บทที่ 2

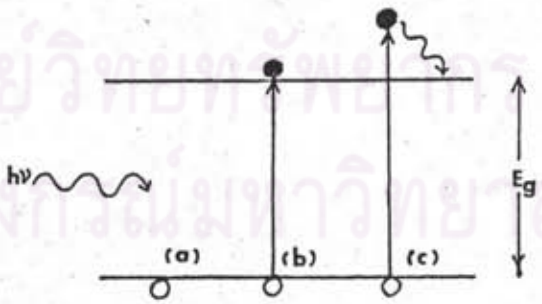
ทฤษฎี

2.1 บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ดังนั้นการทำความเข้าใจในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกจึงเป็นสิ่งที่ต้องทำความเข้าใจให้ดีก่อน ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 2.2 และ 2.3 ในหัวข้อ 2.4 จะกล่าวถึงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อ พี-เอ็น ในหัวข้อ 2.5 จะกล่าวถึงลักษณะสมบัติและพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ในหัวข้อ 2.6 จะกล่าวถึงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

2.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ (Optical Absorption In Semiconductor)

เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกฉายแสง โฟตอนจะถูกดูดกลืนและสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole pair) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 [23,24]



รูปที่ 2.1 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำ [24]

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่ 1 พลังงานโฟตอน (hν) มีค่าน้อยกว่าค่าแถบความกว้างพลังงาน (Energy Gap) ในสารกึ่งตัวนำ แสงจะส่องทะลุผ่านสารกึ่งตัวนำไปเลย เนื่องจากโฟตอนจะไม่ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำเพราะไม่มีระดับพลังงาน (Energy State) ในแถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden Band)

กรณีที่ 2 พลังงานโฟตอน (hν) มีค่าเท่ากับค่าแถบความกว้างพลังงาน (Energy Gap) โฟตอนจะถูกดูดกลืนและสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น

กรณีที่ 3 พลังงานโฟตอน (hν) มีค่ามากกว่าค่าแถบความกว้างพลังงาน (Energy Gap) นอกจากโฟตอนจะถูกดูดกลืนและสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นแล้ว พลังงานส่วนที่เกินมานี้จะแผ่กระจายออกมาในรูปของความร้อน

ความสามารถของสารกึ่งตัวนำในการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆกันกำหนดด้วยค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient) ตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert 's Law) ดังสมการที่ (2.1) [25]

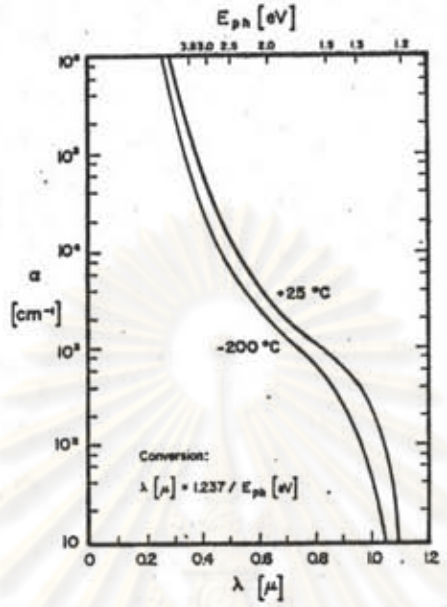
$$F(x) = F_o \exp(-\alpha(\lambda)x) \qquad (2.1)$$

โดยที่ x คือ ระยะจากผิวของสารกึ่งตัวนำ

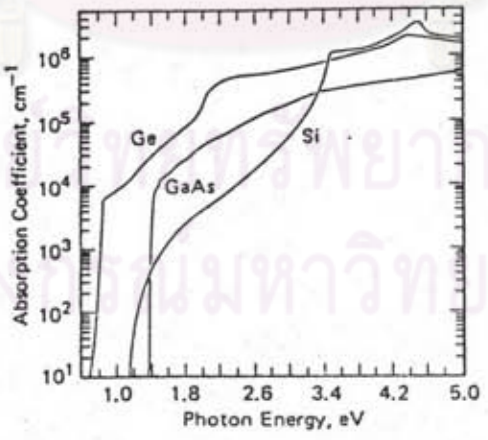
F_o คือ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำต่อตารางเซนติเมตร

$\alpha(\lambda)$ คือ ค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำที่ความยาวคลื่นใดๆ

โดยทั่วไปแล้วยิ่งความกว้างของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันมีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สภาพผิว ความหนาแน่นของสารเจือปน และความหนาแน่นของพาหะอิสระ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 และ รูปที่ 2.3 [24,26]



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิการดูดกลืนแสง
กับความยาวคลื่นและอุณหภูมิ [26]



รูปที่ 2.3 สัมประสิทธิการดูดกลืนแสงของ Si,Ge,GaAs กับค่าพลังงานโฟตอน [24]

จากสมการที่ 2.1 อิเล็กตรอน-โฮลถูกสร้างขึ้นมาเมื่อเกิดการดูดกลืนโฟตอนโดยมีอัตราการเกิด (Generation Rate) เท่ากับ [27]

$$G(\lambda,x) = \alpha(\lambda)F_o(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x) \qquad (2.2)$$

เมื่อผิวหน้ามีการสะท้อนแสงเกิดขึ้นสมการที่ 2.2 จะเปลี่ยนเป็น

$$G(\lambda,x) = \alpha(\lambda)F_o(\lambda)(1-R)\exp(-\alpha(\lambda)x) \qquad (2.3)$$

เมื่อ R คือ สัมประสิทธิการสะท้อนแสง (Reflection Coefficient)

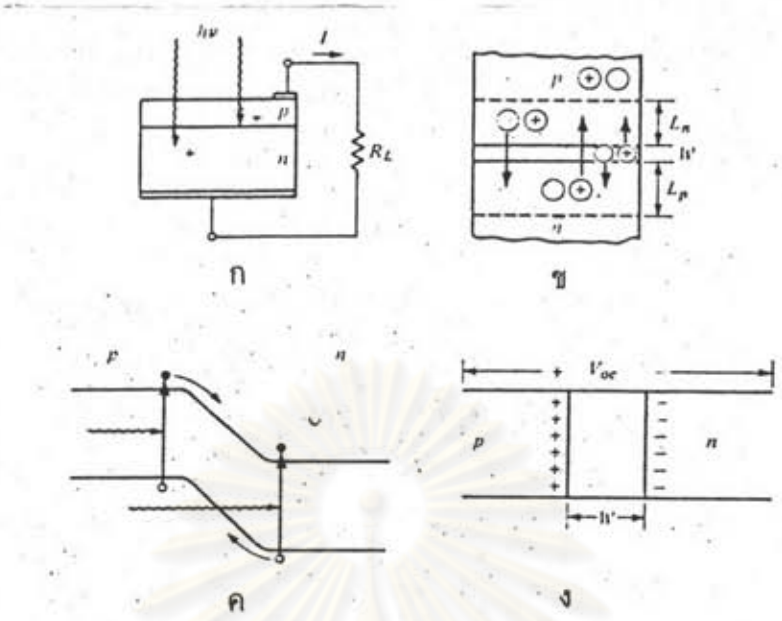
2.3 <u>ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็น</u>

กระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าในหัวต่อแบบพี-เอ็น แบ่งเป็นขั้นตอนดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ดังนี้คือ

ขั้นที่ 1 เมื่อโฟตอนถูกดูดกลืนคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกสร้างขึ้นทางด้านพีและเอ็นของหัวต่อดังแสดงไว้ในรูป 2.4 ก

ขั้นที่ 2 พาหะส่วนเกิน (Excess Minority Carrier) ซึ่งได้แก่ อิเล็กตรอนทางด้านพีและโฮลทางด้านเอ็นจะแพร่ซึมผ่านย่านปลอดพาหะ (Space Charge Region) ดังแสดงไว้ในรูป 2.4 ข

ขั้นที่ 3 สนามไฟฟ้าตรงบริเวณหัวต่อจะแยกพาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นให้ไหลข้ามหัวต่อไปที่ขั้วโลหะก่อนที่จะรวมตัวกัน (Recombine) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ค



รูปที่ 2.4 กระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า [24]

ขั้นที่ 4 ถ้าหัวต่อพี-เอ็นอยู่ในสภาพวงจรเปิด (Open Circuit) อิเล็กตรอนและโฮลที่สะสมอยู่ทั้ง 2 ข้างของหัวต่อพี-เอ็นจะสร้างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open-Circuit Voltage V_{oc}) ดังแสดงไว้ในรูป 2.4 ง และถ้าหัวต่ออยู่ในสภาพต่อลัดวงจรไว้ (Short Circuit) จะเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short-Circuit Current I_{sc}) ให้ไหลดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ก

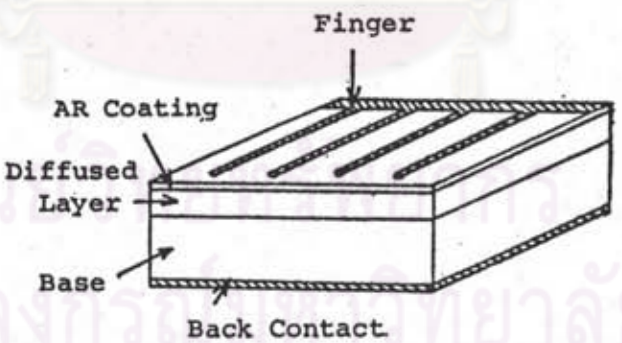
อิเล็กตรอนและโฮลบางส่วนจะถูกรวมตัว (Recombine) ไปก่อนที่จะถึงขั้วโลหะ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ [28]

1. การรวมตัวภายในแว่นผลึก (Bulk Recombination) ซึ่งเกิดการรวมตัวโดยผ่านระดับพลังงานระหว่างกลาง (Intermediate Level Centers)

2. การรวมตัวกันที่ผิว (Surface Recombination) ซึ่งเกิดจากสภาพผิว (Surface State) อาจเนื่องมาจาก สภาพแขนขาด (Dangling Bond) สารเคมีตกค้าง (Chemical Residues) ออกไซด์ (Oxide) อัตราการสูญเสียที่ผิวกำหนดได้จากความเร็วการรวมตัวที่ผิว (Surface Recombination Velocity)

2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

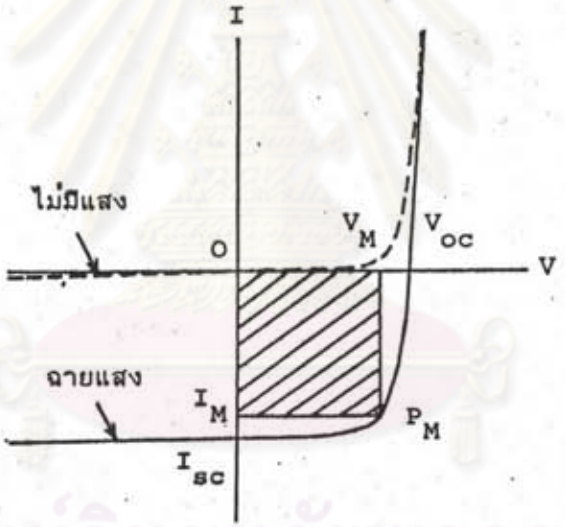
โครงสร้างหลักโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ หัวต่อพี-เอ็นที่ทำด้วยซิลิคอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 แว่นผลึกซิลิคอนที่ใช้เป็นฐานจะมีความหนาประมาณ 200-300 μm. ด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีชนิดการนำไฟฟ้าตรงข้ามกับฐานมีความหนาประมาณ 0.5 μm. การออกแบบให้ความลึกของหัวต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าน้อยๆ เพราะต้องการให้แสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ทะลุถึงหัวต่อให้มากที่สุด หากหัวต่อพี-เอ็นอยู่ลึกเกินไปจะทำให้จำนวนพาหะที่เกิดขึ้นจากการดูดกลืนแสงแพร่ซึมถึงหัวต่อได้น้อยลง ส่งผลให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตที่ได้มีจำนวนน้อยลง ดังนั้นขั้วโลหะรับแสงมักจะได้รับการออกแบบให้เป็นรูปนิ้วมือหรือรูปแบบอื่นๆ เพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด และในขณะเดียวกันขั้วไฟฟ้านั้นสามารถรวบรวมพาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าทางด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องเป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกที่ดีซึ่งฉาบไว้เต็มหน้า ผิวทางด้านรับแสงที่นอกเหนือจากขั้วโลหะแล้วยังมีชั้นต้านการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating) ปิดทับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงอีกด้วย ชั้นต้านการสะท้อนแสงนี้อาจได้แก่ SiO_2 ซึ่งทำขึ้นหนาประมาณ 800-1000 Å จากนั้นจึงนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปประกอบในแผงที่ห่อหุ้มมิดชิดสามารถป้องกันความชื้น ฝุ่นละออง ฯลฯ เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณภาพดีตลอดไป



รูปที่ 2.5 เซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็น [28]

2.5 ลักษณะสมบัติและพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

จากหัวข้อ 2.4 โครงสร้างหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่หัวต่อพี-เอ็น ซึ่งมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับไดโอดโดยทั่วๆไป กล่าวคือมีความสามารถในการเรียงกระแสไฟฟ้า (Current Rectification) ได้ ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีลักษณะสมบัติกระแส - แรงดัน ดังเส้นประในรูปที่ 2.6 ในสภาพไม่ถูกแสง เมื่อมีการฉายแสงตกกระทบหัวต่อจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวตาอิกขึ้น ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปเป็นเส้นเต็มในรูปที่ 2.6 พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งที่แรเงาคือกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์นั้นผลิตได้แต่กำลังไฟฟ้าที่จะนำไปใช้งานจริงๆ นั้น จะกำหนดได้จากการต่อโหลดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าค่าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถตรวจสอบได้โดยพิจารณาดูจากค่าพารามิเตอร์หลัก ๆ 3 ตัว คือ

1. ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage V_{oc}) เป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์

2. ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current I_{sc}) เป็นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์

3. ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor F.F.) เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (ได้แก่ผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุด V_M และกระแสไฟฟ้าสูงสุด I_M) ซึ่งกำหนดได้จากการต่อโหลดที่มีค่าเหมาะสม

$$F.F. = V_M \times I_M / (V_{oc} \times I_{sc}) \qquad (2.4)$$

พารามิเตอร์ทั้งสามตัวนี้จะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพและเงื่อนไขการต่อวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพในการแปรพลังงานจึงเขียนแสดงในรูปสูตรต่อไปนี้

$$\eta = (V_{oc} \times I_{sc} / P_{in}) \times F.F. \times 100 \qquad (2.5)$$

โดยที่ค่า P_{in} ได้แก่อินพุตที่ป้อนให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งกำหนดได้จากความเข้มของแสงอาทิตย์ซึ่งมีหน่วยคิดเป็นวัตต์ต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย

ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบหัวต่อพี-เอ็นนั้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ โดยกำหนดจากความสูงของแบเรียที่หัวต่อนั้นๆ ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดมักเขียนแสดงอยู่ในรูปฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) ค่ากระแสไฟฟ้ามืด (Dark Current I_o) ของหัวต่อ และแฟกเตอร์ที่แสดงความเป็นอุดมคติ (Ideality factor n)ของหัวต่อ ดังสมการ

$$V_{oc} = nkT/q\ln\{(I_{sc}/I_o)+1\} \qquad (2.6)$$

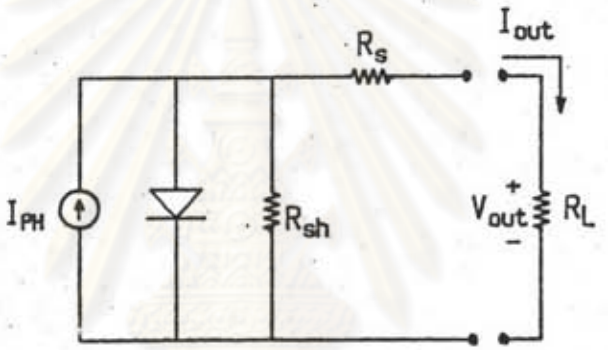
สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีหัวต่อที่สมบูรณ์แบบจะมีค่า n เท่ากับ 1 และจะทำให้ได้ค่า V_{oc} สูงสุด และหากค่ากระแสไฟฟ้ามืด I_o มีค่าน้อยจะทำให้ V_{oc} มากขึ้น ซึ่งค่า I_o มีความสัมพันธ์กับค่าความยาวในการแพร่ซึม (Diffusion Length) ค่าเวลาชีวิตของพาหะ

(Carrier Life Time) ค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ของแว่นผลึก [29-32] ดังสมการ

$$I_o = q[n_{po}(D_n/\tau_n)^{1/2} + p_{no}(D_p/\tau_p)^{1/2}] \qquad (2.7)$$

2.6 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์และค่าพารามิเตอร์ภายในที่เกี่ยวข้อง

วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่ใช้งานสามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อ R_s คือ ความต้านทานอนุกรม (Series Resistance)ของเซลล์แสงอาทิตย์

R_{sh} คือ ความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)ของเซลล์แสงอาทิตย์

R_L คือ ความต้านทานโหลด (Load Resistance)

I_{ph} คือ กระแสไฟฟ้าโฟโตของเซลล์แสงอาทิตย์

I_{sh} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานขนาน

I_{out} คือ กระแสไฟฟ้าขาออกเมื่อต่อโหลด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

R_s กำหนดได้จากค่าความต้านทานของผิวสัมผัสทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง รวมกับค่าความต้านทานของผลึกฐานและชั้นแพร่ซึมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น

R_{sh} กำหนดค่าได้จากสภาพของหัวต่อที่ทำขึ้น เช่น การเกิดกระแสรั่วตามขอบเซลล์ฯ ความไม่สม่ำเสมอของหัวต่อได้แก่การมี Diffusion Spike เนื่องจากความบกพร่องทางผลึกต่างๆ หรือเกิดรอยเชื่อมตามรอยแยกขนาดจิ๋ว (Microcrack) ตามขอบของเกรน (Grain Boundary) หรือจุดบกพร่องทางผลึก (Crystal Defect) ที่สะสมกันมาหลังจากการทำขั้วโลหะ

I_{ph} เป็นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการฉายแสงลงบนเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาดูจากวงจรสมมูลแล้วจะเห็นได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ในทางอุดมคตินั้นควรเป็นไดโอดที่มีหัวต่อที่มีคุณภาพดี โดยมีค่า R_{sh} เป็น ∞ และค่า R_s เป็น 0 แต่ในทางปฏิบัติแล้วการสร้างหัวต่อที่สมบูรณ์แบบนั้นทำได้ยาก เพราะผลึกสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีจุดบกพร่องทางผลึกอยู่ก่อนแล้ว และเมื่อมาทำหัวต่อที่มีพื้นที่กว้างโดยการเติมสารเจือปนที่อุณหภูมิสูง ก็จะได้หัวต่อที่มีความสม่ำเสมอที่ดีได้ด้วยขีดจำกัดขนาดหนึ่งเท่านั้นเพราะจะเกิด Diffusion Spike ขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุของกระแสรั่วทำให้ค่า R_{sh} ไม่เป็น ∞ ส่วนค่า R_s ก็เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จึงมีค่าไม่เป็น 0 Ω ดังนั้นการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดคือพยายามทำให้ค่า R_{sh} มีค่ามากที่สุด ในขณะที่มีค่า R_s มีค่าน้อยที่สุด

จากรูปที่ 2.7 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{out} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \qquad (2.8)$$

โดยที่ I_d คือ กระแสไฟฟ้ามืด (Dark Current) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$I_d = I_s[\exp((V_{out}+I_{out}R_s)/nV_T)-1] \qquad (2.9)$$

เมื่อ I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับขณะที่ไม่ฉายแสง (Reverse Saturation Current)

V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage)

I_{out} คือ กระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current)

V_T คือ แรงดันไฟฟ้าเทอร์มอล (Thermal Voltage) มีค่าประมาณ 26 mV. ที่อุณหภูมิ 300°K

q คือ ค่าประจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $1.6023X10^{-19}$ Coulomb

n คือ ค่าแสดงความเป็นอุดมคติ

และโดยที่

$$I_{sh} = (V_{out}+I_{out}R_s)/R_{sh} \qquad (2.10)$$

ในกรณีที่ V_{out} มีค่ามากกว่า V_T มากๆ สมการที่ (2.9) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้คือ

$$I_d = I_s[\exp((V_{out}+I_{out}R_s)/nV_T)] \qquad (2.11)$$

แทนสมการที่ (2.10) และ (2.11) ลงในสมการที่ (2.8) ดังนั้น สมการที่ (2.8) จะกลายเป็น

$$I_{out} = I_{ph} - I_s[\exp((V_{out}+I_{out}R_s)/nV_T)] - (V_{out}+I_{out}R_s)/R_{sh} \qquad (2.13)$$

ผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้โดยใช้วิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์ (Numerical Calculation) โดยเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ดูภาคผนวก ก) [28,32-36] หรืออาจใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PC1D [37] ทำการวิเคราะห์ออกมา จะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 4

014157