนาดเล็ก ผิวรองรับด้านล่าง

\*รายละเอียดการเกิดดิสโลเคชันจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 22 รูปแบบของผิวชำรุด (a) ลักษณะที่เกิดขึ้นจริง (b), (c) โครงสร้างอย่างง่าย



รูปที่ 23 แสดงการสะท้อนแสงจากผิววัตถุ (a) ผิวมันมีแต่ Specular Reflection (b) และ (c) มีการสะท้อนทั้งสองชนิดรวมกัน (d) ผิวหยาบที่สุดมีแต่ Diffused Reflection ผิววัตถุมีความหยาบมากขึ้นตามลำดับจาก (a) ถึง (d)



นุ่มพอ หรืออาจเป็น Dislocation Array ถ้าฝังชัดมีขนาดใหญ่ และผิวรองรับแข็ง Dislocation Line ที่เกิดขึ้น เกิดในแนวขนานกับผิวของแว่นผลึก<sup>(9,10)</sup> ดังนั้นถ้าตรวจสอบด้วยวิธี Etch Pit ธรรมดา จะไม่สามารถตรวจพบ Dislocation ที่เกิดขึ้นได้เลยจำเป็นต้องตรวจสอบด้วย Transmission Electron Microscope<sup>(6)</sup> หรือการอบความร้อน เพื่อดูรูปแบบของ Dislocation Line ที่เปลี่ยนไป<sup>(6,9)</sup>

3. Elastic Strain เกิดอยู่ล้าງ Dislocation Array เนื่องจากเมื่อแว่นผลึกโดนขัด แว่นผลึกจะเกิดการโก่งงอ<sup>(11)</sup> ซึ่งสามารถตรวจสอบการโก่งงอ และคำนวณหาค่า Elastic Strain ได้โดยวิธีทางแสง

#### ผิวขำรุคกับคุณสมบัติทางแสง

เมื่อแสงความยาวคลื่น  $\lambda$  ส่องกระทบผิววัตถุใดๆ แสงบางส่วนจะถูกดูดกลืน บางส่วนสะท้อนออกมา ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ตามสภาพผิวขำรุคกล่าวคือ<sup>(2)</sup>

ก. Specular Reflection เกิดบนผิววัตถุที่เรียบ (Smooth) ขัดมัน (Polished) ยิ่งผิววัตถุเรียบมาก (Perfect Surface) จะมีแต่ Specular Reflection เกิดขึ้นเท่านั้น

ข. Diffused Reflection การสะท้อนของแสงจะกลายเป็น Diffused Reflection มากขึ้น เมื่อผิววัตถุยิ่งมีความขำรุคมากขึ้น จากรูปที่ 23 แสดงลักษณะการสะท้อนของแสงจากผิววัตถุที่มีสภาพผิวขำรุคต่างๆกัน โดยภาพด้านซ้าย จะมีแต่ Specular Reflection ส่วนทางขวามีแต่ Diffused Reflection สำหรับ 2 ภาพกลางมี 2 อย่าง เกิดร่วมกัน

#### ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนกับสภาพผิวขำรุค

ถ้าผิวของวัตถุที่มีสภาพขำรุค ถูกส่องด้วยแสงสีเดียว การสะท้อนจะเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 แบบตามที่กล่าวมาแล้ว แต่ที่  $\lambda$  มีค่าสูงๆ การสะท้อนชนิดแรกจะเด่นชัด จนสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสภาพผิวกับการสะท้อนได้ดังนี้<sup>(12)</sup>

$$R_s = R_0 \exp[-(4\pi\sigma)^2/\lambda^2] \quad (17)$$

โดยที่  $R_s$  = Specular Reflection

$R_0$  = Specular Reflection บนผิวเรียบมาก

$\sigma$  = Root Mean Square Roughness (เป็นค่ากำหนดชนิดของสภาพผิว  
ชำรุดว่ามีมากน้อยอย่างไร)

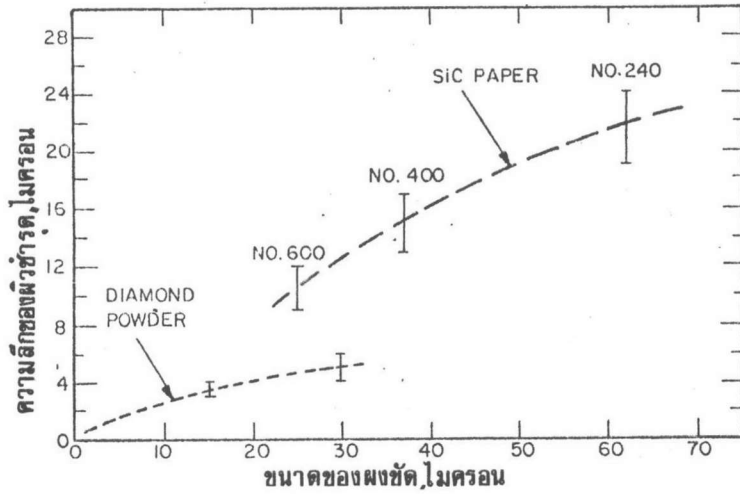
จะเห็นว่าเมื่อ  $\sigma$  มาก  $R_s$  จะมีค่าน้อย

T.M. Donovarr et al ได้ทำการขัดผิวของ Ge ด้วยวิธี Mechanical Polishing เปรียบเทียบกับวิธี Electropolishing ปรากฏว่าวิธี Electropolishing ให้แว่นผลึกที่มีความเรียบมากกว่า สภาพชำรุดน้อยกว่า และเมื่อตรวจสอบด้วยวิธีทางแสง ค่าการสะท้อนแสงจากผิวแว่นผลึกที่ขัดด้วยวิธี Electropolishing จะสูงกว่า (24, 25)

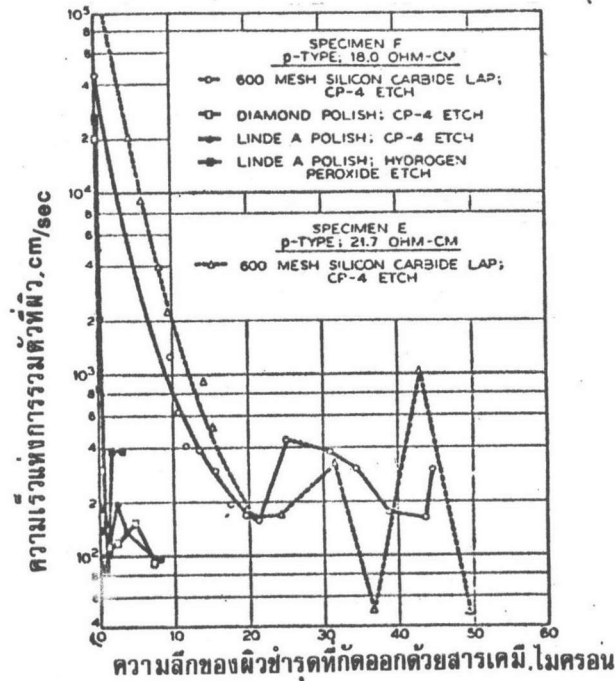
#### ผิวชำรุดกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เนื่องจากความลึกของรอยแตก ร้าว และคิสโลเคชันที่ลึกที่สุดขึ้นอยู่กับขนาดของผงขัด (รูปที่ 24) โดยตรง จึงให้ถือ เป็นความลึกของผิวชำรุด<sup>(6)</sup> ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดสภาพของผิวชำรุดนั้นๆ ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของผิวชำรุดกับค่าต่างๆทางไฟฟ้า จึงเป็นประโยชน์ในอันที่จะวิเคราะห์ผลของผิวชำรุด ต่อลักษณะสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร

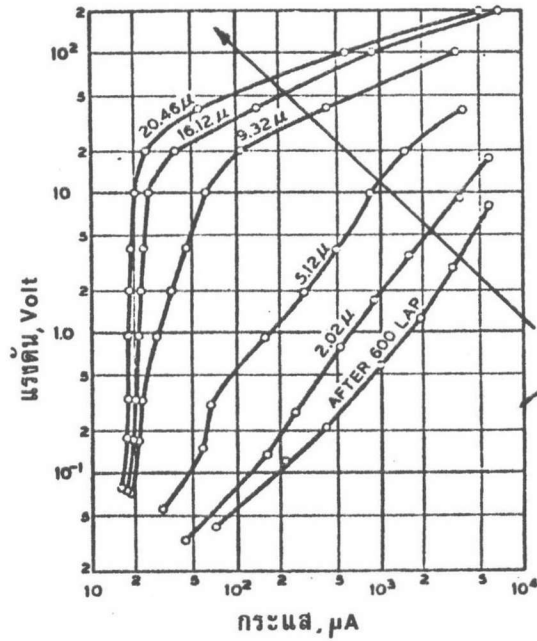
จากการตรวจสอบผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของนักวิจัยหลายกลุ่ม พบว่าเมื่อความลึกของผิวชำรุดมีค่ามากขึ้น ค่าความต้านทาน (Resistivity) ค่าความยาวแห่งการแพร่ซึม (Diffusion Length) มีค่าลดลง<sup>(13,14)</sup> ส่วนสัมประสิทธิ์แห่งการแพร่ซึม (Diffusivity Coefficient) ความเร็วแห่งการรวมตัวกันที่ผิว (Surface Recombination Velocity) และค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse Saturation Current) ของหัวต่อพี/เอ็น มีค่ามากขึ้น<sup>(15,16)</sup>



รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผงขัด กับความลึกของผิวขรุขระ จะเห็นว่า ถ้ากรรมวิธีต่างกัน ความลึกของผิวขรุขระจะต่างกัน (20)

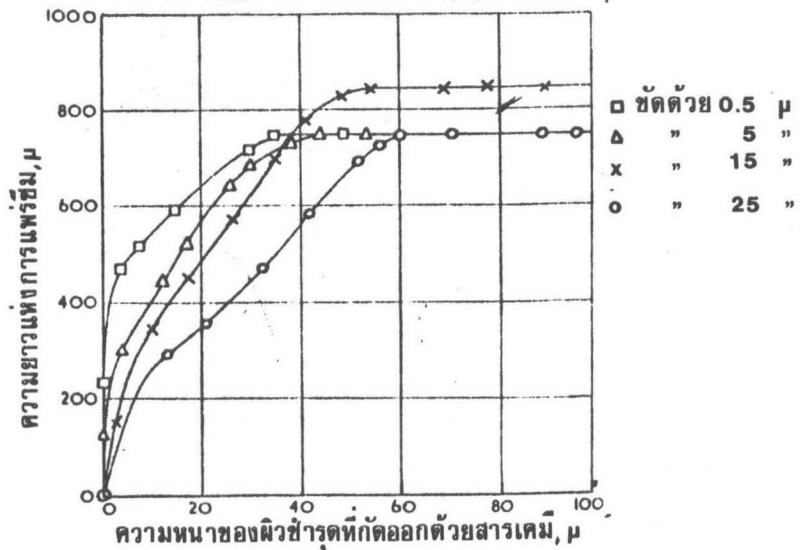


รูปที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแห่งการรวมตัวที่ผิวกับความลึกของผิวขรุขระ ที่สกัดด้วยสารเคมี (16)



ทิศลทรแสดงปริมาณผิว  
ขำรดที่สกัดออกด้วยสาร  
เคมี

รูปที่ 26 ผลของผิวขำรดต่อ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ทางด้านไบโอสัยนกลับของ  
หัวต่อพี/เอ็น (16)



รูปที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวแหวงการแพร่ซึมกับความหนาของผิวขำรด  
ที่สกัดออก (14)

T.M. Buck และ F.S. Mckim<sup>(16)</sup> ได้สรุปไว้ในการศึกษาทดลองของเขาว่า ผิวนำรูดก่อให้เกิดชั้นบางๆที่มีค่าช่วงชีวิต (Life Time) ต่ำ และเมื่อมีพาหะส่วนเกินถูกพาหัดเข้าไปจะเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว ซึ่งเขาแสดงผลการทดลองของเขาไว้ดังรูปที่ 25 และ 26 ส่วนความสัมพันธ์กับความยาวแห่งการแพร่ซึม แสดงไว้ตามรูปที่ 27

### ดิสโลเคชันและผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ดิสโลเคชัน (Dislocation) (17,18,19) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเป็นเส้นเกิดขึ้นได้จากหลายขบวนการ ตั้งแต่การปลูกผลึก จนกระทั่งถึงการทำชั้น Epitaxial แต่ในที่นี้เราสนใจเฉพาะดิสโลเคชันที่เกิดจากผิวนำรูดเท่านั้น

ดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นมีชนิดพื้นฐานอยู่ 2 ชนิด กล่าวคือ

ก. เอจิดิสโลเคชัน (Edge Dislocation) ตามรูปที่ 28 แสดงผลึก ซึ่งมีการสลิป (Slip) ทางด้านซ้าย เส้นที่แบ่งระหว่างบริเวณที่สลิปกับไม่สลิปคือ เส้นแนวดิสโลเคชันโดยมีแนวของดิสโลเคชันตั้งฉากกับทิศทางการสลิป

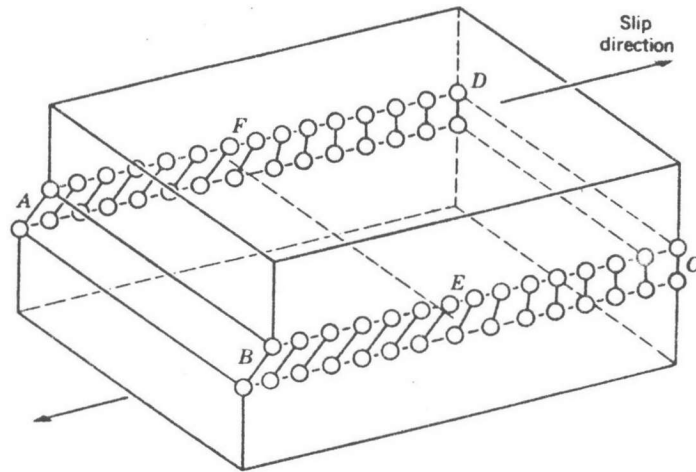
ข. สกรูดิสโลเคชัน (Screw Dislocation) ตามรูปที่ 29 สกรูดิสโลเคชันคือเส้นแบ่งระหว่างบริเวณที่สลิปกับไม่สลิปของผลึกเช่นกัน แต่แนวของดิสโลเคชันขนานกับทิศทางการสลิป

ดิสโลเคชันที่เกิดบริเวณผิวนำรูด นอกจากจะก่อให้เกิดผลทางไฟฟ้าดังกล่าวมาแล้ว ยังมีผลอย่างสำคัญภายในผลึกอีกด้วย เนื่องจากแวนผลึกเมื่อผ่านขบวนการทำผิวออกไซด์ หรือขบวนการแพร่ซึมก็ตาม ซึ่งใช้อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1000 °C) มีผลให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในแวนผลึก ความเร็วของดิสโลเคชันที่ตรวจพบในซิลิกอน เป็นปฏิภาคกับ Shear Stress<sup>(20)</sup> (รูปที่ 30) ตามความสัมพันธ์

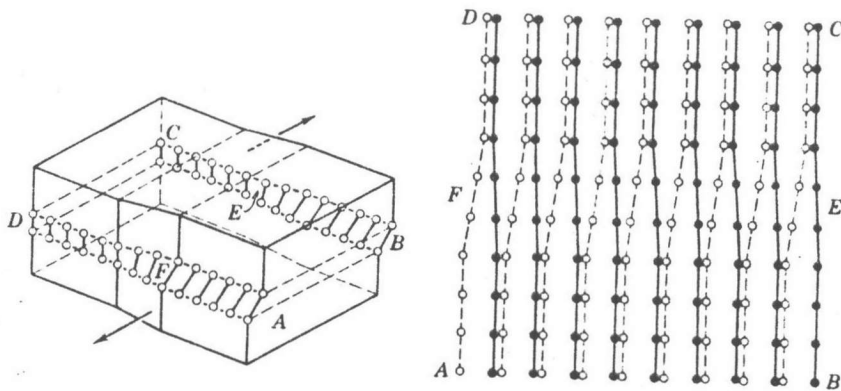
$$v \propto \tau_s \exp(-Q/kT) \quad (18)$$

โดยที่  $\tau_s =$  Shear Stress

$Q =$  Activation Energy



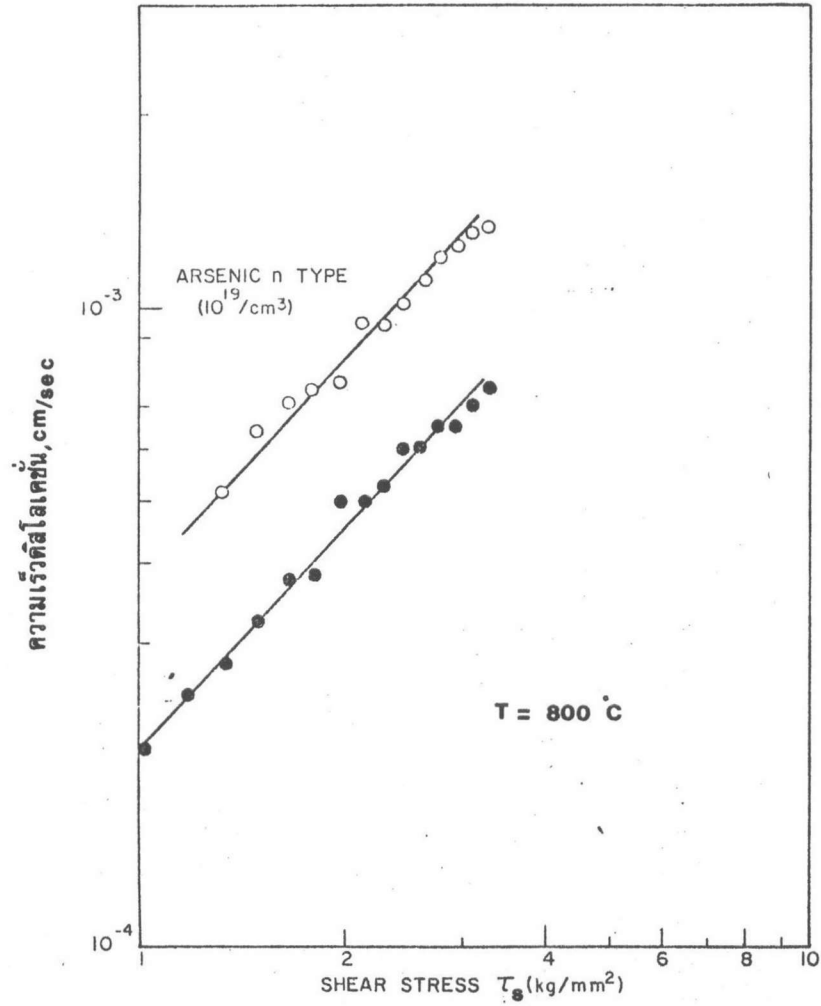
รูปที่ 28 EF คือ Edge Dislocation



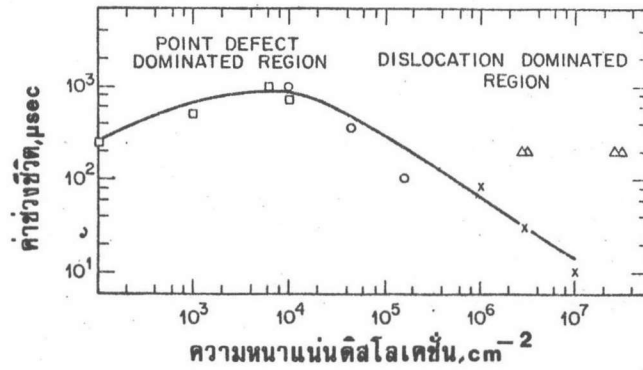
รูปที่ 29 EF คือ Screw Dislocation

เมื่อดิสโลเคชันไปปรากฏอยู่ภายในผลึก จะมีผลต่อความต้านทาน ค่าช่วงชีวิตของพาหะ  
ข้างน้อยและค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของหัวต่อพีเอ็น

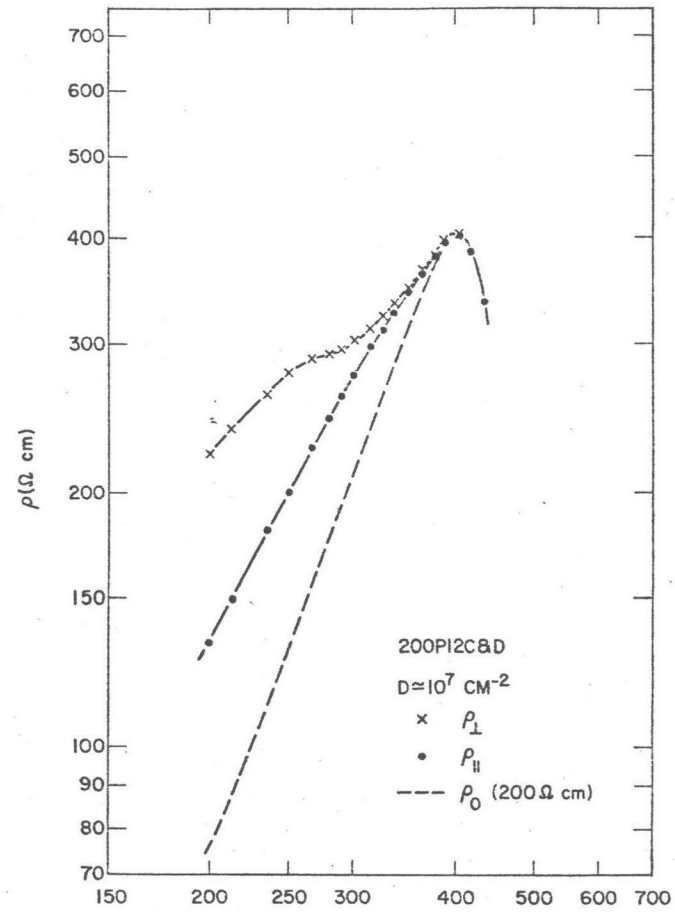
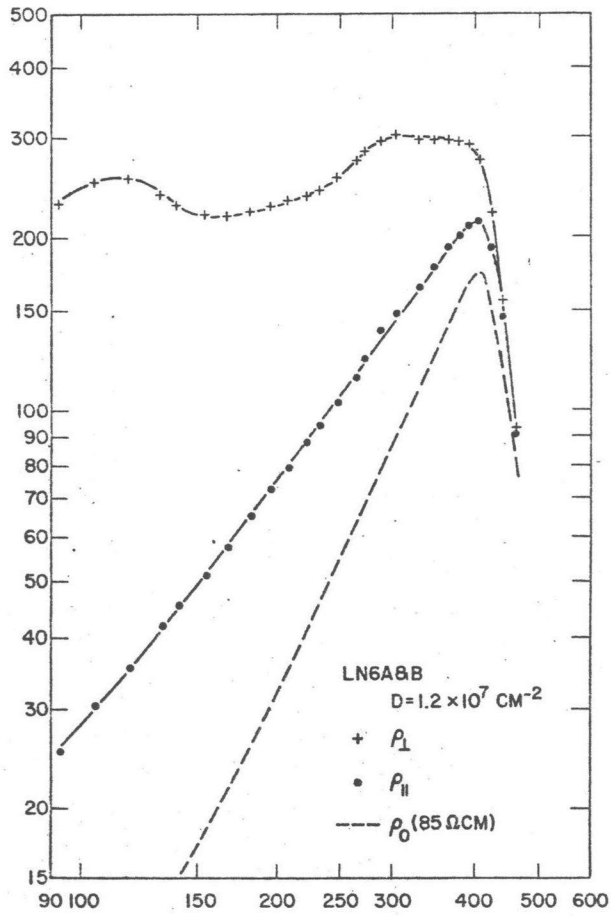
Read<sup>(21)</sup> ได้แสดงให้เห็นว่า ดิสโลเคชันมีผลต่อความนำไฟฟ้า (Conductivity) ของ  
Ge และขึ้นอยู่กับทิศทางของดิสโลเคชันด้วยตามรูปที่ 32



รูปที่ 30 ความเร็วของสกรูตูลโคเคชั่น เมื่อ Shear Stress เพิ่มขึ้น (20)



รูปที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิต กับความหนาแน่นดิสโลเคชั่น (22)

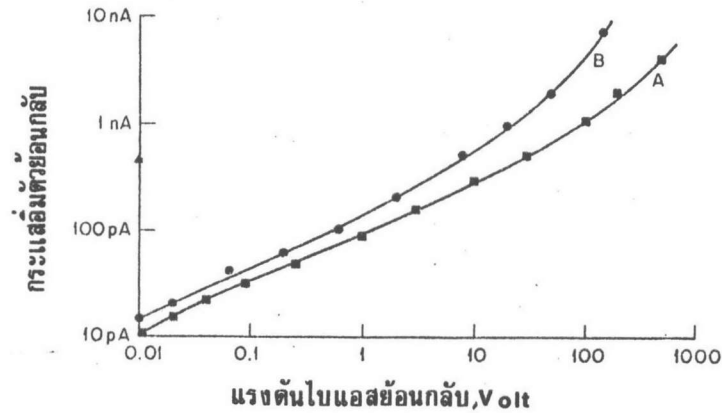


อุณหภูมิ, K

รูปที่ 32 แสดงความต้านทานเทียบกับอุณหภูมิเมื่อ  $\rho_{\perp}$  คือความต้านทานในทิศตั้งฉากกับ Dislocation Array

$\rho_{\parallel}$  คือความต้านทานในทิศขนานกับ Dislocation Array  $\rho_0$  คือความต้านทานก่อนเกิด Dislocation Array (20)





รูปที่ 33 แสดงลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน ของหัวต่อพีเอ็น ทางด้านแรงดันไบแอสย้อนกลับ (A)  $< 10^3$  Dislocation  $\text{cm}^{-2}$  (B)  $> 5 \times 10^7$  Dislocation  $\text{cm}^{-2}$  (23)

ค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย (Minority Carrier Lifetime) ก็เป็นสิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่ง ที่บุคคลหลายกลุ่มได้ทำการวิจัยและสรุปไว้ ดังรูปที่ 31 ในช่วงแรกดิสโลเคชันมีความหนาแน่นน้อย Point Defect ที่มีอยู่ในผลึกจะประพุดิตัวเป็นศูนย์รวมตัว ทำให้ค่าช่วงชีวิตต่ำ เมื่อดิสโลเคชันมีความหนาแน่นมากขึ้น Point Defect จะถูกดึงให้มารวมกับดิสโลเคชัน ศูนย์รวมตัวจะน้อยลง ค่าช่วงชีวิตจึงมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นของดิสโลเคชันมากขึ้นอีก ดิสโลเคชันเริ่มมีผลโดยประพุดิตัวเป็นศูนย์รวมตัว ทำให้ค่าช่วงชีวิตต่ำลงและต่ำลงไปเรื่อยๆ ส่วนผลต่อกระแสอิ่มตัวย้อนกลับของหัวต่อพีเอ็น แสดงไว้ตามรูปที่ 33 (23)