

บทที่ ๒
เซลล์รับพลังงานแสง



๒.๑ บทนำ

พลังงานไฟฟ้าถูกผลิตขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดได้หลายชนิด แสงก็เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้ด้วย ในปี คศ. ๑๘๘๗ Hertz. เป็นผู้พบปรากฏการณ์นี้โดยทำให้อิเล็กตรอนเป็นอิสระหลุดจากผิวของโลหะ เมื่อได้รับแสงตกกระทบ. ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า 'Photo-electric Effects' นอกจากนี้เมื่อนำสารบางชนิดไปเติมสารเจือปนให้เป็นสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อ พี-เอ็น ในเตาแพร่ซึม ก็จะได้แสดงคุณสมบัติเป็นตัวนำเมื่อป้อนแรงดันให้แก่อรอยต่อ พี-เอ็น แบบ forward bias ถ้ารอยต่อ พี-เอ็น นี้ได้รับแสงตกกระทบก็จะให้กระแสไฟฟ้าตรงออกมา ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า 'Photo Effects'

อย่างไรก็ตาม เซลล์รับพลังงานแสงสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะการทำงานได้ ๓ ประเภทใหญ่ ๆ คือ

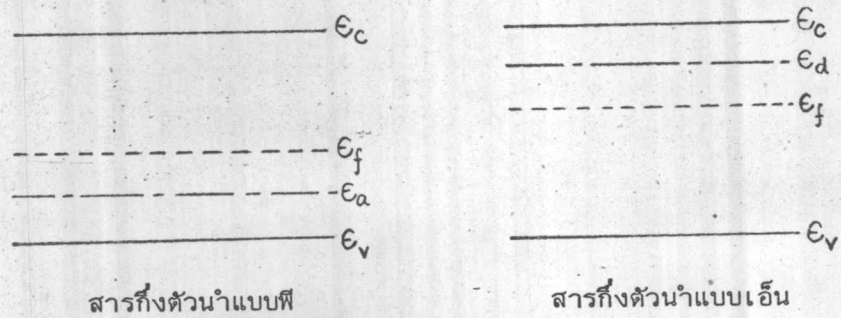
ก. Photoemissive cells เมื่อได้รับพลังงานแสงก็จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนเป็นอิสระหลุดจากขั้วโลหะคาโทด (Cathode) ซึ่งขั้วโลหะนี้จะถูกบรรจุในหลอดสุญญากาศ หรือหลอดซึ่งบรรจุก๊าซบางชนิดไว้

ข. Photoconductive cells ค่าความเป็นตัวนำทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำนี้

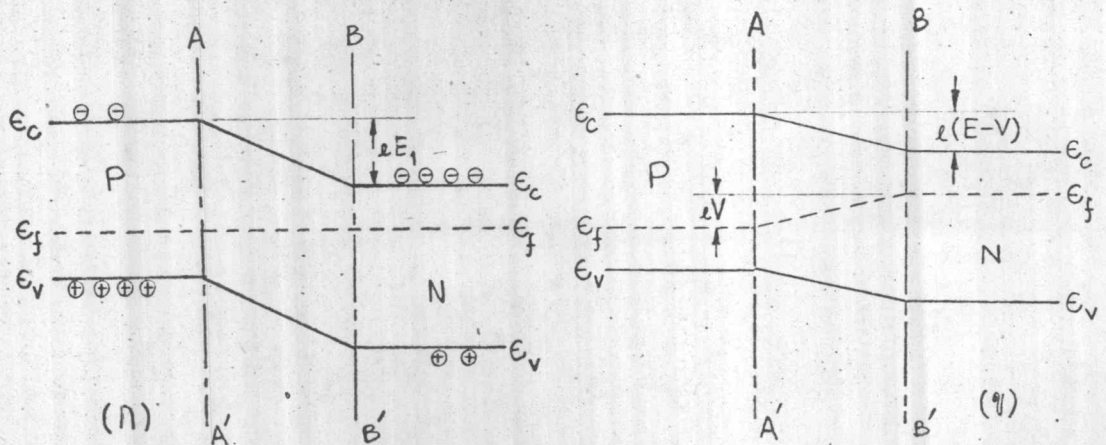
ค. Photovoltaic cells ค่ากระแส reverse-bias ของรอยต่อพี-เอ็น จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสงที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ เมื่อต่อความต้านทานภายนอกจะเกิดกระแสไหล เมื่อปล่อยให้ทั้งสองของรอยต่อ พี-เอ็น ก็จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของรอยต่อ พี-เอ็น เซลล์รับพลังงานแสงชนิดนี้จะถูกนำมาใช้งานเกี่ยวกับด้านผลิตพลังงานไฟฟ้า

๒.๒ รอยต่อ พี-เอ็น (p-n Junction)

เซลล์รับพลังงานแสงนี้เป็นแบบ Photovoltaic cells ซึ่งมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยชั้นของสารที่เติมสารเจือปนให้เป็นแบบ พี (p-type) และแบบ เอ็น (n-type) แล้วนำมาต่อกันในเตาแพร์ซิมทำให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็น ทำให้สามารถดูดกลืนโฟตอน (Photon) ได้เป็นจำนวนมากที่บริเวณใกล้กับรอยต่อ พี-เอ็น



รูปที่ ๒.๑ แสดงระดับพลังงาน (energy level) ระดับต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ ๒.๒ แสดงระดับพลังงานของรอยต่อ พี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำ

(ก) รอยต่อแบบ พี-เอ็น ในสภาวะสมดุล

(ข) รอยต่อแบบ พี-เอ็น เมื่อได้รับ forward bias voltage V.

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำแบบพี มาต่อกับแบบเอ็น ดังแสดงในรูปที่ ๒.๒ แล้ว fermi level จะต่อกันมีระดับเท่ากันโดยตลอด เป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ที่รอยต่อ (contact potential) คล่อมรอยต่อแบบ พี-เอ็น มีค่าเป็น eE_1 ซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลคือไม่มีกระแสไหลระหว่างรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ ๒.๒ (ก), พิจารณาการไหลของอิเล็กตรอน และโฮลจากด้านพี ไปด้านเอ็น, อิเล็กตรอนจากด้านพีสามารถข้ามรอยต่อ AA' ไปยัง BB' ได้ง่าย เพราะเคลื่อนที่ลงเขา (down hill) แต่ความหนาแน่น (density) ของอิเล็กตรอนทางด้านพีมีจำนวนน้อย เนื่องจากเป็น minority carrier ของด้านพี ส่วนโฮลจะเปรียบเสมือนเคลื่อนที่ขึ้นเขา (up hill) จากรอยต่อ AA' ไป BB' โฮลเป็น majority ของด้านพี จึงมีจำนวนมาก โฮลที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ eE_1 เท่านั้นที่สามารถข้ามรอยต่อไปยังด้านเอ็นได้ จำนวนโฮลที่สามารถข้ามรอยต่อได้มีจำนวนเท่ากับ $\exp(-eE_1/kT)$

ในทางกลับกัน เมื่อพิจารณาการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลจากด้านเอ็นไปด้านพี, อิเล็กตรอนซึ่งเป็น majority carrier ของด้านเอ็นจะเคลื่อนที่ขึ้นเขา ดังนั้นจำนวนของอิเล็กตรอนที่ข้ามรอยต่อไปด้านพีได้มีจำนวนเท่ากับ $\exp(-eE_1/kT)$ ส่วนโฮลซึ่งเป็น minority carrier จะสามารถเคลื่อนที่ลงเขาไปยังด้านพีได้ ดังนั้น

$$I_1 = k_1 n_1$$

$$I_2 = k_2 n_2 \cdot e^{-eE_1/kT}$$

$$I_3 = k_3 n_3 \cdot e^{-eE_1/kT}$$

$$I_4 = k_4 n_4$$

$$\therefore I_j = -I_1 + I_2 + I_3 - I_4$$

$$= -(k_1 n_1 + k_4 n_4) + (k_2 n_2 + k_3 n_3) \cdot e^{-eE_1/kT} \quad (๑)$$

ในสภาวะสมดุล, $I_j = 0$

จากสมการที่ (๑)

$$\begin{aligned} \therefore 0 &= -(k_1 n_1 + k_4 n_4) + (k_2 n_2 + k_3 n_3) \cdot e^{-eE_1/kT} \\ k_1 n_1 + k_4 n_4 &= (k_2 n_2 + k_3 n_3) \cdot e^{-eE_1/kT} \quad (๒) \end{aligned}$$

ถ้าป้อนแรงดันบวก V เข้าทางด้านพี ดังแสดงในรูป ๒.๒ (ข) จะทำให้ความต่างศักย์ระหว่างด้านพีกับด้านเอ็นลดลง จาก eE_1 มาเป็น $e(E_1 - V)$ เป็นผลให้ majority carrier ของด้านพี และด้านเอ็นสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้มากขึ้น คือเพิ่มจาก $\exp(-eE_1/kT)$ เป็น $\exp[-e(E_1 - V)/kT]$ แต่ minority carrier ที่ข้ามรอยต่อแบบลงเขา ยังมีจำนวนเท่าเดิม ไม่เปลี่ยนแปลง

จากสมการที่ (๑)

$$\begin{aligned} \therefore I_j &= -(k_1 n_1 + k_4 n_4) + (k_2 n_2 + k_3 n_3) \cdot e^{-e(E_1 - V)/kT} \\ &= -(k_1 n_1 + k_4 n_4) + (k_2 n_2 + k_3 n_3) \cdot e^{-eE_1/kT} \cdot e^{eV/kT} \quad (๓) \end{aligned}$$

ถ้าป้อนแรงดันลบ V เข้าทางด้านพี จะเป็นผลให้ความต่างศักย์ระหว่างด้านพีกับด้านเอ็น เพิ่มขึ้นไปอีก เป็น $e(E_1 + V)$ เป็นผลให้ majority carrier ของด้านพี และด้านเอ็นที่สามารถข้ามรอยต่อแบบขึ้นเขาได้จำนวนน้อยลงไปอีก หรือไม่สามารถข้ามไปได้เลย ถ้าแรงดันลบ V มีค่าสูงมาก เพราะทำให้ค่า $\exp[-e(E_1 + V)/kT]$ มีค่าใกล้ศูนย์

จากสมการที่ (๓)

$$I_j = -(k_1 n_1 + k_4 n_4) = -I_0 \quad (๔)$$

แทนค่าสมการที่ (๒) ในสมการที่ (๓)

$$I_j = -(k_1 n_1 + k_4 n_4) + (k_1 n_1 + k_4 n_4) \cdot e^{eV/kT}$$

แทนค่าด้วยสมการที่ (๔)

$$\begin{aligned} \therefore I_j &= -I_0 + I_0 \cdot e^{eV/kT} \\ I_j &= I_0 (e^{eV/kT} - 1) \quad (๕) \end{aligned}$$

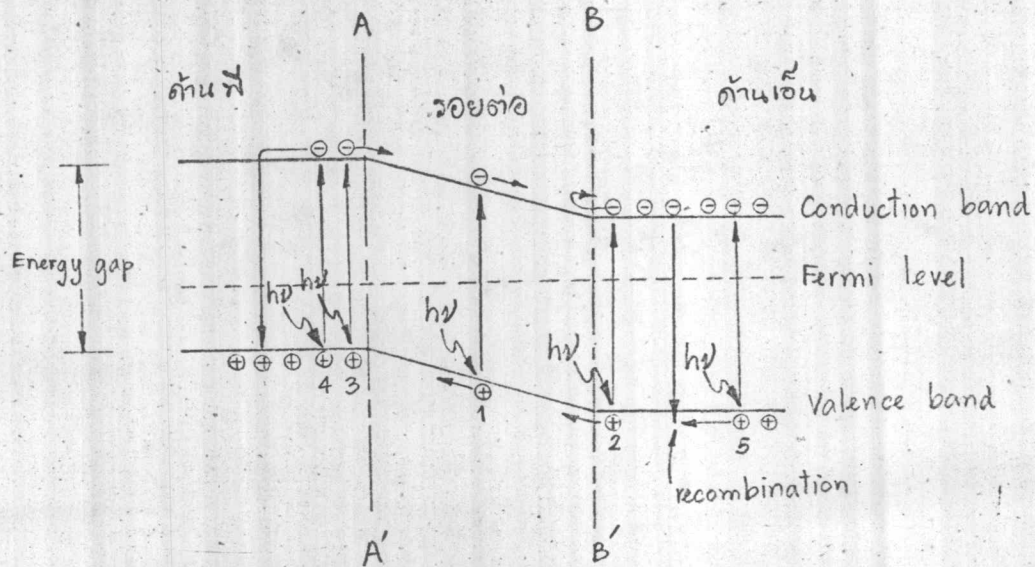
สมการที่ (๔) เป็นสมการการทำงานของรอยต่อ พี-เอ็น เมื่อรอยต่อ พี-เอ็น ไม่ได้รับแสง แต่ถูกบ่อนแรงดัน V เข้าที่ปลายทั้งสองของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ ๒.๓



รูปที่ ๒.๓ แสดง I-V Curve ของรอยต่อ พี-เอ็น ของเซลล์รับพลังงานแสง

๒.๓ การทำงานเมื่อมีพลังงานแสงตกกระทบ

เมื่อมีแสงหรือโฟตอน (photons) มาตกบนเซลล์รับพลังงานแสง (photovoltaic cell) จำนวนโฟตอนบางส่วน จะถูกสะท้อนกลับไป, ถูกดูดกลืน หรือผ่านทะลุไปได้ โฟตอนส่วนที่ถูกดูดกลืนที่มีพลังงานเพียงพอ คือ $h\nu \gg eE_g$ จะทำให้เกิด electron - hole pairs ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า 'photovoltaic effects' เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ eE_g หรือมากกว่าไปชนกับ valence electron ซึ่งจะดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนจนมีพลังงานเท่ากับ eE_g หรือมากกว่า ทำให้ valence electron นั้นสามารถขึ้นไปอยู่ใน conduction band ได้โดยทิ้งโฮลไว้ที่ valence band ทำให้เกิด electron-hole pair ขึ้น electron-hole pair นี้สามารถเกิดได้ทุกตำแหน่งตลอดรอยต่อแบบ พี-เอ็น



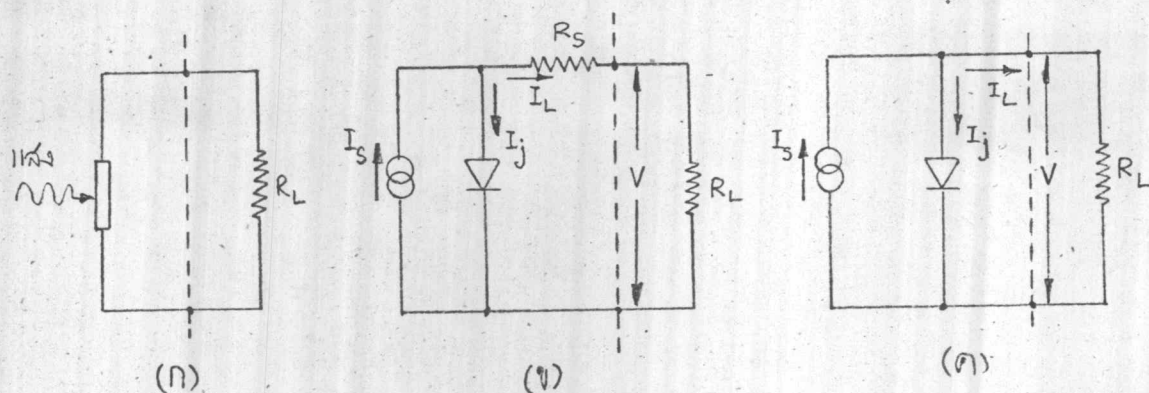
รูปที่ ๒.๔ แสดงการเกิด electron-hole pairs ของเซลล์รับพลังงานแสง เมื่อมีแสงที่มีพลังงาน $h\nu > eE_g$ ตกกระทบ

จากรูปที่ ๒.๔, ในตำแหน่งที่ ๑ เป็นบริเวณรอยต่อของ พี กับ เอ็น ซึ่งมีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง เมื่อได้รับพลังงาน $h\nu$ ก็จะเป็นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ photovoltaic effects ขึ้น คือทำให้เกิด electron-hole pair ขึ้น ณ ตำแหน่งนั้น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกพัดพาไป (drift) เข้าหาด่านเอ็น และโฮลจะถูกพัดพาไปเข้าหาด่านพี ทำให้เกิดการสมดุลย์ในการ transfer ของประจุไฟฟ้า ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น neutral region ถ้า electron-hole pair ถูกสร้างขึ้นบริเวณใกล้กับรอยต่อทางด้านเอ็นในตำแหน่งที่ ๒ minority particle (โฮล) ก็จะถูกพัดพาเข้าหารอยต่อเพื่อข้ามไปด่านพี แต่ majority particle (อิเล็กตรอน) ส่วนมากจะไม่สามารถข้ามความต่างศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อไปได้ ถ้า electron-hole pair ถูกสร้างขึ้นบริเวณใกล้กับรอยต่อทางด้านพีในตำแหน่งที่ ๓ minority particle (อิเล็กตรอน) จะถูกพัดพาเข้าหารอยต่อเพื่อ ข้ามไปยังด่านเอ็น แต่ majority particle (โฮล) ส่วนมากจะไม่สามารถข้ามความต่างศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อไปได้ ในกรณีที่ electron-hole pair ถูกสร้างขึ้นในบริเวณซึ่งอยู่ไกลจากรอยต่อทั้งทางด้านพี และด่านเอ็น (ในตำแหน่งที่ ๔ และ ๕) minority particle บางส่วนอาจเกิดการรวมตัว (recombination) กับ majority particle ก่อนที่จะข้ามรอยต่อไปยังอีกด้านหนึ่ง เป็นผลให้ไม่มีประจุไฟฟ้าส่วนนั้นไหลข้าม

รอยต่อ อาจถือได้ว่าเป็นการสูญเสียในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าได้

๒.๔ วงจรสมมูลและคุณสมบัติของเซลล์รับพลังงานแสง

เมื่อต่อปลายทั้งสองของเซลล์รับพลังงานแสงแบบสัตวงจร จะเกิดกระแสไหลซึ่งเป็น minority carrier เรียกว่ากระแสสัตวงจร (I_s) สำหรับรังสีหรือแสงที่มีรูปลักษณะอย่างหนึ่ง กระแสสัตวงจรจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มของรังสี หรือแสง ที่ตกบนเซลล์รับพลังงานแสง เมื่อต่อภาระ (load) ภายนอกเข้ากับปลายทั้งสองของเซลล์รับพลังงานแสง ก็จะทำให้เกิดแรงดันคล่อมภาระเป็น V ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าความต่างศักย์ระหว่างรอยต่อ พี-เอ็น ดังนั้นสามารถเขียนวงจรมูลของเซลล์รับพลังงานแสงเป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง มีไดโอดต่อคล่อมแบบ forward bias และมีความต้านทานต่ออนุกรมกับขั้วขาออก (output terminal) ดังแสดงในรูปที่ ๒.๕ (ก)



รูปที่ ๒.๕ (ก) เซลล์รับพลังงานแสงเมื่อต่อปลายทั้งสองเข้ากับภาระ R_L

(ข) วงจรมูลทางไฟฟ้าของเซลล์รับพลังงานแสง

(ค) วงจรมูลทางไฟฟ้า ของเซลล์รับพลังงานแสง เมื่อไม่คิดค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_s)

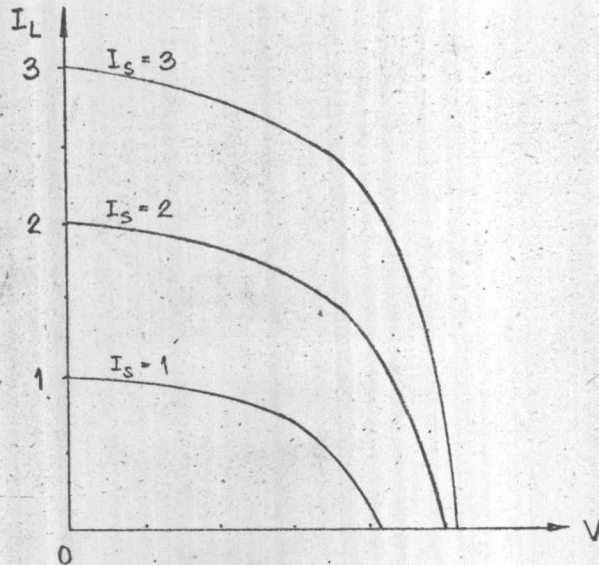
จากรูปที่ ๒.๕ (ค)

$$I_s = I_L + I_j$$

$$\therefore I_L = I_s - I_j \quad \text{----- (๖)}$$

แทนสมการที่ (๕) ในสมการที่ (๖)

$$I_L = I_S - I_0 (\epsilon^{eV/kT} - 1) \quad (๗)$$



รูปที่ ๒.๖ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_L กับแรงดัน V เมื่อกระแสเสถียร I_S มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ๆ

๒.๔.๑ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด, V_0 (open circuit voltage)

เมื่อปลตภาระ (load) ที่ต่อคล้องปลายทั้งสองของเซลล์รับพลังงานแสงออก แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าคล้องปลายทั้งสองค่าที่ได้ คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้น

$$I_L = 0 \quad \text{และ} \quad V = V_0$$

จากสมการที่ (๗)

$$0 = I_S - I_0 (\epsilon^{eV_0/kT} - 1)$$

$$I_S = I_0 (\epsilon^{eV_0/kT} - 1)$$

$$(\epsilon^{eV_0/kT} - 1) = \frac{I_S}{I_0}$$

$$\epsilon^{eV_0/kT} = \frac{I_S}{I_0} + 1$$

Take natural log ทั้งสองข้าง

$$\begin{aligned} \frac{eV_o}{kT} &= \ln \left(\frac{I_s}{I_o} + 1 \right) \\ \therefore V_o &= \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_s}{I_o} + 1 \right) \\ &= V_T \ln \left(\frac{I_s}{I_o} + 1 \right) \quad (๘) \end{aligned}$$

ดังนั้นที่อุณหภูมิทำงาน (T) เดียวกัน V_o จะเป็นปฏิภาคโดยตรงแบบ logarithm กับกระแสลัดวงจร I_s ซึ่งกระแสลัดวงจร I_s ก็เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มของรังสีหรือแสง

๒.๔.๒ กระแสลัดวงจร, I_{s-} (Short circuit current)

เมื่อต่อปลายทั้งสองของเซลล์รับพลังงานแสงแบบลัดวงจร ดังนั้นแรงดันที่ปลายทั้งสองเซลล์รับพลังงานแสงจะมีค่าเป็นศูนย์ ($V = 0$)

จากสมการที่ (๗)

$$\therefore I_L = I_s \quad (๙)$$

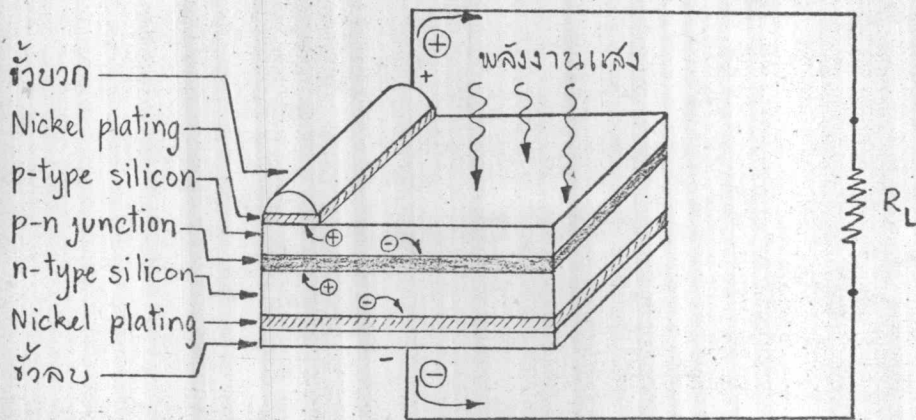
นั่นคือกระแสที่ไหลออกมาจากรายงานนอก (I_L) มีค่าเท่ากับกระแสลัดวงจร (I_s) ค่ากระแสลัดวงจรจะเปลี่ยนแปลงไปได้เมื่อได้รับแสงที่มีรูปสเปกตรัมชนิดหนึ่ง ๆ ที่มีความเข้มของแสงเปลี่ยนแปลงไป และรูปสเปกตรัมของแสงที่ตกกระทบบนตัวกันกระแสลัดวงจรก็จะมีค่าต่างกันด้วย

๒.๕ เซลล์รับพลังงานแสง (Photovoltaic cells)

เซลล์รับพลังงานแสงเรียกได้ว่าเป็น 'selective devices' หมายความว่าสำหรับความเข้มของแสงค่าหนึ่ง และที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง จะไม่ทำให้เกิดจำนวน electron-hole pairs ขึ้นมาเท่ากับแสงที่ความยาวคลื่นอื่น ซึ่งมีความเข้มของแสงเท่ากัน เช่น แสงสีแดงที่มีความเข้มของแสงเท่ากับแสงสีน้ำเงินจะไม่ทำให้เกิด electron-hole pairs ในเซลล์รับพลังงานแสงจำนวนเท่ากัน

๒.๕.๑ เซลล์รับพลังงานแสงแบบผลึกซิลิกอน (Silicon photovoltaic cells)

หรือที่นิยมเรียกกันว่า "โซลาร์เซลล์" ซึ่งใช้งานเกี่ยวกับโครงการอวกาศ เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ และใช้งานเกี่ยวกับเครื่องมือวัดแสงได้ด้วย รูปสเปกตรัมของการตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ ๔๐๐-๑,๑๐๐ นาโนเมตร



รูปที่ ๒.๗ โครงสร้างของเซลล์รับพลังงานแสงแบบผลึกซิลิกอน

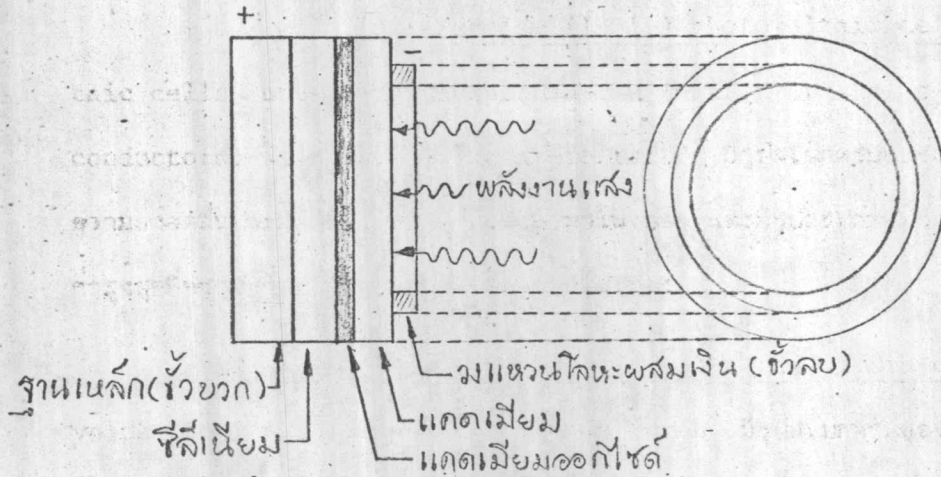
(\oplus , \ominus เป็นทิศทางการไหลของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ)

Boron เป็นสารเจือปน (impurity) ในการ dope ผลึกซิลิกอนให้เป็น p-type ซึ่งจะเป็นแผ่นบาง ๆ มีโฮลอยู่มากมาย ส่วน n-type ได้จากการใช้ Arsenic เป็นสารเจือปน ในการ dope ผลึกซิลิกอน เมื่อนำ p-type มาต่อกับ n-type โดยให้ p-type อยู่ด้านบน เพื่อรับพลังงานแสง โฟตอนที่ตกบน p-type จะทำให้เกิด electron-hole pairs ขึ้น จะมีการไหลของโฮลเข้าไปใน p-type และอิเล็กตรอนจะไหลเข้าไปใน n-type ทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลย์ของประจุไฟฟ้าภายในเซลล์รับพลังงานแสง เป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของเซลล์รับพลังงานแสง เมื่อต่อภาระค้ำต่อปลายทั้งสองของเซลล์รับพลังงานแสง โฮลและอิเล็กตรอนจะไหลในวงจรจนกระทั่งเกิดการสมดุลย์ของประจุไฟฟ้าจึงหยุดไหล คือ เมื่อไม่ได้รับพลังงานแสงตกกระทบ

๒.๕.๒ เซลล์รับพลังงานแสง แบบผลึกซีลีเนียม (Selenium photovoltaic cells)

นิยมอย่างแพร่หลายในการทำ เครื่องมือวัดทางแสงสว่าง รูปสเปกตรัมของการตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ ๓๕๐-๗๕๐ นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของแสงที่ตามนุษย์มองเห็น มีโครงสร้างประกอบด้วยฐานเหล็ก (iron base) ชั้นฉัดต่อมาเป็นซีลีเนียมหนาประมาณ ๗๐ ไมโครเมตร

ระหว่างชั้นของแคดเมียมกับซิลิเนียม จะเป็นชั้นของแคดเมียมออกไซด์ ส่วนชั้นนอกสุดเป็นวงแหวนของโลหะผสมเงิน (Silver-alloy) สำหรับต่อกับวงจรภายนอกเป็นขั้วลบ ฐานเหล็กเป็นขั้วบวก เพื่อต่อกับวงจรภายนอกเช่นกัน



รูปที่ ๒.๔ โครงสร้างของเซลล์รับพลังงานแสงแบบผลึกซิลิเนียม

แสงที่ตกกระทบบจะผ่านเข้ามาทางแคดเมียม ทำให้เกิด electron-hole pairs ขึ้น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในชั้นของซิลิเนียม ซึ่งเป็น p-type จะไหลผ่านรอยต่อแคดเมียมออกไซด์ไปยัง n-type แคดเมียม และเช่นเดียวกันโฮลที่เกิดขึ้นในชั้นของแคดเมียมจะไหลผ่านรอยต่อแคดเมียมออกไซด์ไปยัง p-type ซิลิเนียม ทำให้ฐานเหล็กทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และวงแหวนโลหะผสมเงินทำหน้าที่เป็นขั้วลบ

กระแสขาออกจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อนภายนอก รวมทั้งความเข้มของแสงที่ตกกระทบบด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขาออกกับความเข้มของแสงจะเป็นปฏิภาคกันโดยตรง เมื่อการสะท้อนภายนอกมีค่าต่ำกว่า ๑๐๐ โอมห์ แต่ถ้าการสะท้อนภายนอกมีค่าสูงกว่า ๑๐๐ โอมห์ขึ้นไป ความสัมพันธ์นี้จะเริ่มไม่เป็นปฏิภาคกันโดยตรงจนถึงค่าอิ่มตัว (saturated) รูปสเปกตรัมของการตอบสนองต่อแสงค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ ๕๗๐ นาโนเมตร ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสขาออก สำหรับความเข้มของแสงและการสะท้อนภายนอกค่าหนึ่ง จะมีค่าแปรเปลี่ยนอยู่ประมาณ $\pm 0.24\%/^{\circ}\text{C}$ ช่วงอุณหภูมิทำงานมีค่าอยู่ระหว่าง ๕ ถึง ๔๕ องศาเซนติเกรด

๒.๕.๓ Germanium photovoltaic cells มีโครงสร้างและการทำงานเหมือนกับ

เซลล์รับพลังงานแสงทำจากผลึกของซิลิกอน มีรูปสเปกตรัมของการตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ ๗๗๐-๑,๘๐๐ นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของรังสีใต้แดง และมีรูปสเปกตรัมของการตอบสนองต่อแสงค่าสูงสุดที่มีความยาวคลื่นประมาณ ๑,๕๕๐ นาโนเมตร

๒.๕.๔ Indium-arsenide (In As) photovoltaic cells เป็น Photovoltaic cells แบบผลึกเดี่ยวรอยต่อแบบ พี-เอ็น (Single-crystal p-n junction semiconductors) ใช้งานในช่วงรังสี near-infrared มีรูปสเปกตรัมของการตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ ๑,๕๐๐ - ๓,๖๐๐ นาโนเมตร และมีรูปสเปกตรัมของการตอบสนองต่อแสงค่าสูงสุดที่มีความยาวคลื่นประมาณ ๓,๒๐๐ นาโนเมตร

๒.๕.๕ Indium-antimonide (In Sb) photovoltaic cells เป็น photovoltaic cells ใช้งานในช่วงรังสี far-infrared มีรูปสเปกตรัมของการตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ ๒,๓๕๐ - ๗,๒๐๐ นาโนเมตร และมีรูปสเปกตรัมของการตอบสนองต่อแสงค่าสูงสุดที่มีความยาวคลื่นประมาณ ๖,๘๐๐ นาโนเมตร