

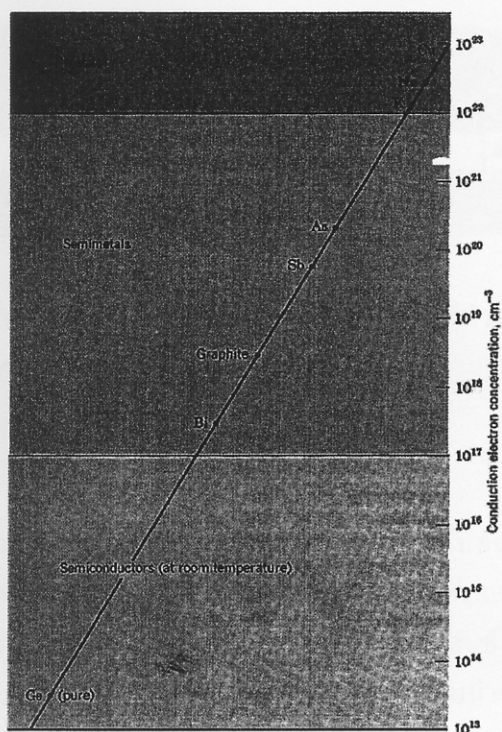
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 สารกึ่งตัวนำ

ธาตุต่างๆ ประกอบด้วยแถบพลังงานหลักคือแถบพลังงานที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนครอบครอง เรียกว่า แถบเวเลนซ์ (valence band) แถบพลังงานที่สูงขึ้นไปเรียกว่า แถบนำ (conduction band) มีช่องว่างของพลังงานคั่นระหว่าง 2 แถบนี้ ความกว้างของช่องว่างมีผลให้การนำไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างชัดเจนในโลหะและฉนวน สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) มีสมบัติการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างโลหะและฉนวน เช่น ซิลิกอน เจอร์มาเนียม เทลลูเรียม เป็นต้น

ซิลิกอน เจอร์มาเนียม ที่อุณหภูมิเหนือศูนย์สัมบูรณ์สามารถนำไฟฟ้าได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้รับการกระตุ้นข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบพลังงานสูงกว่าถัดไปซึ่งเป็นช่องนำว่าง อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นขึ้นมาอยู่ในแถบนี้จะทำหน้าที่เป็นพาหะนำไฟฟ้า (electrical carrier) ตำแหน่งเดิมของอิเล็กตรอนในแถบพลังงานเวเลนซ์กลายเป็นที่ว่างเรียกว่า หลุมหรือโฮล (hole) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับอิเล็กตรอน โฮลที่อยู่ในแถบเวเลนซ์สามารถทำหน้าที่เป็นพาหะนำไฟฟ้าได้เช่นกัน ความเข้มข้นพาหะในผลึกโลหะ กึ่งโลหะ และกึ่งตัวนำ แสดงดังภาพประกอบ 2.1 ค่า สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ มีค่าอยู่ระหว่าง $10^{-4} - 10^4 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ ทั้งอิเล็กตรอน และหลุม เป็นพาหะนำประจุในสารกึ่งตัวนำ ถ้าจำนวน อิเล็กตรอน ที่นำไฟฟ้า มีจำนวนเท่ากับจำนวนหลุม อิเล็กตรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) และสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือ (extrinsic semiconductors) จะมีจำนวน electron และ hole ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ

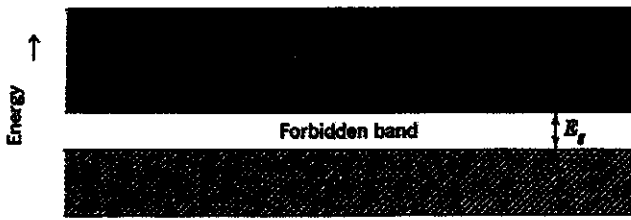


ภาพประกอบ 2.1 เปรียบเทียบความเข้มข้นอิเล็กตรอนในผลึกโลหะ กึ่งโลหะ และกึ่งตัวนำ

ที่มา : Kittel, 1996

2.1.1 ช่องว่างพลังงาน

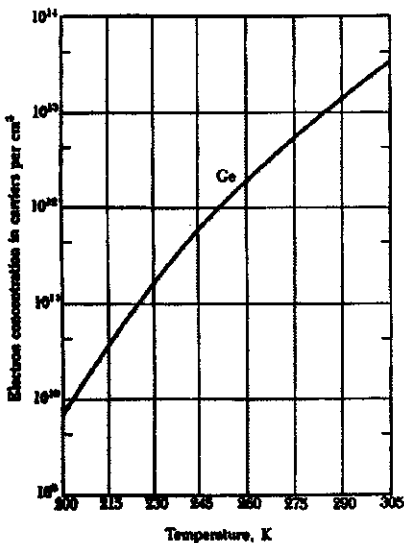
ผลึกของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีแผนผังแถบพลังงานดังภาพประกอบ 2.2 ที่อุณหภูมิคงตัว การนำไฟฟ้าของผลึกจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงแม้มีสารเจือปนในผลึก กลไกการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจัดเป็นการนำไฟฟ้าในตัว (intrinsic conductivity) ที่ศูนย์สมบูรณ์ แถบนำจะไม่มีพาหะอยู่เลยและอยู่ห่างจากแถบเวเลนซ์เต็มไม่มากนัก ผลต่างพลังงานที่ขอบแถบนำ (conduction band edge) กับพลังงานที่ขอบของแถบเวเลนซ์ (valence band edge) คือช่องว่างพลังงาน (band gap) แทนด้วย E_g ขอบแถบนำเป็นจุดต่ำสุดในแถบนำ ส่วนขอบแถบเวเลนซ์เป็นจุดสูงสุดในแถบเวเลนซ์



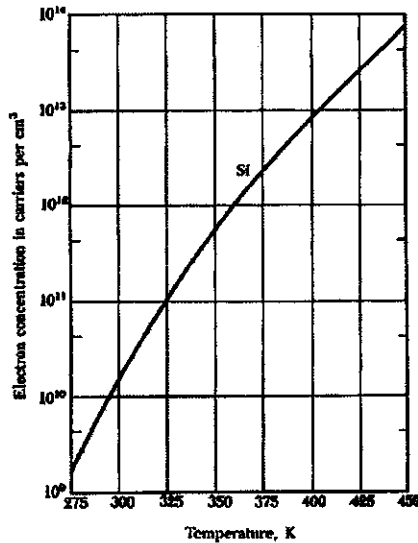
ภาพประกอบ 2.2 แผนผังแถบพลังงานผลึกกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ไม่นำไฟฟ้าที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ เพราะมีแถบเวเลนซ์เต็มและแถบนำว่าง

ที่มา : Kittel, 1996

ความเข้มข้นพาหะและการนำไฟฟ้าในตัวขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างพลังงานกับอุณหภูมิ (E_g/kT) อัตราส่วนมีค่ามาก ความเข้มข้นพาหะและสภาพนำไฟฟ้ามีค่าน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นทางความร้อนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบนำและเคลื่อนที่ได้ ภายใต้เงื่อนไขการนำไฟฟ้าในตัว ความเข้มข้นอิเล็กตรอนในแถบนำจะเท่ากับ ความเข้มข้นของโฮลในแถบเวเลนซ์ ความเข้มข้นอิเล็กตรอนในผลึกกึ่งตัวนำบริสุทธิ์แสดงดังภาพประกอบ 2.3



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 2.3 ความเข้มข้นพาหะอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในผลึก (ก). เจอร์มาเนียม (ข).ซิลิกอน ที่อุณหภูมิเดียวกัน เจอร์มาเนียมมีความเข้มข้นพาหะมากกว่าซิลิกอนเนื่องจากช่องว่างพลังงานมีขนาดเล็กกว่า

ที่มา : Kittel, 1996

ขนาดช่องว่างพลังงานแสดงดังตาราง 2.1 การทดสอบการดูดกลืนแสง (optical absorption) ระหว่างแถบพลังงานทำให้ได้ลักษณะช่องว่างพลังงาน 2 ชนิด คือ ช่องว่างแบบตรง (direct gap, d) และช่องว่างแบบอ้อม (indirect gap, i)

ตาราง 2.1 ช่องว่างพลังงานในผลึกกึ่งตัวนำ ที่อุณหภูมิห้อง (d: ช่องว่างแบบตรง i: ช่องว่างแบบอ้อม)

*สารกึ่งโลหะมีแถบพลังงานล้ำกัน; hex: โครงสร้างผลึก 6 เหลี่ยม

ที่มา : Kittle, 1996

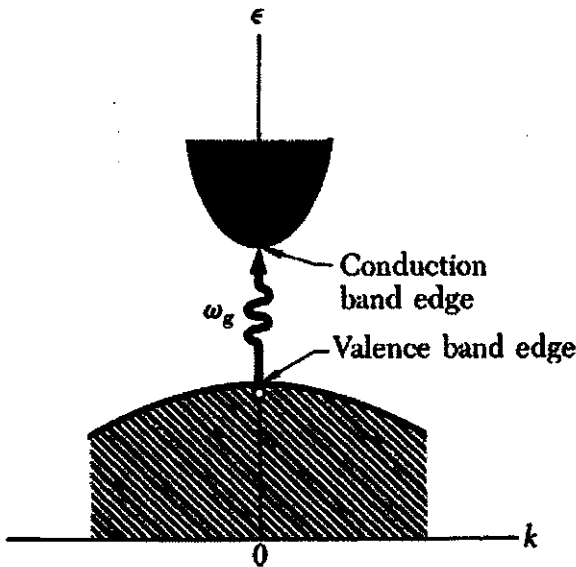
Crystal	Gap	E_g , eV		Crystal	Gap	E_g , eV	
		0 K	300 K			0 K	300 K
Diamond	i	5.4		HgTe ^a	d	-0.30	
Si	i	1.17	1.11	PbS	d	0.286	0.34-0.37
Ge	i	0.744	0.66	PbSe	i	0.165	0.27
α Sn	d	0.00	0.00	PbTe	i	0.190	0.29
InSb	d	0.23	0.17	CdS	d	2.582	2.42
InAs	d	0.43	0.36	CdSe	d	1.840	1.74
InP	d	1.42	1.27	CdTe	d	1.607	1.44
GaP	i	2.32	2.25	ZnO		3.436	3.2
GaAs	d	1.52	1.43	ZnS		3.91	3.6
GaSb	d	0.81	0.68	SnTe	d	0.3	0.18
AlSb	i	1.65	1.6	AgCl		—	3.2
SiC(hex)	i	3.0	—	AgI		—	2.8
Te	d	0.33	—	Cu ₂ O	d	2.172	—
ZnSb		0.56	0.56	TiO ₂		3.03	—

เมื่อมีแสงตกกระทบผลึกกึ่งตัวนำ ผลึกอาจตอบสนองต่อแสงโดยการดูดกลืนสะท้อน หรือหักเห ขึ้นกับความถี่ของแสง ถ้าผลึกดูดกลืนแสง สมบัติบางอย่างอาจเปลี่ยนไป เช่น นำไฟฟ้าดีขึ้น หรือเกิดปรากฏการณ์บางอย่าง เช่น มีการเปล่งแสง เป็นต้น เมื่อผลึกกึ่งตัวนำดูดกลืนแสง จะทำให้อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากแถบพลังงานหนึ่งไปยังแถบพลังงานถัดไปได้ 2 ลักษณะคือ การดูดกลืนโดยกระบวนการตรง (direct absorption process) และการดูดกลืนโดยกระบวนการอ้อม (indirect absorption process) ในกระบวนการแรก อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากขอบแถบเวเลนซ์ไปยังขอบแถบนำ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์คลื่น การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนทำให้เกิดโฮลที่จุดสูงสุดในแถบเวเลนซ์ซึ่งตรงกับจุดต่ำสุดของแถบนำ (ภาพประกอบ 2.4) ความแตกต่างของระดับพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเท่ากับพลังงานโฟตอนที่ผลึกดูดกลืนสามารถนำค่าความถี่ขีดเริ่ม (threshold frequency, ω_g) ที่มีการดูดกลืนโฟตอนมาวิเคราะห์หาขนาดหรือ

ความกว้างช่องว่างพลังงาน โดยที่ $E_g / \hbar\omega_g$ ในกระบวนการอ้อม ขอบแถบนำและแถบเวเลนซ์อยู่ห่างกันเท่ากับ k_c (ภาพประกอบ 2.5) ช่องว่างพลังงานมีความกว้างมากกว่าพลังงานขีดเริ่มที่ได้รับจากโฟตอนในกระบวนการจะมีการสร้างหรือดูดกลืนโฟนอนขึ้นเสมอเพื่อให้เป็นไปตามกฎอนุรักษ์เวกเตอร์คลื่นและพลังงานตามลำดับ

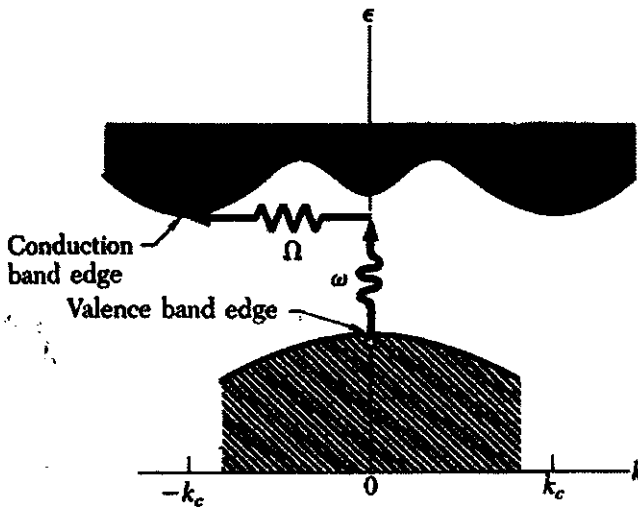
$$k = k_c + K \cong 0; \hbar\omega_g = E_g \pm \hbar\Omega$$

เมื่อ k และ K เป็นเวกเตอร์คลื่นของโฟตอนและโฟนอน ตามลำดับ Ω เป็นความถี่โฟนอน ที่ถูกดูดกลืน (เครื่องหมาย -) หรือสร้างขึ้น (เครื่องหมาย+) ในกระบวนการ



ภาพประกอบ 2.4 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานโฟตอนในกระบวนการตรงขอบเวเลนซ์และขอบนำมีค่าเวกเตอร์คลื่นเดียวกัน พลังงานขีดเริ่มมีขนาดเท่ากับความกว้างช่องว่างพลังงาน

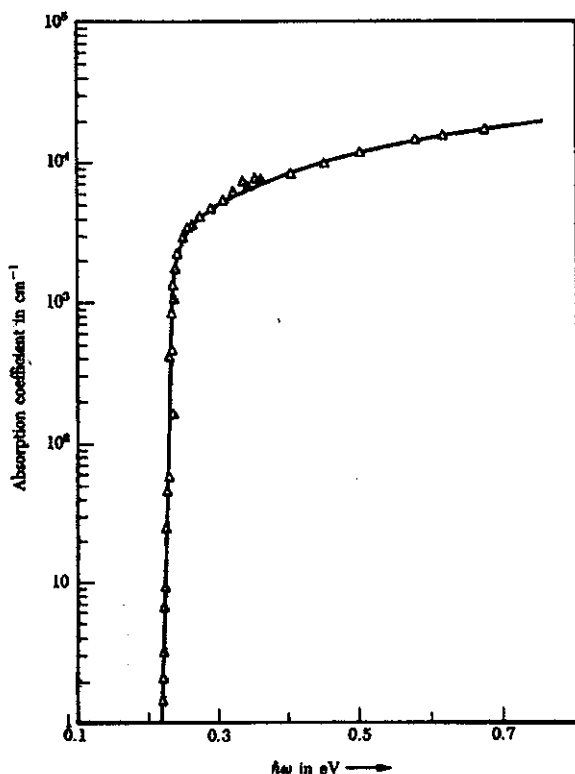
ที่มา : Kittel, 1996



ภาพประกอบ 2.5 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานโฟตอนในกระบวนการอ้อมเวกเตอร์คลื่นที่ขอบเวเลนซ์และขอบนำมีค่าแตกต่างกันมาก พลังงานขีดเริ่มมีขนาดเท่ามากกว่าความกว้างช่องว่างพลังงาน ในกระบวนการจึงมีการดูดกลืนหรือสร้างโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้อง

ที่มา : Kittel, 1996

นอกจากการดูดกลืนแสงของผลึก สามารถวิเคราะห์หาความกว้างช่องว่างพลังงานจากข้อมูลชุดอื่น เช่น สภาพนำไฟฟ้าซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ความเข้มข้นพาหะนำไฟฟ้าในตัว (ซึ่งได้จากการวัดศักย์ไฟฟ้าฮอลล์) ข้อมูลการดูดกลืนแสงบ่งชี้ชนิดของช่องว่างพลังงานได้ว่าเป็นแบบตรงหรืออ้อม เช่น จากตาราง 2.1 Ge และ Si มีช่องว่างพลังงานแบบอ้อม ส่วนใน InSb เป็นแบบตรง(ภาพประกอบ 2.6) ใน α Sn ไม่มีช่องว่างพลังงานระหว่างแถบเวเลนซ์กับขอบแถบนำและการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนระหว่าง 2 แถบนี้เป็นแบบตรง HgTe (และ HgSe) เป็นสารกึ่งโลหะ มีพลังงานในแถบต้องห้ามเป็นลบ เพราะมีการเหลื่อมล้ำกันของแถบเวเลนซ์และแถบนำ



ภาพประกอบ 2.6 การดูดกลืนแสงอินเดียมแอนติโมนด์ (InSb) บริสุทธิ์ มีช่องว่างพลังงานแบบตรงขอบแถบนำและขอบแถบเวเลนซ์มีค่า $k=0$ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานถึงจุดขีดเริ่ม

ที่มา : Kittel, 1996

2.1.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแถบพลังงาน

สมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแถบพลังงาน ได้จากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของกลุ่มคลื่น (wave packet) ในสนามไฟฟ้าภายนอก ฟังก์ชันคลื่นของกลุ่มคลื่นเป็นผลรวมฟังก์ชันคลื่นที่มีเวกเตอร์คลื่นต่างกันเล็กน้อยและมีค่าใกล้เคียงเวกเตอร์คลื่น k ค่าใดค่าหนึ่ง ความเร็วกลุ่มคลื่นมีค่า $v_g = \frac{d\omega}{dk}$ ความถี่ของฟังก์ชันคลื่นที่มีพลังงาน E มีค่า $\omega = \frac{E}{\hbar}$ ดังนั้น

$$v_g = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} \quad (2.1)$$

ปริมาณงาน δE ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสนามไฟฟ้า ในช่วงเวลา δt คือ

$$\delta\varepsilon = -eE v_g \delta t \quad (2.2)$$

เนื่องจาก $\delta\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dk} \delta k$ และจากสมการ (2.1) ได้ว่า

$$\delta\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dk} \delta k = \hbar v_g \delta k \quad (2.3)$$

เปรียบเทียบสมการ (2.2) กับ (2.3) ได้ว่า

$$\delta k = -\frac{eE}{\hbar} \delta t \quad (2.4)$$

เขียนสมการ (2.4) ในพจน์ของแรง \vec{F} ได้ ดังนี้

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{F} \quad (2.5)$$

สมการ (2.5) คือแรงที่อิเล็กตรอนในผลึกได้รับ ทั้งจากโครงผลึกและจากแหล่งกำเนิดภายนอก ถ้าอิเล็กตรอนอยู่ในสนามแม่เหล็ก แรงในสมการ (2.5) ก็คือ แรงลอเรนซ์ อันเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าไม่สูงมากจนมีผลต่อโครงสร้างแถบพลังงาน สมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีความเร็ว \vec{v} ในสนามแม่เหล็กคงที่ \vec{B} คือ

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = -e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.6)$$

แรงลอเรนซ์ คือพจน์ทางขวาของสมการ (2.6) อัตราการเปลี่ยนของเวกเตอร์คลื่น หรือ $d\vec{k}/dt$ มีค่าดังสมการ

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{e}{\hbar^2} \vec{V}_k \varepsilon \times \vec{B} \quad (2.7)$$

เมื่อ $\vec{v} = -\frac{1}{\hbar^2} \vec{V}_k \varepsilon$ จะเห็นว่าสมการ (2.7) อยู่ในทิศทางของ \vec{k} อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับเกรเดียนท์ของพลังงาน แสดงว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่บนผิวที่มี

พลังงานคงที่ แรงลอเรนซ์ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวง วงโคจรการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนี้ ได้จากการตัดกันของผิวพลังงานคงที่กับระนาบที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

2.1.3 โฮล

เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในแถบนำจะทำให้เกิดโฮลในแถบเวเลนซ์ โฮลจะมีพฤติกรรมในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กราวกับมีประจุ $+e$ สมบัติของอิเล็กตรอนทำให้ได้สมบัติของโฮลดังต่อไปนี้คือ

1.

$$\vec{k}_h = -\vec{k}_e \quad (2.8)$$

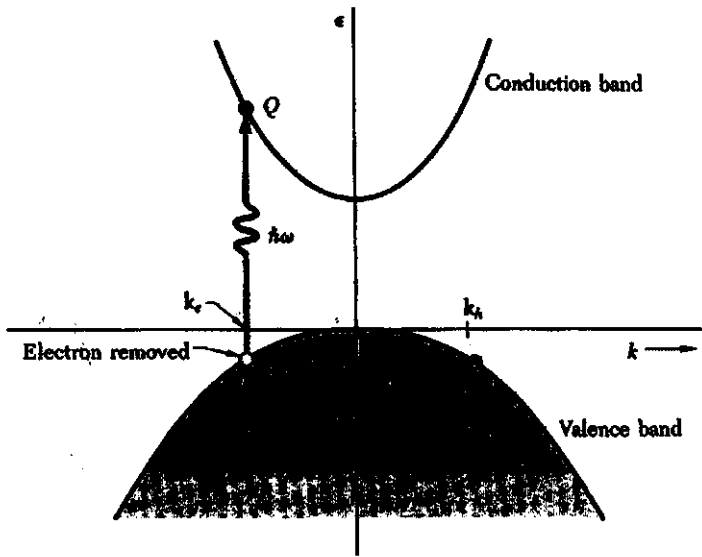
เวกเตอร์คลื่นรวมของอิเล็กตรอนในแถบเต็มเป็นศูนย์ หรือ $\sum \vec{k} = 0$ ทั้งนี้เป็นเพราะทุกค่า \vec{k} มี $-\vec{k}$ ที่สอดคล้องกันเป็นคู่ๆ ถ้าสถานะ \vec{k} มีอิเล็กตรอนครอบครอง ก็จะมีสถานะ $-\vec{k}$ ที่มีอิเล็กตรอนครอบครองเช่นกัน ถ้าอิเล็กตรอนออกจากวงโคจร \vec{k}_e จะทำให้เวกเตอร์คลื่นรวมของระบบมีค่าเป็น $-\vec{k}_e$ ซึ่งก็คือค่าเวกเตอร์ที่จุด G ของโฮลที่จุด E (ภาพประกอบ 2.7) กฎการเลือกเวกเตอร์คลื่นที่ได้คือ $\vec{k}_h + \vec{k}_e = 0$ นั่นคือผลรวมเวกเตอร์คลื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายหลังการดูดกลืนโฟตอน โดยอิเล็กตรอนที่ถูกดูดกลืนโฟตอนนั้นออกไปจากวงโคจรเดิม ทำให้เกิดโฮลขึ้นมาแทนที่ด้วยเวกเตอร์คลื่น $-\vec{k}_e$ หรืออีกนัยหนึ่งแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายออกไป 1 ตัว มีเวกเตอร์คลื่นรวมเป็น $-\vec{k}_e$

2.

$$\epsilon_h(\vec{k}_h) = -\epsilon_e(\vec{k}_e) \quad (2.9)$$

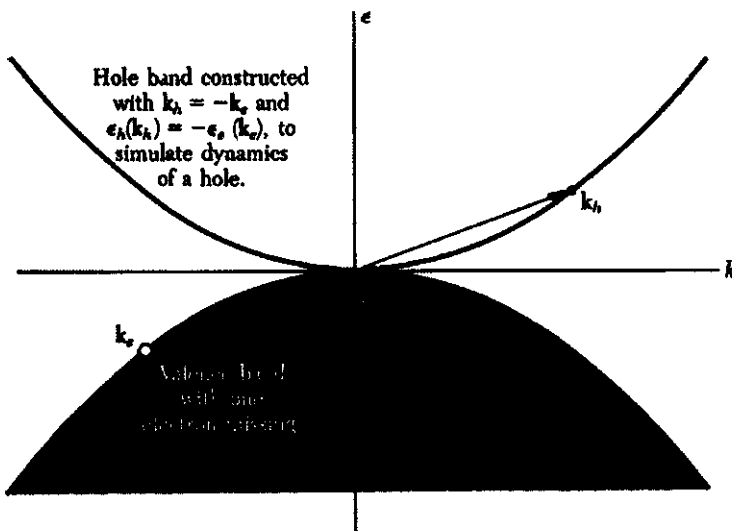
ให้พลังงานที่ขอบแถบเวเลนซ์มีค่าเป็นศูนย์ มีตำแหน่งว่างในแถบที่เกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ย้ายออกไป ถ้าตำแหน่งว่างนั้นยิ่งต่ำกว่าขอบแถบเวเลนซ์เท่าใด พลังงานของระบบยิ่งมีค่ามากเท่านั้น ทั้งนี้เพราะพลังงานของโฮลมีเครื่องหมายตรงข้ามกับพลังงานของอิเล็กตรอน ในการเคลื่อนย้ายสถานะอิเล็กตรอนในวงโคจรที่มีระดับพลังงานต่ำกว่าจะต้องการพลังงานกระตุ้นมากกว่าอิเล็กตรอนในวงโคจรระดับพลังงานสูงกว่า จากภาพประกอบ 2.8 แสดงให้เห็นแถบโฮล (hole band) ที่สอดคล้องกับสถานะว่างในแถบเวเลนซ์ที่อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายออกไป ทำให้ได้ว่า

$$\epsilon_e(\vec{k}_e) = \epsilon_e(-\vec{k}_e) = -\epsilon_h(-\vec{k}_e) = -\epsilon_h(\vec{k}_h)$$



ภาพประกอบ 2.7 พลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายจากจุด E ไปยังจุด Q ทำให้ผลรวมเวกเตอร์คลื่นของแถบเวเลนซ์เท่ากับ $-\vec{k}_0$ เวกเตอร์คลื่นของโฮล

ที่มา : Kittel, 1996



ภาพประกอบ 2.8 แสดงแถบโฮลซึ่งมีพลังงานและเวกเตอร์คลื่นเดียวกันกับสถานะว่างในแถบเวเลนซ์แต่มีเครื่องหมายตรงข้าม

ที่มา : Kittel, 1996

3.

$$\vec{v}_h = \vec{v}_e \quad (2.10)$$

ความเร็วของโฮลเท่ากับความเร็วของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ย้ายออกไปจากแถบเวเลนซ์ จากรูป จะเห็นว่า $\vec{\nabla}_{\vec{k}_h} \epsilon_h(\vec{k}_h) = \vec{\nabla}_{\vec{k}_e} \epsilon_e(\vec{k}_e)$ ดังนั้น $\vec{v}_h(\vec{k}_h) = \vec{v}_e(\vec{k}_e)$

4.

$$m_h = -m_e \quad (2.11)$$

มวลยี่งผล (effective mass) มีค่าผกผันกับอนุพันธ์อันดับที่สองของพลังงานเทียบกับเวกเตอร์คลื่น สำหรับแถบเวเลนซ์ที่อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายไป m_e มีค่าเป็นลบ m_h จึงมีค่าเป็นบวกสำหรับแถบโฮล

5.

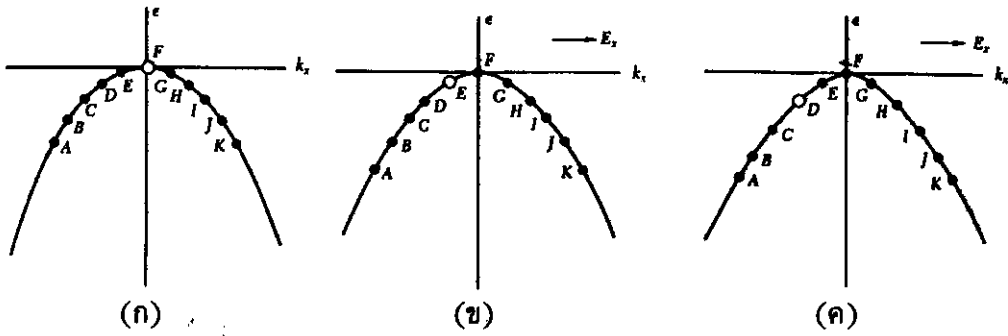
$$\hbar \frac{d\vec{k}_h}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) \quad (2.12)$$

สมการ (2.12) เป็นสมการของการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถือเสมือนเป็นอนุภาคที่มีประจุ $+e$ ทั้งนี้ได้มาจากสมการของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

$$\hbar \frac{d\vec{k}_e}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) \quad (2.13)$$

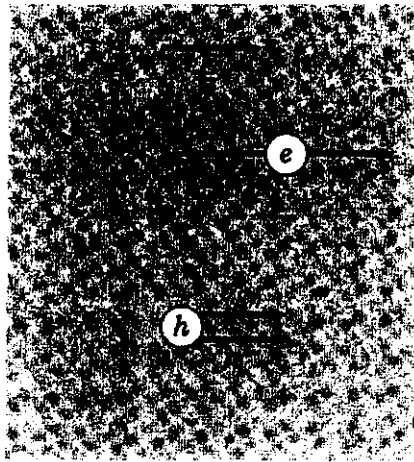
เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะทำให้สถานะเดิมกลายเป็นสถานะว่างหรือโฮล แทน \vec{k}_e ในสมการ (2.13) ด้วย $-\vec{k}_h$ และแทน \vec{v}_e ด้วย \vec{v}_h จะได้สมการ (2.12) สำหรับการเคลื่อนที่ของโฮล การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุบวกหรือโฮลนี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในแถบเวเลนซ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.9 และ 2.10 ความหนาแน่นของกระแสที่ได้มีค่าดังนี้

$$\vec{j} = (-e)\vec{v}(G) = (-e)[- \vec{v}(E)] = e\vec{v}(E) \quad (2.14)$$



ภาพประกอบ 2.9 ก. ที่ $t=0$ มีอิเล็กตรอนครอบครองทุกสถานะ ยกเว้นสถานะ F ซึ่งอยู่ขอบแถบ
 เวเลนซ์ที่ F ความเร็ว $v_x = 0$ เพราะ $d\epsilon/dk_x = 0$ ข. ให้สนามไฟฟ้า
 ภายนอก E_x ในทิศทาง $\pm x$ มีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนในทิศทาง $-k_x$ ทำ
 ให้อิเล็กตรอนทุกตัวเคลื่อนที่ไปทาง $-k_x$ จนกระทั่งโฮลมาอยู่ที่สถานะ E และ
 ค. อิเล็กตรอนทุกตัวเคลื่อนที่ต่อไปจนกระทั่งโฮลมาอยู่ที่สถานะ D

ที่มา : Kittel, 1996



ภาพประกอบ 2.10 เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอก E อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแถบนำและโฮล
 เคลื่อนที่ในแถบเวเลนซ์ความเร็วดริฟต์ของทั้งคู่มีทิศทางตรงข้ามกัน แต่
 ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลทิศทางเดียวกันคือทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า

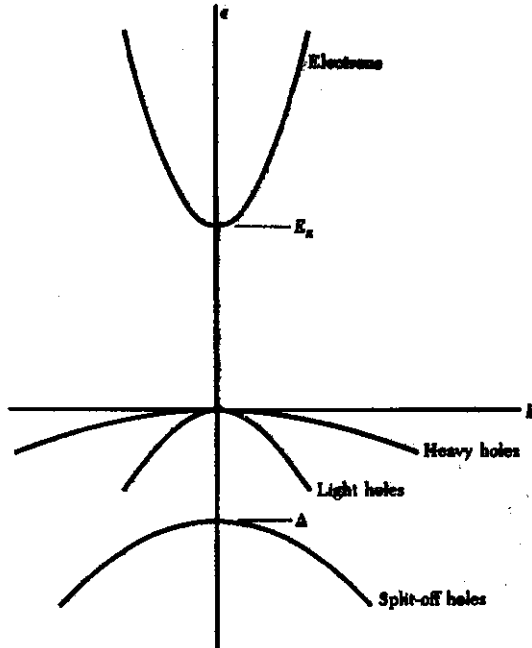
ที่มา : Kittel, 1996

ในผลึกกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรงและกราฟพลังงาน-เวกเตอร์คลื่นดัง
ภาพประกอบ 2.11 ค่าพลังงานที่ขอบการนำคือ

$$\varepsilon_c = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c} \quad (2.15)$$

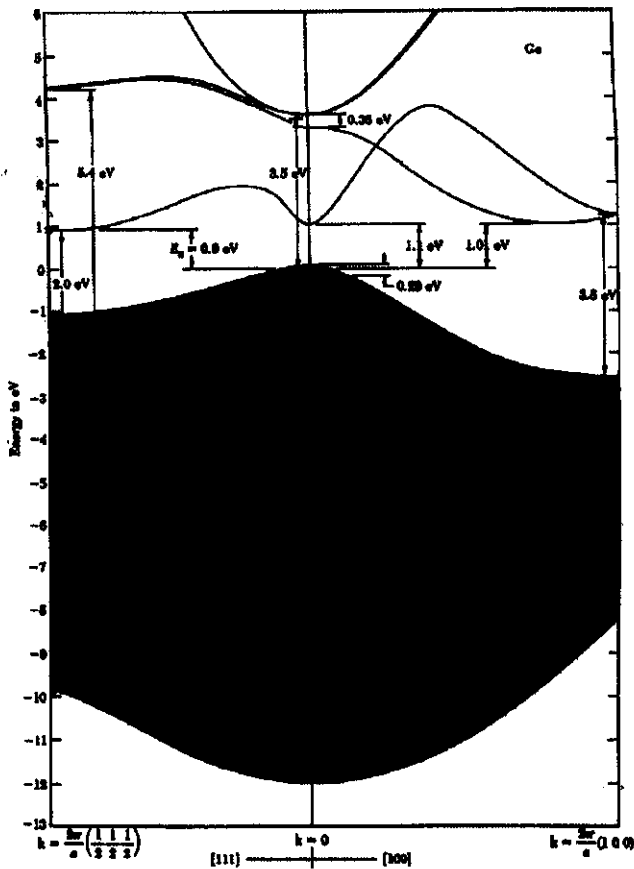
ที่ขอบแถบเวเลนซ์แสดงเส้นกราฟทั้งหมด 3 เส้น (threefold degeneracy) มี 2
เส้นที่มีพลังงานที่กึ่งกลางโซน ($k=0$) เท่ากัน เป็นเส้นกราฟของโฮลหนัก (heavy hole) และโฮล
เบา(light hole) ตามลำดับ เส้นกราฟอีก 1 เส้นที่มีพลังงานที่กึ่งกลางโซนต่างกันเล็กน้อยหรือ
พลังงานมีค่าแบ่งแยก (split-off energy, Δ) เป็นของโฮลสปลิตออฟ (split-off hole) ระดับ
พลังงานโดยประมาณสำหรับโฮลหนัก (hh) โฮลเบา (lh) และโฮลสปลิตออฟ (soh) ตามลำดับ
คือ

$$\varepsilon_v(\text{hh}) \cong -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_{\text{hh}}}; \varepsilon_v(\text{lh}) \cong -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_{\text{lh}}}; \varepsilon_v(\text{soh}) \cong -\Delta - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{\text{soh}}} \quad (2.16)$$



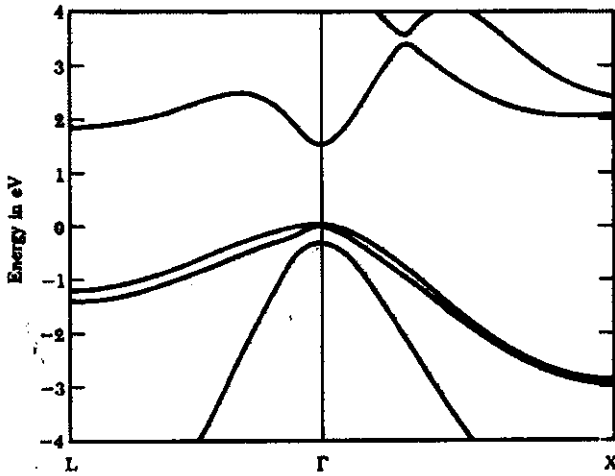
ภาพประกอบ 2.11 กราฟพลังงาน-เวกเตอร์คลื่นที่ขอบเวเลนซ์และขอบการนำในผลึกกึ่งตัวนำ
ที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง ในกรณีโฮลหนัก โฮลเบา และโฮลสปลิตออฟ

ตัวอย่างโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบอ้อม และแบบตรงได้แก่ภาพประกอบ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 2.12 โครงสร้างแถบพลังงานของ Ge มีช่องว่างพลังงานแบบอ้อม ขอบแถบนำอยู่ที่ $(2\pi/a)\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}$ ขอบแถบเวเลนซ์อยู่ที่ $k=0$ มรสภาพตีเจนเนอเรตของมวลยังผลของโฮลหนักและโฮลเบา

ที่มา : Kittel, 1996



ภาพประกอบ 2.13 แถบพลังงานอย่างง่ายของแกลเลียมอาร์เซไนด์หรือ GaAs มีช่องว่างพลังงานตรง $(L : (2\pi/a)\left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}\right) \Gamma$: จุดกึ่งกลางโซน $X : (2\pi/a)(100)$)

ที่มา : Kittel, 1996

2.2 การดูดกลืนแสงพื้นฐาน

การดูดกลืนแสงเป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่จุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในกรณีฉนวนและสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (Fundamental absorption) และเรียกตำแหน่งหรือความยาวคลื่นแสงของสเปกตรัมที่มีการดูดกลืนแสงนี้ว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (absorption edge) การดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาก ในบางครั้งจำเป็นต้องแสดงลักษณะแถบพลังงานโดยให้เป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number: k) ของอิเล็กตรอน (ซึ่งก็คือโมเมนตัมนั่นเอง เพราะว่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $p = \hbar k$) เมื่อเขียนลักษณะของแถบพลังงานในรูปฟังก์ชันของ k จะได้แถบพลังงานมีรูปร่างสูงเป็นเส้นโค้งต่างๆซึ่งไม่ได้เป็นเส้นตรงเสมอไป ในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่ตำแหน่ง $k=0$ พอดี เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะแถบพลังงานเช่นนี้ว่ามีแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) ส่วนในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะแถบพลังงานเช่นนี้ว่ามีแถบพลังงานแบบไม่ตรง (indirect band gap)

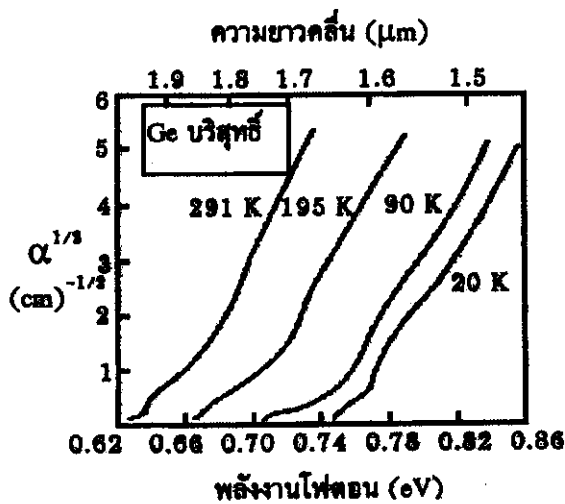
ในการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนั้น มีกฎของการเลือก (selection rule) หรือบางครั้งเรียกว่า กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservation rule) คือ

การเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนั้น โดยลำพังอิเล็กตรอนจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม (นั่นคือ ค่า k ต้องไม่เปลี่ยน) ดังนั้นการดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบตรงจึงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการอนุรักษ์โมเมนตัม

แต่การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรงนั้น เนื่องจากจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ จึงไม่มีสถานะพลังงานใดๆ ที่จะรองรับอิเล็กตรอนข้างบนในแนวตั้ง ดังนั้นอิเล็กตรอนจะกระโดดขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปแล้วเปลี่ยนค่าโมเมนตัมโดยการมีอันตรกิริยากับโครงผลึก (lattice) ซึ่งได้แก่ การรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมกับโครงผลึกที่กำลังสั่นอยู่นั่นเองในปรากฏการณ์นี้ค่าโมเมนตัมของระบบจะยังคงถูกรักษาไว้ จึงทำให้การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรงเกิดขึ้นได้

โดยทั่วไปแล้วขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะแคบลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะฉะนั้นความยาวคลื่นของขอบการดูดกลืนแสงก็จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิตัวด้วย ดังภาพประกอบ

2.14



ภาพประกอบ 2.14 การขึ้นกับอุณหภูมิของช่องว่างพลังงานของเจอร์มาเนียมแถบตรงคือ รากที่สองของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

ที่มา : ดุสิต, 2542

2.2.1 การดูดกลืนแสงแบบตรง

การเปลี่ยนสถานะอันเนื่องมาจากแสงในลักษณะแบบตรงมีประสิทธิภาพสูง ถ้าพลังงานโฟตอนของแสงอินพุต $h\omega$ มีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงาน E_g จะได้รับความสัมพันธ์

$$\hbar\omega = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (2.17)$$

โดยที่ $\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$ และ m_r^* เรียกว่า มวลประสิทธิผลรวมของอิเล็กตรอนและโฮล (reduced mass of electron and hole)

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำจะได้ว่า

$$\alpha(\hbar\omega) = \frac{\pi e^2 \hbar}{m_0^2 c n_r \epsilon_0 \hbar \omega} |(a.p.)_{if}|^2 N_{cv}(\hbar\omega) \quad (2.18)$$

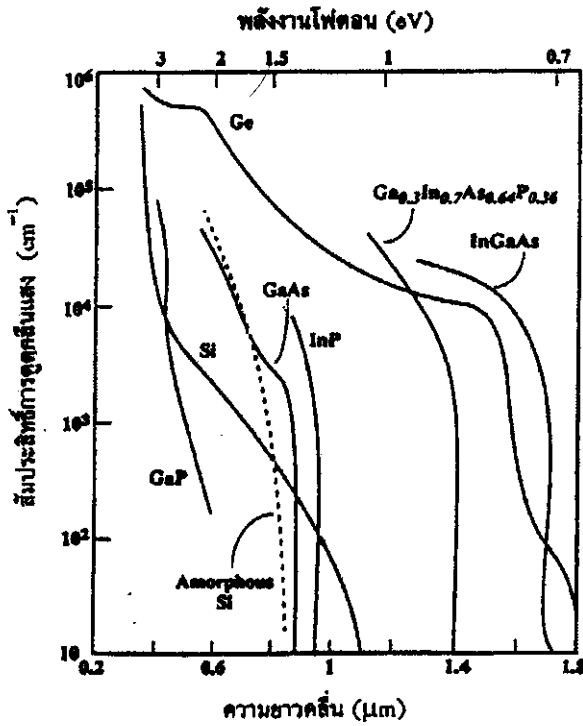
โดยที่ $N_{cv}(\hbar\omega)$ เรียกว่า ความหนาแน่นร่วมของสแตต (joint density of states) เป็นผลคูณของความหนาแน่นของสแตตในแถบเวเลนซ์และแถบคอนดักชันและมีค่าดังนี้

$$N_{cv}(\hbar\omega) = \frac{\sqrt{2} (m_r^*)^{3/2} (\hbar\omega - E_g)^{1/2}}{\pi^2 \hbar^3} \quad (2.19)$$

และพจน์ $|(a.p.)_{if}|^2$ นี้เรียกว่า พจน์โมเมนตัม หรือพจน์ไดโพลเมทริกซ์ (momentum หรือ dipole matrix element) แสดงความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบคอนดักชัน (a แสดงทิศทางของโพลาไรซ์ของแสง) ค่าเฉลี่ยของพจน์โมเมนตัมนี้มีค่าเท่ากับ $2/3 p_{cv}^2$ และในสารกึ่งตัวนำทั่วไป p_{cv}^2 มีค่าดังนี้

$$\frac{2p_{cv}^2}{m_0} \cong 20 \text{eV} \quad (2.20)$$

ภาพประกอบ 2.15 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดทั้งแถบพลังงานแบบตรงและแบบไม่ตรง จะพบว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงบริเวณพลังงานโฟตอนที่ค่าใกล้เคียงกับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานไม่ตรงค่อนข้างน้อย เพราะการดูดกลืนแสงจะต้องอาศัยการถ่ายเทโฟนอนกับโครงผลึกด้วยและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานไม่ตรงจะเพิ่มขึ้นด้วย เพราะอุณหภูมิสูงขึ้น โครงผลึกจะสั้นมากขึ้น



ภาพประกอบ 2.15 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ

ที่มา : ดุสิต, 2542

2.2.2 การดูดกลืนแสงแบบอ้อม

วัสดุบางชนิด ถึงแม้ว่ายอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์จะไม่ได้อยู่ในแนวตั้งกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน แต่วัสดุนั้นก็สามารถดูดกลืนแสงได้ การดูดกลืนในกรณีนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่ออิเล็กตรอนจะต้องมีการรับหรือคายพลังงานโฟนอน (ϵ_p) ให้กับโครงผลึก การรับหรือคายพลังงานโฟนอนจะช่วยให้การเปลี่ยนสถานะเป็นไปตามกฎของการอนุรักษ์พลังงานและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ

$$\text{กฎของการอนุรักษ์พลังงาน} \quad \epsilon_f - \epsilon_i = \hbar\omega \pm \epsilon_p \quad (2.21)$$

$$\text{กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad k_2 = k_1 \pm k_p \quad (2.22)$$

โดยที่ ϵ_p : พลังงานโฟนอน

ϵ_i : พลังงานของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ

ϵ_f : พลังงานของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ

- k_1 : เวกเตอร์คลื่นของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
 k_2 : เวกเตอร์คลื่นของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ
 k_p : เวกเตอร์คลื่นของโฟนอน

เครื่องหมาย + ในพจน์ด้านขวาเป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนต้องรับพลังงานหรือโมเมนตัมจากโฟนอน และ เครื่องหมาย - เป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนต้องคายพลังงานหรือโมเมนตัมให้แก่โฟนอน ความหนาแน่นของสแตต (density of state) ของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานก่อนการเปลี่ยนสถานะและหลังการเปลี่ยนสถานะมีค่าดังนี้

$$\rho_i(\epsilon_i) = \frac{1}{2\pi^2\hbar^2} (2m_b^*)^{3/2} |\epsilon_i|^{1/2}$$

$$\rho_f(\epsilon_f) = \frac{1}{2\pi^2\hbar^2} (2m_b^*)^{3/2} (\hbar\omega - \epsilon_{gi} \pm \epsilon_p + \epsilon_i)^{1/2} \quad (2.23)$$

ในการเปลี่ยนสถานะแบบไม่ตรงนี้ต้องอาศัยโฟนอนเข้าช่วยหลายตัว ถ้าเป็นการดูดกลืนโฟนอน ฟังก์ชัน $f_+(\epsilon_p)$ ที่แสดงความน่าจะเป็นของการมีโฟนอนได้แก่ฟังก์ชันของ Bose-Einstein คือ

$$f_+(\epsilon_p) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\epsilon_p}{k_B T}\right) - 1} \quad (2.24)$$

และถ้าเป็นการคายโฟนอน ฟังก์ชัน $f_-(\epsilon_p)$ ที่แสดงความน่าจะเป็นของการมีโฟนอนได้แก่

$$f_-(\epsilon_p) = 1 + f_+(\epsilon_p) = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{\epsilon_p}{k_B T}\right)} \quad (2.25)$$

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง α_{in} คำนวณได้จากการหาปริพันธ์ของผลคูณของสมการในสมการที่ 2.23

$$\alpha_{in} = A' f(\epsilon_p) \int_{|\hbar\omega - \epsilon_{gi} \pm \epsilon_p|}^0 |\epsilon_i|^{1/2} (\hbar\omega - \epsilon_{gi} \pm \epsilon_p + \epsilon_i)^{1/2} d\epsilon_i \quad (2.26)$$

โดยที่ A' เป็นค่าคงตัว เมื่อทำการคำนวณสมการ 2.26 จะได้ว่า

$$\alpha_{ia} = \frac{\pi A' (\hbar\omega - \epsilon_{gi} - \epsilon_p)^2}{8 \exp(\epsilon_p/k_b T) - 1} + \frac{\pi A' (\hbar\omega - \epsilon_{gi} + \epsilon_p)^2}{8 (1 - \exp(\epsilon_p/k_b T))} \quad (2.27)$$

(คายโฟนอน) (ดูดโฟนอน)

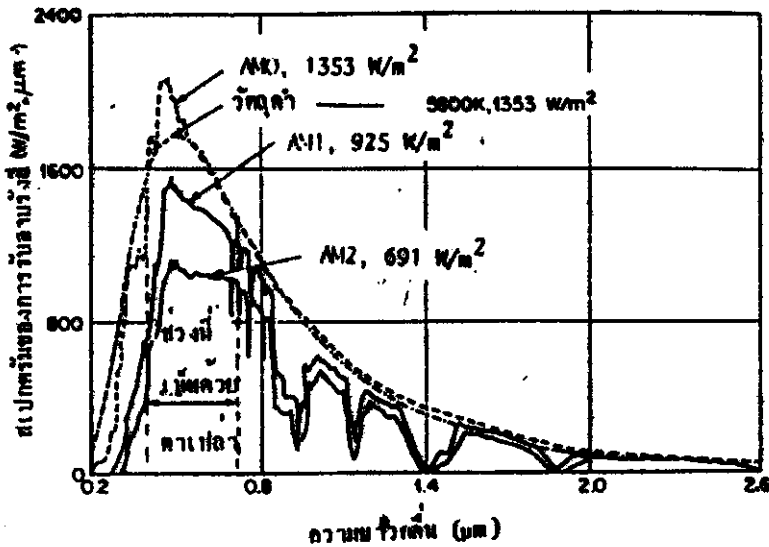
พจน์แรกทางขวามือเกิดจากการคายโฟนอน และพจน์ที่สองทางขวามือเกิดจากการดูดโฟนอน

2.3 ลักษณะเฉพาะของรังสีแสงอาทิตย์

2.3.1 ดวงอาทิตย์และค่าคงตัวสุริยะ

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่สำคัญในระบบสุริยะจักรวาลมีอิทธิพลต่อสิ่งมีชีวิตบนโลกทั้งในอดีต ปัจจุบัน และอนาคต พลังงานที่เกิดบนดวงอาทิตย์เป็นผลมาจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ฟิวชัน (Thermonuclear fusion) ดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มก๊าซทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.39×10^6 กิโลเมตร อยู่ห่างจากโลกเฉลี่ย 1.496×10^8 กิโลเมตร การแผ่รังสีที่ผิวดวงอาทิตย์สู่ชั้นบรรยากาศนอกโลกเทียบได้กับการแผ่รังสีของวัตถุดำ (black body) อุณหภูมิยังผลเป็น 5760K ดังภาพประกอบ 2.16

ดวงอาทิตย์มีอัตราการปลดปล่อยพลังงาน 3.85×10^{23} กิโลวัตต์ ที่ตกกระทบถึงโลกด้วยอัตรา 1.725×10^{14} กิโลวัตต์ และอยู่ในรูปของพลังงานแสงแดด เทียบเป็นพลังงานที่ได้รับ ใน 1ปี คือ 1.51×10^{18} กิโลวัตต์ชั่วโมง



ภาพประกอบ 2.16 สเปกตรัมของความรับอับรังสีแสงอาทิตย์ (solar spectral irradiation)

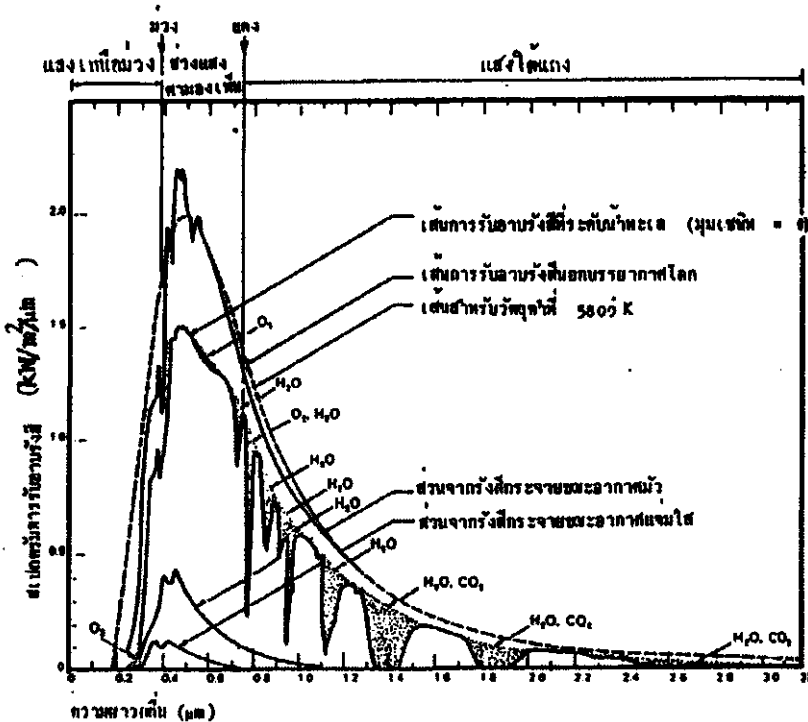
2.3.2 รังสีแสงอาทิตย์ภายในบรรยากาศโลก

2.3.2.1 บรรยากาศกับการดูดกลืนพลังงานการแผ่รังสี

รังสีแสงอาทิตย์เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศโลกจะถูกดูดกลืนเนื่องจากองค์ประกอบต่าง ๆ จากกราฟสเปกตรัมสุริยะในบรรยากาศโลก ภาพประกอบ 2.17

จะเห็นว่าความเข้มแสงอาทิตย์จะลดน้อยลงที่บางช่วงคลื่นดังนี้

1. ช่วงอุลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) ความยาวคลื่นต่ำกว่า 300 นาโนเมตร พลังงานของแสงจะถูกดูดกลืนโดย O_2, N_2, O_3 ในชั้นไอโอโนสเฟียร์(ionosphere) โดยเฉพาะ O_3 สามารถดูดกลืนรังสีอุลตราไวโอเล็ตได้มากทำให้แสงที่ตกกระทบผิวโลกเกือบจะไม่มีพลังงานแสงในช่วงอุลตราไวโอเล็ตเหลืออยู่
2. ช่วงที่คลื่นตามองเห็นได้ ความยาวคลื่น 400-700นาโนเมตร แสงถูกดูดกลืนด้วยโมเลกุลของ O_2, O_3 และน้ำบางส่วน
3. ช่วงรังสีอินฟราเรดความยาวคลื่นมากกว่า 800นาโนเมตร แสงถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำและ CO_2 การดูดกลืนนี้อยู่ในชั้นบรรยากาศใกล้ผิวโลกและทำให้เกิดความร้อนขึ้นในชั้นบรรยากาศ



ภาพประกอบ 2.17 สเปกตรัมสุริยะนอกชั้นบรรยากาศและที่ระดับพื้นดิน

4. ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 800-1200 นาโนเมตร บรรยากาศจะโปร่งแสงเรียกช่วงนี้ว่า หน้าต่างของบรรยากาศ (atmospheric window) ที่ความยาวคลื่นสูงกว่านี้แสงอาทิตย์จะถูกดูดกลืนโดยน้ำและ CO_2 เกือบหมด นอกจากนี้แสงยังถูกสะท้อนและกระเจิงโดยฝุ่นละอองในอากาศวันและก้อนเมฆมีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงหรือโตกว่าความยาวคลื่น การกระเจิงโดยโมเลกุลอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นรังสี

2.3.2.2 รังสีตรงและรังสีกระจาย

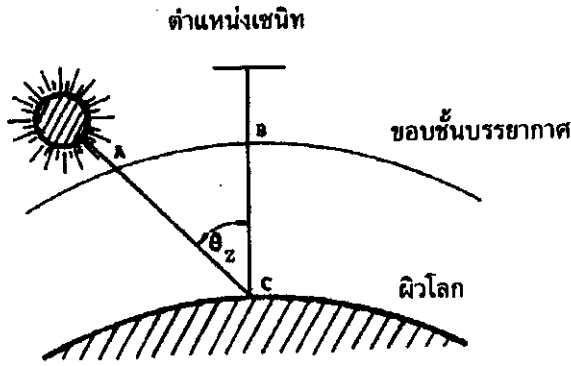
ผลกระทบของบรรยากาศที่มีสีแสงอาทิตย์มายังโลก ทำให้รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกประกอบด้วยรังสี 2 ส่วน

1. รังสีตรง (beam or direct radiation) เป็นรังสีช่วงคลื่นสั้น หรือเป็นรังสีที่พื้นโลกได้รับโดยตรงจากดวงอาทิตย์ทิศทางแน่นอน ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนมุมตกกระทบบนพื้นต่างๆบนโลกไปตามเวลารังสีตรงเหมาะกับการใช้งานสำหรับอุปกรณ์รวมแสง

2. รังสีกระจาย (diffuse or scattering radiation) เป็นรังสีช่วงคลื่นยาว หรือเป็นรังสีได้จากาการสะท้อนและการกระเจิงของรังสีแสงอาทิตย์เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศ หรือผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย เรียกว่ารังสีรวม (total or global radiation) เวลาอากาศโปร่งจะมีรังสีกระจายเพียง 5-10% มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีเมฆบังแสงอาทิตย์ การกระจายของค่ารังสีรวมเฉลี่ยรายวัน ณ บริเวณส่วนต่างๆของโลกที่เวลาต่างๆ

3. อากาศมวล (Air Mass)

ในการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของบรรยากาศต่อพลังงานแสงอาทิตย์และต่อสเปกตรัมของรังสีปริมาณรังสียังขึ้นอยู่กัระยะทางที่แสงต้องผ่านบรรยากาศจึงได้มีการกำหนดว่าระยะทางในแนวตั้งที่ระดับน้ำทะเลถือว่าม้อากาศมวลหนึ่ง (AM_1) นั่นคือดวงอาทิตย์ที่อยู่ตำแหน่งเหนือศีรษะพอดี หรือที่เซนิท (zenith) มุมเซนิท $\theta_z = 0$ องศา เมื่อดวงอาทิตย์ไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งเซนิท (zenith) ค่าอากาศมวลจะเปลี่ยนไปตามค่ามุมเซนิท θ_z ดังนั้นพารามิเตอร์อากาศมวลคืออัตราส่วนระหว่างระยะทางของแสงอาทิตย์ที่เวลาใด ๆ ต่อระยะทางเดินของแสงเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่งเหนือศีรษะ ดังภาพประกอบ 2.18



ภาพประกอบ 2.18 อากาศมวลที่สัมผัสกับมุมเซนิท θ_z , $\cos \theta_z = \frac{BC}{AC}$

ที่มา: ยุทธ, 2530

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad 2.28$$

เมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม $\theta_z = 60^\circ$ กับแนวตั้ง ณ จุดสังเกตการณ์ อากาศมวลมีค่าสอง (AM_2) ที่บรรยากาศโลก อากาศมวลมีค่าเป็นศูนย์ (AM_0)

2.3.2.3 รังสีตกกระทบพื้นราบแนวระดับติดตั้งตายตัว

การพิจารณาฟลักซ์ของรังสีตกกระทบบนพื้นราบแนวระดับที่ติดตั้งตายตัวเป็นก้าวแรกที่จะนำไปสู่การหาฟลักซ์ของรังสีตกกระทบบนพื้นเอียงเวลาวันนับเป็นตัวแปรที่สำคัญมาก ดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันเหนือศีรษะ เวลาสุริยะคติปรากฏ (apparent solar time, AST) จะเป็น 12 ชั่วโมงแต่เวลาท้องถิ่น (local clock time, LCT) จะต่างออกไป หรือสังเกตความแตกต่างระหว่างเวลาทั้งสองคือสุริยะเป็นเวลาวัตต์ด้วยนาฬิกาแดด ส่วนเวลาท้องถิ่นคือเวลาที่ดูจากนาฬิกาเราจะใช้เวลาสุริยะสำหรับการคำนวณเวลาที่ใช้ในข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเวลาท้องถิ่นอ่านจากนาฬิกา ดังนั้นก่อนที่จะนำไปใช้คำนวณจะต้องเปลี่ยนเวลาท้องถิ่นให้เป็นเวลาสุริยะเสียก่อน

$$AST = LCT \mp TZ \frac{E}{W} \pm \lambda \frac{E}{W} + \frac{EQT}{60} \quad 2.29$$

T_z คือเขตเวลา(time zone) เป็นตัวเลขกำหนดเขต ค่า T_z หาได้จากการเอาเส้นแวง(หน่วยองศา) ณ บริเวณที่ตั้งหารด้วย 15 ผลลัพธ์เป็นเบอร์เขตถ้าเศษน้อยกว่า 7.5° และ (ผลลัพธ์ +1) จะเป็นเบอร์เขต ถ้าเศษมากกว่า 7.5° ($+T_z$ สำหรับเส้นแวงตะวันตกและ $-T_z$ สำหรับเส้นแวงตะวันออก)

λ เป็นเวลาที่ตำแหน่งเส้นแวงของที่ตั้ง λ หาได้จากการเอาเส้นแวง(หน่วยองศา) ณ จุดที่ตั้งหารด้วย 15 ($+ \lambda$ สำหรับเส้นแวงตะวันออกและ $- \lambda$ สำหรับเส้นแวงตะวันตก)

EQT เป็นสมการของเวลา (equation of time) หน่วยนาที่เป็นค่าที่ใช้แก้ไขเวลา เนื่องจากความไม่เที่ยงตรงของวงโคจรของโลก

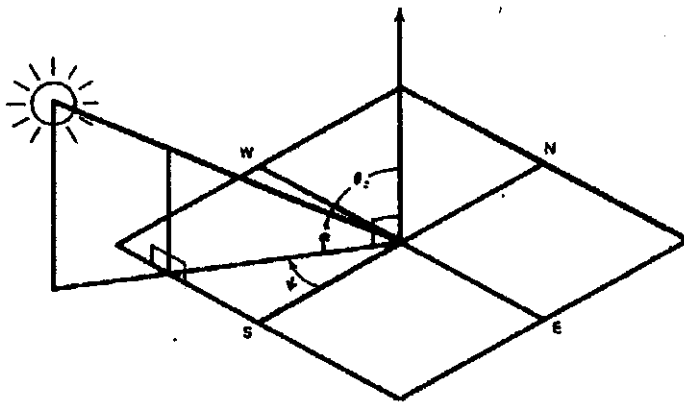
(หมายเหตุ ทุก ๆ เทอมมีค่าเป็นชั่วโมง)

การใช้ตรีโกณมิติในการหาอัลติจูดสุริยะ (Solar attitude) และมุมแอสซิมูท (azimuth angle) ของดวงอาทิตย์ จากรูปที่ 2.19 แสดงมุมต่างๆที่เกี่ยวข้อง

1. มุมชั่วโมง ω (hour angle) เป็นตำแหน่งของสถานที่ตั้งเบนไปจากดวงอาทิตย์เที่ยงวัน (solar noon) เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลกอาจแสดงค่า ω เป็นองศาโดยการคูณของเวลาขณะนั้นเป็นชั่วโมงกับเวลาเที่ยง ด้วย $360/24$

$$\omega(^{\circ}) = -15(12 - t) \quad 2.30$$

ω เป็นลบในช่วงเช้าก่อนเที่ยงวัน และ ω เป็นลบในช่วงบ่าย



ภาพประกอบ 2.19 มุมเซนิตสุริยะ θ_s , อัลติจูด α , และแอสซิมูท ϕ ที่สัมพันธ์กับพื้นราบระดับบนพื้นโลก

ที่มา: ยุทธ, 2530

2. มุมเซนิท θ_z (zenith angle) และ อลติจูดสุริยะ α (solar altitude) θ_z เป็นมุมระหว่างแนวตั้งเหนือศีรษะจากเซนิทกระทำกับรังสีตกกระทบจากดวงอาทิตย์ ณ จุดที่ราบแนวระดับ ส่วน α เป็นมุมประกอบ 90° ของ θ_z ($\alpha = 90^\circ - \theta_z$)

$$\cos \theta_z = \sin \theta_s = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad 2.31$$

φ เป็นมุมเส้นรุ้ง (latitude) ใช้ค่าบวกที่ซีกโลกเหนือ δ เป็นมุมเดคลิเนชัน (Declination angle)

3. แอซิมุสสุริยะ φ (solar azimuth) เป็นมุมที่วัดระหว่างระนาบตั้งของรังสีตกกระทบกระทำกับแนวทิศใต้ (แนวทิศเหนือสำหรับซีกโลกใต้) ของระนาบเมอริเดียน ณ ตำแหน่งที่ตั้งบนพื้นราบแนวระดับ หน่วยเป็นองศา

$$\sin \varphi = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad 2.32$$

φ เป็นลบในช่วงเช้าและบวกในช่วงบ่าย

4. มุมชั่วโมงดวงอาทิตย์ขึ้นและตก

$\omega_s = -\tan \varphi \tan \delta$ ω_s เป็นลบสำหรับดวงอาทิตย์ขึ้นและเป็นบวกเมื่อดวงอาทิตย์ตก สำหรับ ω , หน่วยเป็นชั่วโมงต่างจากเวลาเที่ยง มีสมการดังนี้

$$\omega_s = \pm \frac{24}{360} \text{ xar} \cos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad 2.33$$

ดังนั้น $AST = (12 + \omega_s)$ ชั่วโมง นำไปคำนวณหา LCT ของดวงอาทิตย์ขึ้นและตกได้ สำหรับการอาบรังสีรวมบนพื้นโลก (global irradiance) (W/m^2) บนที่ราบในแนวระดับเป็นผลรวมของความร้อนอาบรังสี (direct or beam irradiance) กับรังสีกระจาย (diffuse irradiance)

$$H_{\text{global}} = H_{\text{beam}} + H_{\text{diffuse}} \quad 2.34$$

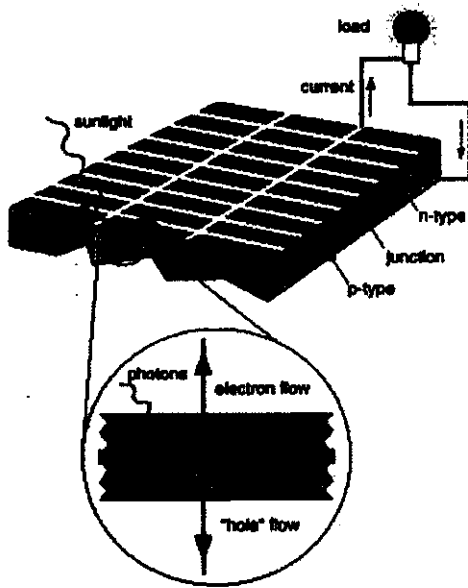
$$H_{\text{global}} = I_{BN} \sin \alpha + CI_{BN} \quad 2.35$$

I_{BN} เป็นความหนาแน่นกำลังงาน (Power density). (W/m^2) หรือฟลักซ์สุริยะ (Solar flux) วัดตั้งฉากกับแนวรังสีตรงบนพื้นโลก (รังสีเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศลงมา ความแรงจะลดลงเป็นลำดับ เนื่องจากดัชนีการลดทอน (attenuation index) หรือสัมประสิทธิ์การทำลาย (extinction coefficient)

พารามิเตอร์ c เป็นค่าเฉลี่ยในรอบเดือนของอัตราส่วนระหว่าง $H_{diffuse}$ กับ I_{BN} เมื่อภาวะอากาศแจ่มใส I_{BN} สถานะนั้น ๆ

2.4 เซลล์แสงอาทิตย์

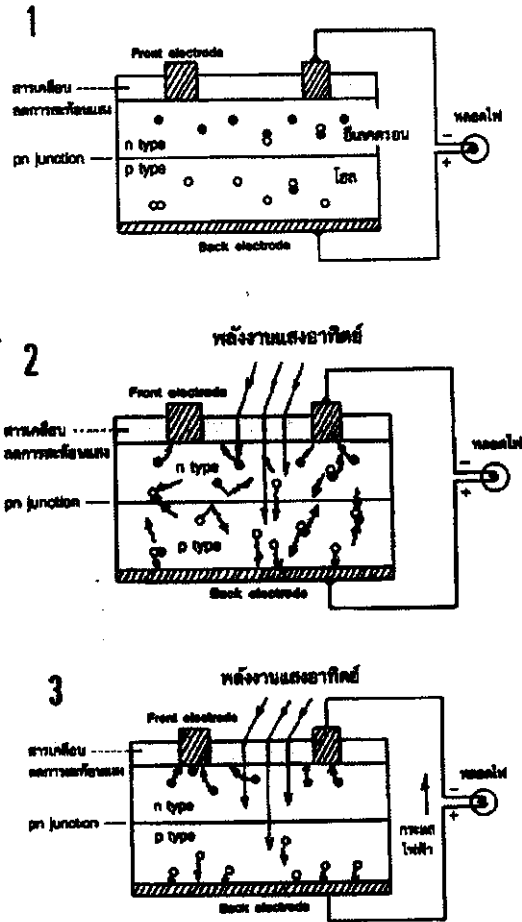
2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพประกอบ 2.20 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: http://web.mit.edu/afs/athena.mit.edu/course/3/3.082/www/team2_f02

ภาพประกอบ 2.20 แสดงโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ รอยต่อพีเอ็น (p-n junction) ของสารกึ่งตัวนำ และวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดในพื้นโลกได้แก่ ซิลิคอน ซึ่งถลุงได้จากแร่ควอตซ์ไซต์หรือทราย และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ตลอดจนการทำให้เป็นผลึก เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผ่นอาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว) มีความหนา 200-400 ไมโครเมตร (0.2-2.4 มิลลิเมตร) และต้องนำมาแพร์ซิมสารเจือปนในเตาอุณหภูมิสูง (ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส) เพื่อสร้างรอยต่อ พี-เอ็น ที่มีความลึกประมาณ 0.3-0.5 ไมโครเมตร ขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นผิวสัมผัสแผ่นโลหะเต็มแผ่น ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่ได้รับแสงมีลักษณะเป็นลายเส้นคล้ายก้างปลา

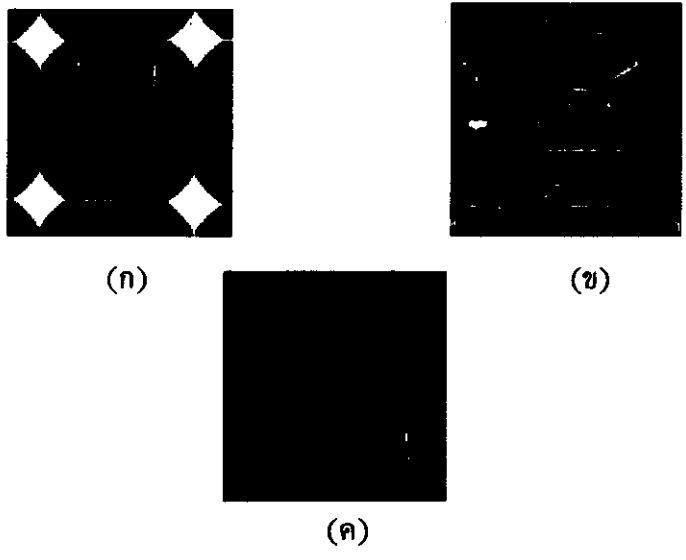


ภาพประกอบ 2.21 การทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: http://www.egat.co.th/rdo/energy/web-solar/page4_solar.htm

จากภาพประกอบ 2.21 แสดงการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นจากซิลิคอน โดยด้านบนของเซลล์เป็นชนิดเอ็น แสดงดังภาพประกอบ 2.21(1) เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ ก็จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล สนามไฟฟ้าที่รอยต่อซึ่งมีทิศจากชั้นเอ็นมายังชั้นพีจะแยกคู่พาหะทั้งสองให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังชั้นเอ็น และโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังชั้นพี แสดงดังภาพประกอบ 2.21(2) เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยัง ขั้วด้านเอ็นและโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วด้านพี เมื่อต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าภายนอก ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน แสดงดังภาพประกอบ 2.21(3)

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นกระแสตรง ถ้าผู้ใช้ต้องการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ ต้องต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับก่อนที่จะต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าวปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้งานบนพื้นโลกมากที่สุดมี 3 ชนิดซึ่งได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนภาพประกอบ 2.22 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 ชนิดนี้



ภาพประกอบ 2.22 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (ข) ชนิดผลึกโพลีซิลิคอน และ(ค) ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ที่มา: http://www.solarcentury.com/products/solar_photovoltaics/

2.4.2 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมและประสิทธิภาพการรวบรวมพาหะ

เมื่อส่องแสงอาทิตย์เข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโต (Photocurrent) ที่เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตได้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์และผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์

ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม(Spectral response) หมายถึง อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าโฟโตลัดวงจร $J_{sc}(\lambda)$ ต่อพลังงานแสง $P(\lambda)$ ที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ ซึ่งทั้ง $J_{sc}(\lambda)$

และ $P(\lambda)$ เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์ (A/W)

คำว่า ประสิทธิภาพการรวมพาหะ (Collection efficiency) หมายถึงอัตราส่วนของจำนวนอิเล็กตรอนที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพการรวมพาหะเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงและมีนิยามอีก 2 ชนิด ดังนี้

ประสิทธิภาพการรวมพาหะภายใน (Internal collection efficiency: η_{in}) หมายถึง ประสิทธิภาพการรวมพาหะในกรณีที่สมมติว่าผิวด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีการสะท้อนแสง

ประสิทธิภาพการรวมพาหะภายนอก (External collection efficiency: η_{ext}) หมายถึง ประสิทธิภาพการรวมพาหะในกรณีที่ผิวด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์มีการสะท้อนแสง

ประสิทธิภาพการรวมพาหะภายในและภายนอกดังกล่าวเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\eta_{in}(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{P(\lambda)} = \frac{J_{sc}(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} \quad 2.36$$

$$\eta_{ext}(\lambda) = \eta_{in}(\lambda)[1-R(\lambda)] = \frac{J_{sc}(\lambda)}{qF(\lambda)} \quad 2.37$$

โดยที่ $R(\lambda)$ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ $F(\lambda)$ เป็นโฟตอนลักซ์ ซึ่งหมายถึง จำนวนโฟตอนต่อหน่วยพื้นที่และหน่วยเวลาที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ q เป็นประจุอิเล็กตรอน

โดยทั่วไปประสิทธิภาพการรวมพาหะภายในจะมีค่ามากกว่าประสิทธิภาพการรวมพาหะภายนอกเสมอ และประสิทธิภาพการรวมพาหะทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ผลรวมทั้งหมดของ η_{ext} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.37 คือ

$$\eta_{ext} = \frac{\sum J_{sc}(\lambda)}{q \sum F(\lambda)} \quad 2.38$$

2.4.3 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้อธิบายลักษณะสมบัติเอาต์พุต (Output characteristics) ของเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

2.4.3.1 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency)

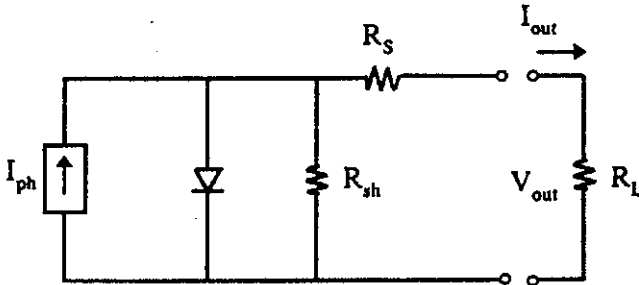
คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ อาจเรียกสั้น ๆ ว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และใช้สัญลักษณ์ว่า η เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$\text{ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด} \times 100\%}{\text{พื้นที่รับแสง} \times \text{กำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์}}$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{\text{Area} \times P_{\text{in}}} \times 100\% \quad 2.39$$

2.4.3.2 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short circuit current)

ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพลัดวงจร เราเรียกกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรว่า กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current: I_{sc})



ภาพประกอบ 2.23 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

ที่มา: ดุลิต, 2542

ภาพประกอบ 2.23 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ถูกส่องด้วยแสง ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ามีด I และแรงดันไฟฟ้า V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพมีดจะมีรูปเหมือนกับสมการของกระแสไฟฟ้าไดโอด กล่าวคือ

$$I = I_0 [\exp(qV/nkT) - 1] \quad 2.40$$

โดยที่ $I_0 = qA \left(\frac{D_h p_n}{L_h} + \frac{D_q n_p}{L_q} \right)$ เรียกว่ากระแสไฟฟ้าย้อนอิมิตัวย้อนกลับ

(reverse saturation current) และ n เป็น ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด ดังนั้นกระแสไฟฟ้า I_{out} ที่ไหลออกสู่วงจรภายนอกจะเท่ากับผลต่างระหว่างกระแสไฟฟ้ามีด I_{dark} และกระแสไฟฟ้าโฟโต $I_{ph} (= I_{sc})$ ดังนี้

$$I_{out} = I_{dark} - I_{ph} \quad 2.41$$

ในที่นี้ $I_{ph} (= I_{sc})$ คำนวณได้จากสมการที่ 2.40 และถ้าให้ A คือพื้นที่รับแสง จะได้ว่า

$$I_{sc} = qA \int_0^{\infty} F(\lambda) \eta_{ext}(\lambda) d\lambda \quad 2.42$$

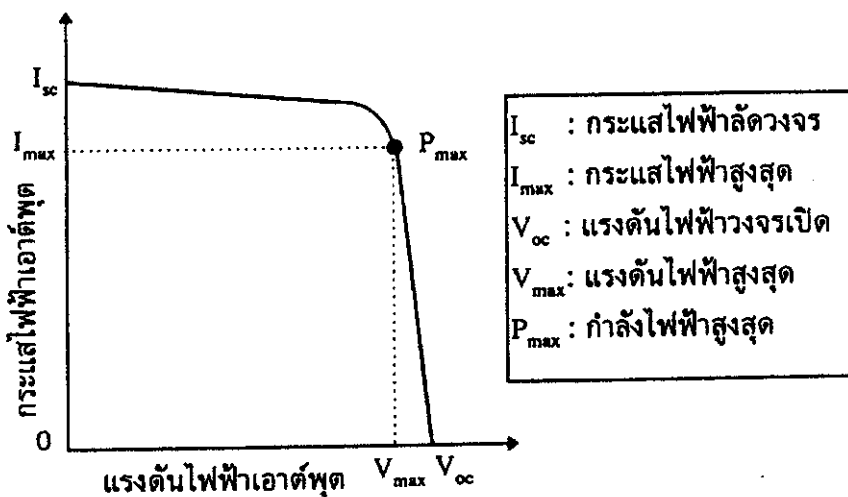
ถ้าพิจารณาความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ ความต้านทานอนุกรม R_s และ ความต้านทานขนั้ด R_{sh} ด้วย จะทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_{out} มีค่าดังนี้

$$I_{out} = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad 2.43$$

2.4.3.3 แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (Open Circuit Voltage)

ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพวงจรมืด แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (open circuit voltage: V_{oc}) ค่า V_{oc} คำนวณได้จากสมการที่ 2.41 ได้แทนค่า $I_{out} = 0$ ดังนั้นจึงได้สมการว่า

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad 2.44$$



ภาพประกอบ 2.24 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

ภาพประกอบ 2.24 แสดงตัวอย่างลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ จุดที่กราฟตัดแกนแรงดันไฟฟ้าคือแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด จุดที่กราฟตัดแกนกระแสไฟฟ้าคือกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้าสูงสุด P_{\max} (Maximum power) ที่เราได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใหญ่ที่สุดภายในกราฟลักษณะสมบัตินี้ ซึ่งแสดงด้วยเส้นไขปลาในภาพประกอบ 2.24 ถ้าให้ V_{\max} (maximum voltage) และ I_{\max} (maximum current) คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับที่จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้น

$$P_{\max} = V_{\max} \times I_{\max} \quad 2.45$$

เราสามารถคำนวณหาค่า V_{\max} ได้ด้วยการหาอนุพันธ์ของ P_{\max} เทียบกับ V_{\max} และกำหนดให้

$$\frac{\partial P_{\max}}{\partial V_{\max}} = 0 \text{ ผลลัพธ์คือ}$$

$$\exp\left(\frac{qV_{\max}}{nkT}\right) \left(1 + \frac{qV_{\max}}{nkT}\right) = \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad 2.46$$

ด้วยวิธีการคำนวณในทำนองเดียวกัน I_{\max} จะมีค่าเท่ากับ

$$I_{\max} = \frac{(I_{sc} + I_0) \frac{qV_{\max}}{nkT}}{1 + \frac{qV_{\max}}{nkT}} \quad 2.46(1)$$

สมการที่ 2.46 และ 2.46(1) ชี้ให้เราทราบว่า P_{\max} จะมีค่ามากเมื่อ I_0 มีค่าน้อย (นั่นคือ ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำควรมีค่ากว้างพอสมควร) และ η มีค่าน้อยมาก

2.4.3.4 ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor)

เอาต์พุตพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill factor) เขียนย่อว่า FF นิยามของ FF คือ อัตราส่วนของพื้นที่ของ $V_{\max} \times I_{\max}$ ต่อพื้นที่ของ $V_{oc} \times I_{sc}$ และเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

$$= \frac{V_{\max}}{V_{oc}} \left[1 - \frac{\exp(qV_{\max}/nkT) - 1}{\exp(qV_{oc}/nkT) - 1} \right] \quad 2.47$$

ถ้าความต้านทานอนุกรม R_s ในเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย จะทำให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ FF มีค่ามาก ถ้าเราทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น เราสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \times 100\% \quad 2.48$$

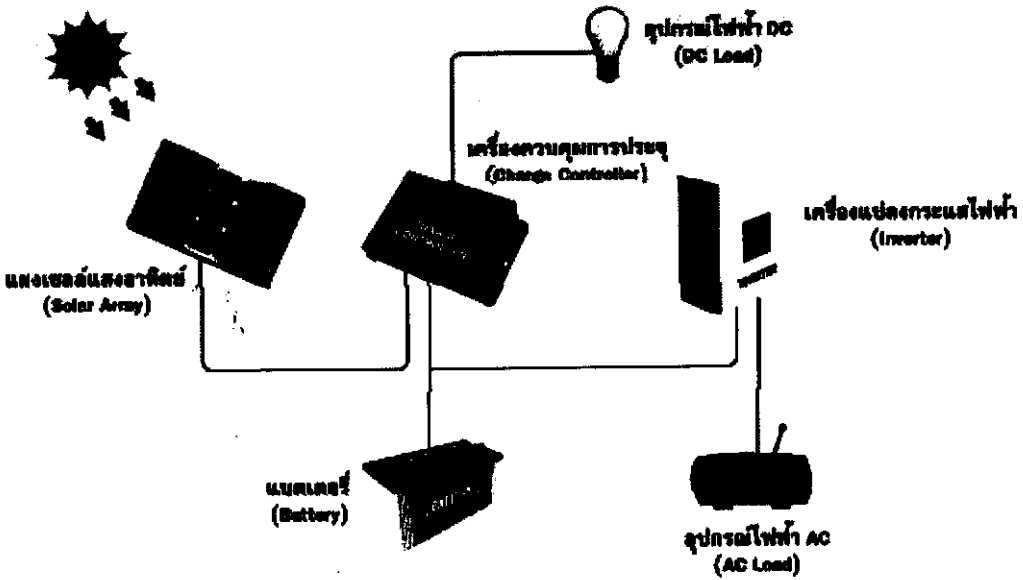
$$= FF \times (nkT/q) \ln[(I_{sc}/I_0) + 1] \times q \times \frac{\int_0^{\infty} F(\lambda) \eta_{ext}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} F(\lambda) (hc/\lambda) d\lambda} \quad 2.49$$

2.4.2 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้งานในหลายด้านหลายสาขาการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) การใช้งานกับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งต้องการเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังเอาต์พุตไม่สูง และ 2) การใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งต้องการเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังเอาต์พุตสูง ๆ ตั้งแต่หลายสิบลวัตต์ขึ้นไปถึงหลายกิโลวัตต์

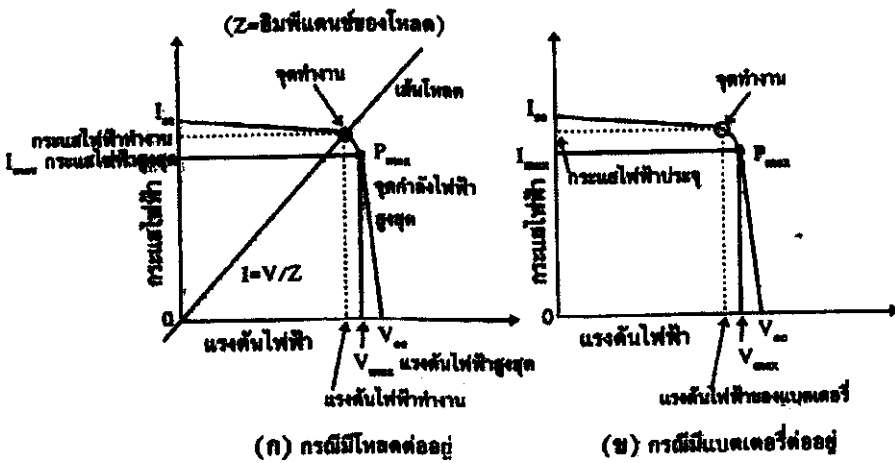
2.4.2.1 จุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ว่าประเภทใดเริ่มแรก ผู้ใช้ควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ภาพประกอบ 2.26 แสดงกราฟลักษณะสมบัติเอาต์พุตและจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ปกติกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถป้อนให้กับโหลดได้นั้น จะอยู่บนเส้นกราฟ I-V นี้ เสมอ ดังนั้นคำว่าจุดทำงาน จึงหมายถึงจุดที่กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ป้อนให้โหลดนั่นเอง ตัวอย่างวิธีการกำหนดจุดทำงานมีดังนี้



ภาพประกอบ 2.25 ลักษณะการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php



ภาพประกอบ 2.26 กราฟแสดงลักษณะสมบัติเอ๊าต์พุตและจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: ดุสิต, 2542

1. ในกรณีของการต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลด

จุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกกำหนดโดยอิมพีแดนซ์ของโหลดในรูป (ก) เส้นตรงในรูปนี้คือเส้นโหลด จุดตัดของเส้นโหลดกับกราฟ I-V คือ จุดทำงาน จากจุดทำงานนี้

เมื่อเราลากเส้นตรงไปตัดกับแกนกระแสไฟฟ้า จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าทำงาน (คือกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้โหลด) และเมื่อเราลากเส้นตรงไปตัดกับแกนแรงดันไฟฟ้า ก็จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าทำงาน (คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้โหลด)

2. ในกรณีของการต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับแบตเตอรี่ (เพื่อประจุไฟฟ้า)

ในรูป (ข) จุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกกำหนดโดยแรงดันไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่ เมื่อเราลากเส้นตรงจากจุดทำงานไปตัดแกนแรงดันไฟฟ้า จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ประจุเข้าแบตเตอรี่ และเมื่อเราลากเส้นตรงจากจุดทำงานไปตัดแกนแรงดันไฟฟ้า ก็จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ประจุเข้าแบตเตอรี่

ในการใช้งานจริง จุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 กรณี ไม่จำเป็นต้องเป็นจุดเดียวกับจุดที่เซลล์แสงอาทิตย์จะให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้สูงสุด (P_{max}) กราฟลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาพประกอบ 2.26 โดยทั่วไปจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของอุณหภูมิและแสง ดังนั้นผู้ใช้งานจึงควรทราบสภาพแวดล้อมเหล่านี้ให้ชัดเจนด้วย ตาราง 2.2 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์และความเข้มของแสงที่เหมาะสม

ตาราง 2.2 ตัวอย่างเงื่อนไขความสว่างของแสงที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ในการใช้งานด้านต่าง ๆ

ที่มา: ดุสิต, 2542

อุปกรณ์	ต้นกำเนิดแสง	ความสว่างแสง
เครื่องคิดเลข	หลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือ แสงภายในห้องทำงาน	ต่ำสุด 50-100 lux มาตรฐาน 200-800 lux สูงสุด ประมาณ 120,000 lux
นาฬิกาข้อมือ	แสงภายในห้องหรือแสงอาทิตย์	มาตรฐาน 3,000-100,000 lux สูงสุด ประมาณ 120,000 lux
วิทยุ	แสงภายในห้องหรือแสงอาทิตย์	มาตรฐาน 3,000-100,000 lux สูงสุด ประมาณ 120,000 lux
เครื่องประจุแบตเตอรี่	ส่วนมากเป็นแสงอาทิตย์	มาตรฐาน 10,000-100,000 lux สูงสุด ประมาณ 120,000 lux

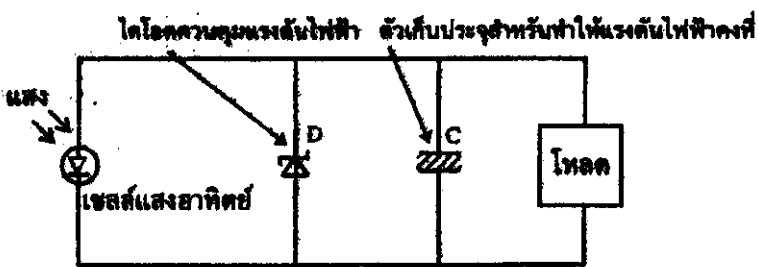
2.4.2.2 วงจรพื้นฐาน

การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าให้ผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์มี

2 วิธีคือ

1. กรณีการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวเป็นต้นกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

ภาพประกอบ 2.27 แสดงวงจรพื้นฐานในการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวเป็นต้นกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ถ้าเราใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อป้อนพลังงานให้เครื่องคิดเลขซึ่งมี LSI เป็นโหลด ในวงจรจะต้องมีไดโอดสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินขีดจำกัด (นิยมใช้ซีเนอร์ไดโอด) และตัวเก็บประจุสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ ตัวเก็บประจุนี้ช่วยควบคุมมิให้ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ามากเกินไป ($\pm 10\%$) เช่นกรณีที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง มาก ๆ หรือเกิดแสงไฟกระพริบจ้ามก ๆ

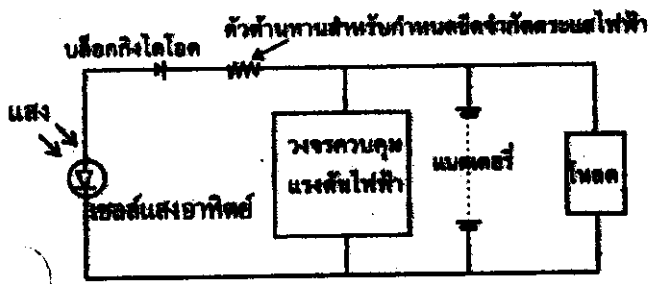


ภาพประกอบ 2.27 วงจรพื้นฐานการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่มีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานเพียงอย่างเดียว

ที่มา: ดุลิต, 2542

2. กรณีใช้แบตเตอรี่สำหรับประจุไฟฟ้าควบคุมด้วย

ภาพประกอบ 2.28 แสดงวงจรการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีแบตเตอรี่สำหรับประจุไฟฟ้า จะต้องมิไดโอดที่ทำหน้าที่ป้องกันมิให้กระแสไฟฟ้าไหลย้อนจากแบตเตอรี่กลับเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ และมีตัวต้านทานสำหรับควบคุมมิให้กระแสไฟฟ้าไหลเกินขีดจำกัด (หรืออาจใช้วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าแทนก็ได้)



ภาพประกอบ 2.28 วงจรการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้แบตเตอรี่สำหรับประจุไฟฟ้า

ที่มา: ดุลิต, 2542