

บทที่ 9

หัวข้อพิเศษ

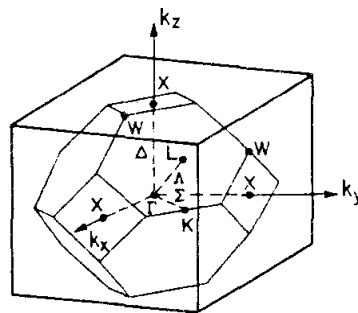
วัตถุประสงค์

เพื่อ เป็นการ เสริมความ เข้าใจใน เนื้อหาของบทต้นๆ ให้มากยิ่งขึ้น

9.1 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบางชนิด

แถบพลังงานของของแข็งซึ่งคือความสัมพันธ์ระหว่าง E กับ k สามารถคำนวณได้จากสมการชโรดิงเงอร์ ซึ่งตามปกติจะเป็นการคำนวณแบบประมาณในลักษณะปัญหา "one - electron problem" ในเรื่องนี้ทฤษฎีของบลอชนับเป็นทฤษฎีหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุด (ดูบทที่ 2 และ ในบรรณานุกรม) จากคุณสมบัติความสมมาตรในผลึก ความสัมพันธ์ระหว่าง E กับ k ที่ k ค่าต่างๆ จะเหมือนกับในโซนแรก (1^{st} Brillouin Zone) ดังนั้นการพลอต E กับ k โดยทั่วๆ ไปจะอยู่ในโซนแรกเท่านั้น

รูป 9.1 แสดง 1^{st} B.Z ของโครงสร้างผลึกแบบผลึก เพชรและแบบซิงค์ซัลไฟด์ (ดูบทที่ 1) ซึ่งแสดงจุดสมมาตรและเส้นสมมาตรที่สำคัญของแถบพลังงาน คือ



รูป 9.1 1^{st} Brillouin Zone ของโครงสร้างผลึก เพชรและซิงค์ซัลไฟด์

Γ หมายถึง จุดศูนย์กลางของโซน คือตำแหน่ง $\frac{2\pi}{a} (0, 0, 0)$

A หมายถึง unu $\langle 111 \rangle$

L หมายถึง จุดที่แกน $\langle 111 \rangle$ ตัดกับขอบของ 1st B.Z. คือ $\frac{2\pi}{a} (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$

A หมายถึง แกน $\langle 100 \rangle$

χ หมายถึง จุดที่แกน $\langle 100 \rangle$ ตัดกับขอบของ 1st B.Z. คือ $\frac{2\pi}{a} (0, 0, 1)$

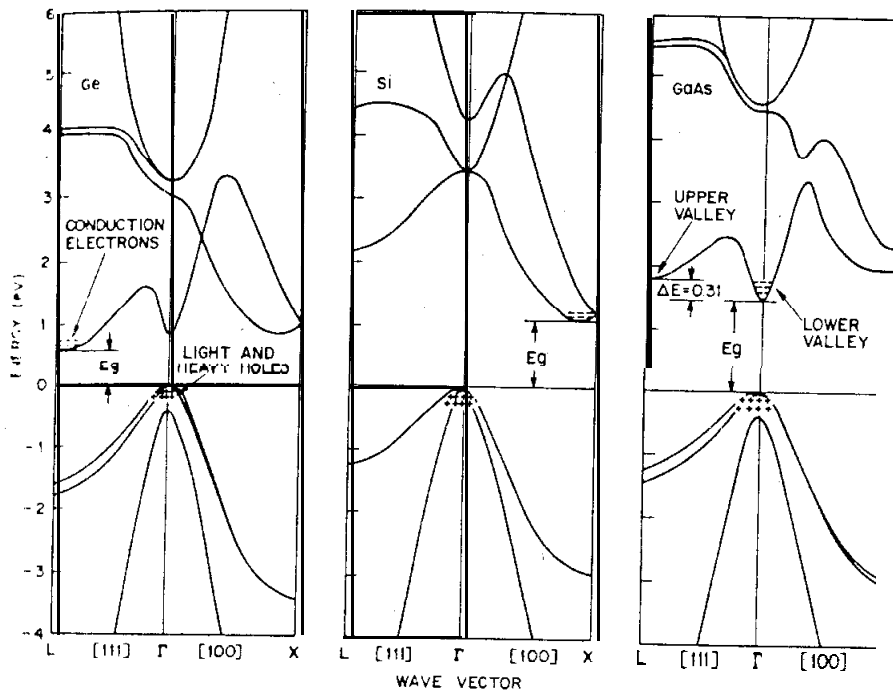
Σ หมายถึง แกน $\langle 110 \rangle$

K หมายถึง จุดที่แกน $\langle 110 \rangle$ ตัดกับขอบของ 1st B.Z. คือ $\frac{2\pi}{a} (\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, 0)$

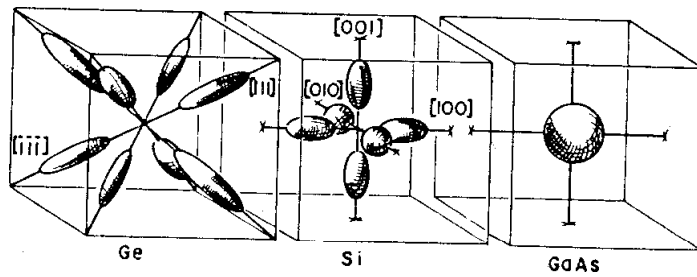
การคำนวณทางทฤษฎีของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำมีวิธีการที่สำคัญๆ หลายวิธี เช่น orthogonalized plane-wave method, pseudopotential method เป็นต้น รูป 9.2 แสดงผลการศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของ Ge Si และ GaAs จะเห็นว่า มีช่วงพลังงานที่อิเล็กตรอนเข้าไปครอบครองไม่ได้ ระดับพลังงานที่อยู่สูงกว่าช่วงนี้คือแถบความนำ ส่วนระดับพลังงานต่ำลงมากคือแถบวาเลนซ์ ช่วงระหว่างจุดต่ำสุดของแถบความนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ คือช่องว่างแถบพลังงาน E_g ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของสารกึ่งตัวนำและฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ พลังงานของอิเล็กตรอน เป็นบวก เมื่อวัดขึ้นไป ส่วนของโฮล เป็นบวก เมื่อวัดลงมาทางด้านล่าง

ในแถบวาเลนซ์จะมีแถบพลังงานย่อย (subbands) หลายแถบ มวลยังผลของโฮลในแต่ละแถบย่อยจะไม่เท่ากันแล้วแต่ลักษณะการโค้งของเส้นกราฟพลังงาน (ดูหัวข้อ 2.2) โฮลหนัก (heavy - hole) อยู่ในแถบพลังงานที่มีค่า $\partial^2 E / \partial k^2$ น้อย ส่วนโฮลเบา (light - hole) อยู่ในแถบพลังงานที่มีค่า $\partial^2 E / \partial k^2$ มากกว่า

ในแถบความนำจะมีแถบพลังงานย่อยหลายแถบเช่นกัน ตอนล่างสุดของแถบความนำ อาจอยู่ในแกน $\langle 111 \rangle$ คือ Λ หรือ L , แกน $\langle 100 \rangle$ คือ Δ หรือ χ , หรือที่จุดศูนย์กลางโซน Γ



รูป 9.2 แถบพลังงานของ Ge Si และ GaAs เครื่องหมายลบแสดงอิเล็กตรอนในแถบความนำ เครื่องหมายบวกแสดงโฮลในแถบวาเลนซ์



รูป 9.3 รูปทรงของผิวพลังงานคงที่ใน Ge Si และ GaAs

รูปทรงของผิวพลังงานคงที่ (constant energy surface) แสดงไว้ในรูป 9.3 ในกรณีของ Ge เป็น "half ellipsoids" ในแกน <111> คือมีทั้งหมด 8 ดังรูป โดยที่ขอบของโซนอยู่ตรงกลางของ ellipsoid สำหรับ Si มี 6 ellipsoids ในแกน <100> โดยมีตำแหน่งอยู่ที่ประมาณ 3/4 จากจุดศูนย์กลางโซน ส่วนกรณีของ GaAs เป็นทรงกลมอยู่ที่ศูนย์กลางโซน

จากข้อมูลการทดลองนำมาเทียบกับทฤษฎี โดยใช้กราฟของพลังงานเป็นพาราโบลา จะได้ค่ามวลยังผลของอิเล็กตรอนใน GaAs 1 ค่าและมี 2 ค่าสำหรับ Si หรือ Ge คือ m_{ℓ}^* และ m_{t}^* เมื่อ m_{ℓ}^* เป็นมวลยังผลตามแกนสมมาตร และ m_{t}^* เป็นมวลยังผลตามแกนตั้งฉากกับแกนสมมาตร สำหรับ Si $m_{\ell}^* = 0.97m_0$ และ $m_{t}^* = 0.19m_0$ และสำหรับของ Ge $m_{\ell}^* = 1.6m_0$ และ $m_{t}^* = 0.082m_0$

สารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานใกล้เคียงกับโครงสร้างในอุดมคติมากที่สุดคือ GaAs แถบความนำมีจุดต่ำสุดที่ศูนย์กลางโซน ($k = 0$) มีสมการของพลังงานเป็น $E = \hbar^2 k^2 / 2m^*$ สำหรับ k บริเวณกลางๆ โซน มีค่ามวลยังผลของอิเล็กตรอนเท่ากับ $0.072m_0$ และ $E_g = 1.42$ eV ที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิและสนามไฟฟ้าค่าไม่สูงนัก (ดูหัวข้อ 4.4) อิเล็กตรอนส่วนใหญ่อยู่ในแวลลีย์ต่ำสุดนี้ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่า m^* เพียงค่าเดียว เมื่ออยู่ห่างออกไปจากศูนย์กลางโซน E จะเริ่มไม่เป็นพาราโบลา มีจุดต่ำสุดที่อยู่สูงขึ้นไปเป็นลำดับสองหรือแวลลีย์ที่สองตามแกน <100> ซึ่งในแวลลีย์ที่สองนี้อิเล็กตรอนของ GaAs จะมีค่ามวลยังผลมากขึ้นคือประมาณ $0.36m_0$ (ข้อมูลใหม่บางแห่งได้แสดงว่าแวลลีย์ที่สองอยู่ในแกน <111> ซึ่งมี 8 แวลลีย์ -รูป 9.2)

m_h^* ของ Si ในแถบวาเลนซ์มี 3 ค่าคือ โฮลหนักหนึ่งค่า ($0.5m_0$) และโฮลเบา 2 ค่า จุดต่ำสุดของแถบความนำอยู่ในทิศ <100> ซึ่งจากความสมมาตรของผลึกจะเห็นว่า มี 6 แวลลีย์ ส่วนค่า E_g ของ Si มีค่าประมาณ 1.1 eV ที่อุณหภูมิห้อง ดังรูป 9.2 สำหรับ

Ge จุดต่ำสุดของแถบความนำอยู่ในทิศ <111> มี 8 แวลลีย์ ลักษณะของแถบวาเลนซ์เป็นเช่นเดียวกับของ Si ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 0.66 eV

ค่า E_g ของ Si Ge GaAs และสารกึ่งตัวนำอื่นอีกหลายชนิดจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิคือมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตามสมการ

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)} \dots\dots\dots(9-1)$$

α และ β เป็นค่าที่สำคัญสำหรับสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

สารประกอบกึ่งตัวนำไบนารี (binary compounds) โดยเฉพาะกลุ่ม สาม-ห้า ส่วนใหญ่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบเดียวกับ GaAs ตาราง 9.1 แสดงคุณสมบัติบางประการของสารประกอบกลุ่ม สาม-ห้า D หมายถึงไดเรคแกพ I หมายถึงอินไดเรคแกพ

ตาราง 9.1

คุณสมบัติของสารประกอบกลุ่มสาม-ห้า (300^oK)

	E_g (eV)	m_e/m	m_{h1}/m	μ_e (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	μ_h (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)
InSb	0.18D	0.014	0.4	78 000	750
InAs	0.35D	0.022	0.4	28 000	450
GaSb	0.72D	0.044	0.23	44 000	700
InP	1.33D	0.078	—	5 200	150
GaAs	1.42D	0.065	0.5	8 900	400
AlSb	1.62I	—	—	200	—
AlAs	2.13I	—	—	—	—
GaP	2.26I	—	—	200	100
AlP	2.43I	—	—	—	—

สารประกอบไบนารีกลุ่มสอง-หก ที่สำคัญคือ ตะกั่วซัลโคจีไนด์ PbS PbSe PbTe E_g ของสารพวกนี้ลดลงไปตามอุณหภูมิซึ่งตรงกันข้ามกับของพวก Si ดังได้แสดงไว้ในตาราง 9.2

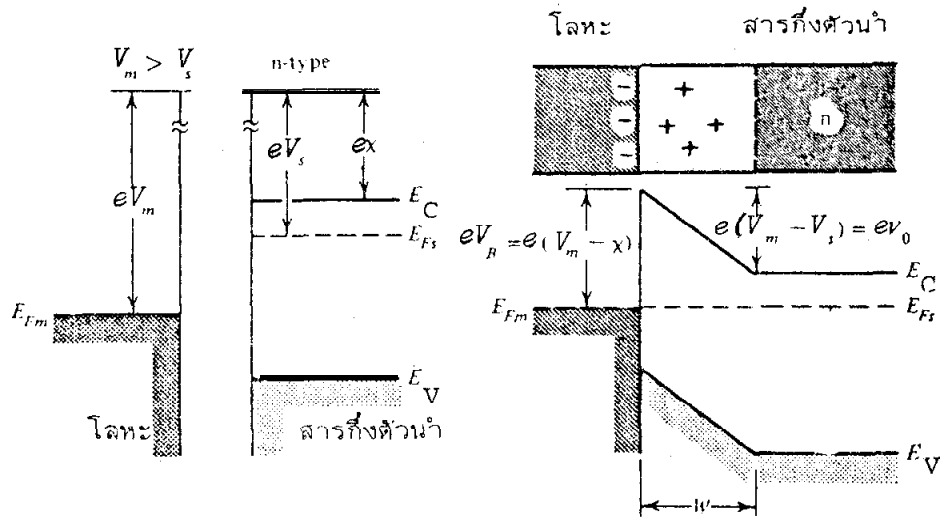
ตาราง 9.2

E_g ของตะกั่วซัลโคจีไนด์

	T (°K)	E_g (eV)
PbS	290	0.41
	77	0.31
	4	0.29
PbSe	290	0.27
	77	0.17
	4	0.15
PbTe	290	0.32
	77	0.22
	4	0.19

9.2 ขอดกั๊แม เรีย (Schottky barrier)

เมื่อโลหะซึ่งมีค่า เวิร์คฟังก์ชัน เท่ากับ eV_m (เวิร์คฟังก์ชันคือ พลังงานที่ต้องการในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนที่ระดับ เฟอร์มิออกไปสู่อวกาศ) ถูกนำมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำซึ่งมีเวิร์คฟังก์ชัน เท่ากับ eV_s ดังรูป 9.4 จะเกิดการแพร่ของประจุจนกระทั่งระดับ เฟอร์มิในสารทั้งสองเท่ากัน พิจารณากรณี $eV_m > eV_s$ ก่อนการสัมผัสระดับ เฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ (ในรูป เป็นชนิด เอ็น) จะสูงกว่าของโลหะ เมื่อสัมผัสกันอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจะแพร่เข้าไปในโลหะ จนกระทั่งระดับ เฟอร์มิ เท่ากันหรือระบบ เข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งจะทำให้เกิดขึ้นไอออน -



รูป 9.4 ซอตก์แมเรีย ภาพซ้ายแสดงแผนภูมิพลังงานก่อนสัมผัสกัน

โคเนอร์ขึ้นในสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณรอยต่อซึ่งเป็นชั้นของประจุบวก คือเกิดบริเวณอับพาหะนำประจุ "W" ขึ้นนั่นเอง แผนภูมิระดับพลังงานเป็นไปดังรูป 9.4 พลังงานของอิเล็กตรอนทางค่านสารกึ่งตัวนำลดลง (ดูเรื่องพี-เอ็นจังก์ชัน) ศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัส V_0 จะมีค่าดังนี้

$$V_0 = V_m - V_s \dots\dots\dots (9-2)$$

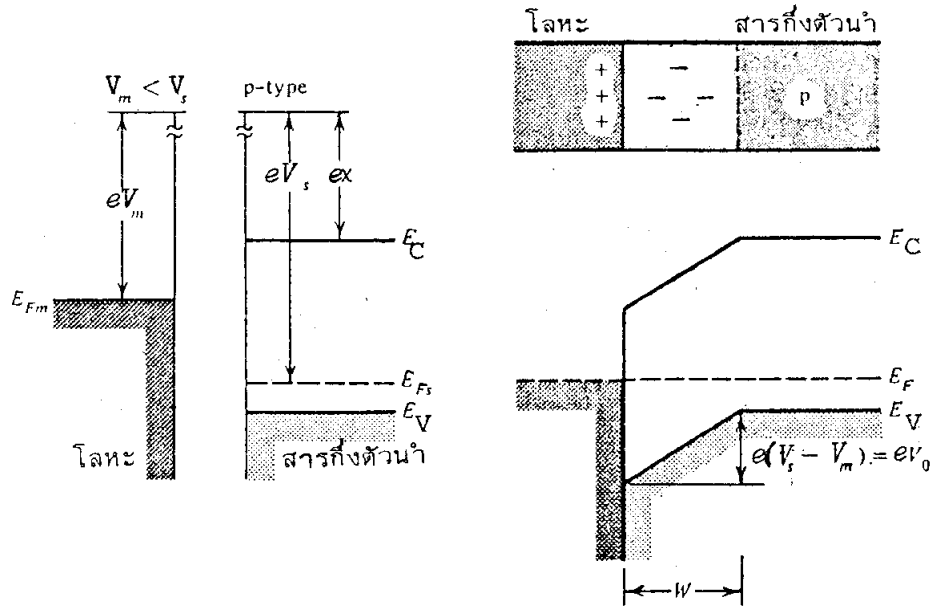
ซึ่งจะเป็นตัวต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อไปยังโลหะ

ให้ $e\chi$ คือพลังงานวัดจากระดับสุญญากาศถึงขอบล่างของแถบความนำ เรียกค่าพลังงานนี้ว่า "electron affinity" ดังนั้นกำแพงศักย์ที่กั้นการแพร่ของอิเล็กตรอนจากโลหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ eV_B จะมีค่าดังนี้

$$eV_B = e(V_m - \chi) \dots\dots\dots (9-3)$$

สำหรับค่า V_o จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ จากการไบอัส

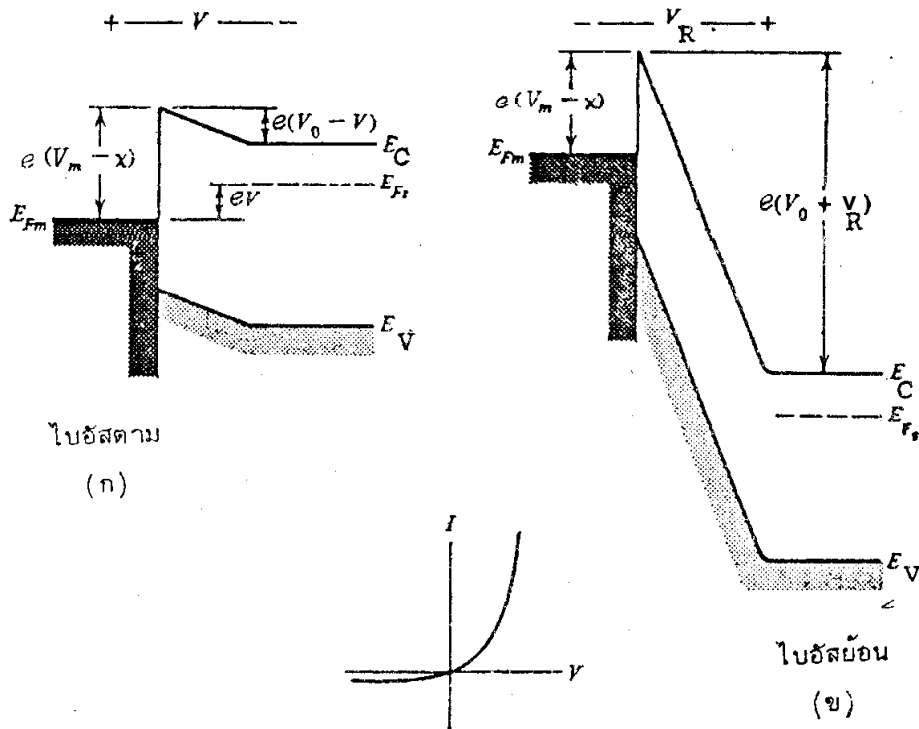
ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี ขอดคทีแบ เรียจะเกิดจากการสัมผัสของโลหะที่มี $V_m < V_s$ ซึ่งจะเกิดขึ้นของประจุลบคือไอออนแอคเซพเตอร์ในด้านพี ดังรูป 9.5 กำแพงศักย์ V_o กั้นการแพร่ของโฮลจากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะมีค่าเท่ากับ $V_s - V_m$



รูป 9.5 ขอดคทีแบ เรียของ โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดพี

สำหรับกรณีของผิวสัมผัส โลหะ-สารกึ่งตัวนำอีก 2 แบบ คือ แบบที่ $V_m < V_s$ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ $V_m > V_s$ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเป็นผิวสัมผัส โอห์มมิก ซึ่งจะได้อกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

การไบอัสรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบขอดคทีแบ เรีย จะมีลักษณะการเรคตีฟาย ท่านั้นเองเดียวกับ จิ้งจกซ์ชันโคโอค รูป 9.6 แสดงผลของการไบอัสตามและไบอัสย้อน ของรอยต่อดังกล่าว



รูป 9.6 การไบอัสตาม (ซ้าย) และไบอัสย้อน (ขวา) และคุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

เมื่อให้ไบอัสตามกับขอตกัแม เรียด้วยศักย์ไฟฟ้า V จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสลดลง เป็น $V_0 - V$ ทำให้อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำแพร่ข้ามรอยต่อ เข้าไปยังโลหะได้สะดวกขึ้น ทำให้เกิดกระแสข้ามรอยต่อได้มาก ในการไบอัสย้อนจะให้ผลตรงข้าม ขนาดของศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสเพิ่ม เป็น $V_0 + V$ ทำให้อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำแพร่ไปยังโลหะได้น้อยมาก ในทั้งสองกรณีการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะ เข้ามาสู่สารกึ่งตัวนำจะถูกต้านด้วยศักย์ไฟฟ้า V_B ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า มีรูปฟอร์มคล้ายของจังก์ชันไดโอด คือ

$$I = I_0 \left(e^{eV/k_B T} - 1 \right) \quad \dots \dots \dots (9-4)$$

โดยที่ I_0 จะขึ้นกับกำลังศักย์ที่กั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น

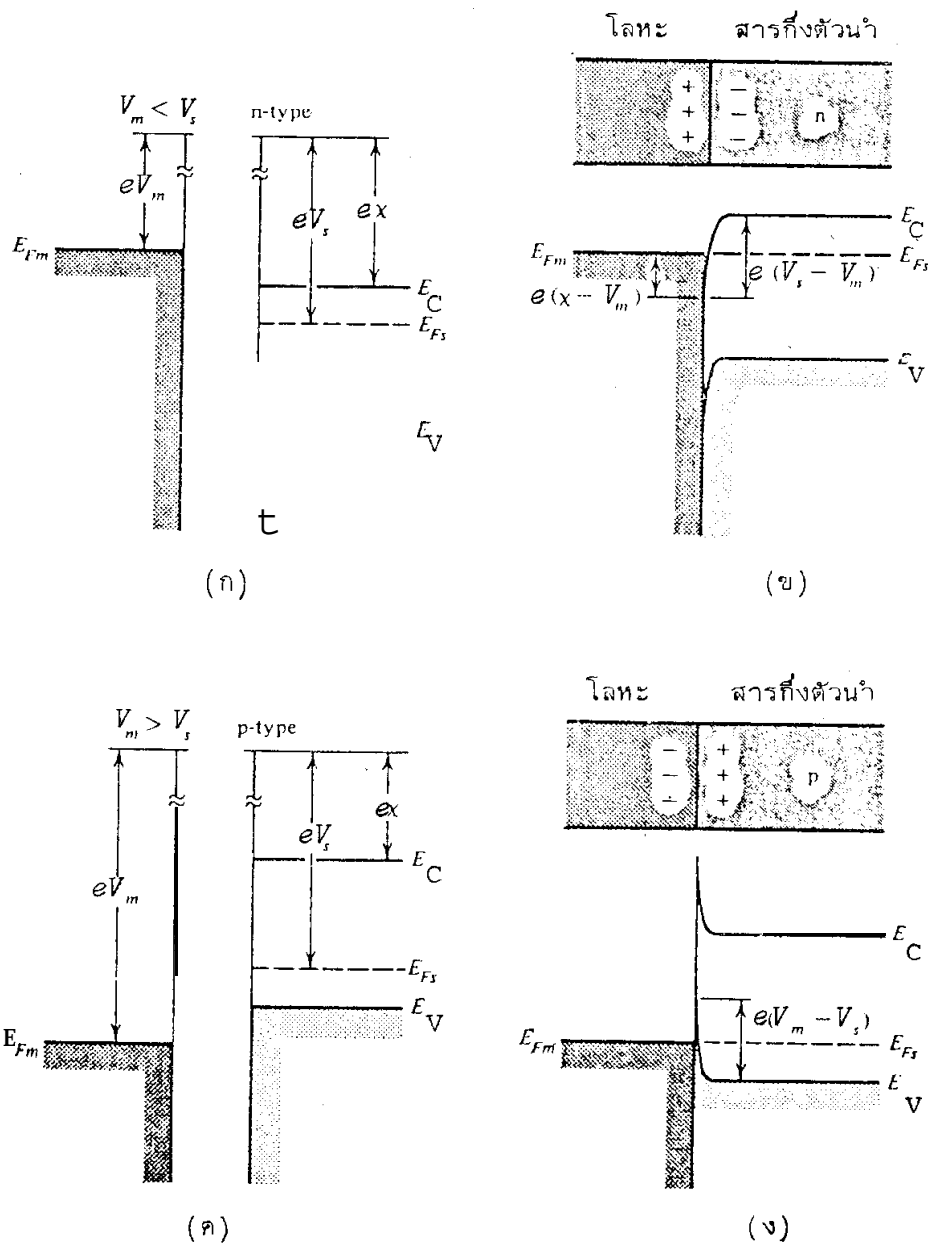
$$I_0 \propto \exp \left(- eV_B/k_B T \right) \quad \dots \dots \dots (9-5)$$

สมการทั้งสองยังคงใช้ได้กับการสื่อสารกึ่งตัวนำแบบพี โดยในการไบอัสตามจะต่อขั้วบวกเข้ากับด้านสารกึ่งตัวนำ พาราเมเตอร์บางตัวในสมการทั้งสองจะต้องดัดแปลงให้เหมาะสมด้วย

การประยุกต์ของดีแมเรีย เป็นเช่นเดียวกับการประยุกต์ของพี-เอ็นจังก์ชัน

9.3 พิวส์สัมผัสโฮมมิก

การต่อสายโลหะเข้ากับอนุกรมสารกึ่งตัวนำเพื่อนำมาใช้งาน จำเป็นต้องให้พิวส์สัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นพิวส์สัมผัสโฮมมิก คือมีคุณสมบัติกระแส-แรงดัน เป็นเส้นตรงในทั้ง 2 กรณีของการไบอัส พิวส์สัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำจะเป็นพิวส์สัมผัสโฮมมิก เมื่อประจุที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น เพื่อให้ระดับเฟอร์มิเท่ากัน เป็นประจุของพาหะข้างมาก เช่นกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มี $V_s > V_m$ ซึ่งเมื่อเกิดการสัมผัสแล้วสภาวะสมดุลจะเกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนจากโลหะเข้าไปสู่สารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำสูงขึ้น กำลังศักย์ที่เกิดขึ้นจะต่ำ การไหลของพาหะนำประจุข้ามรอยต่อเกิดขึ้นได้ง่ายทั้ง 2 ทิศทาง พิวส์สัมผัสจะไม่มีการยับยั้งพาหะนำประจุ รูป 9.7 แสดงพิวส์สัมผัสโฮมมิกของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็น ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี $V_s < V_m$



ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบโอห์มมิก (ก) $V_m < V_s$ ในกรณีของสารเอ็น และ (ข) แผนภูมิพลังงานของหัวต่อที่สภาวะสมดุล (ค) $V_m > V_s$ ในกรณีของสารพี และ (ง) หัวต่อที่สภาวะสมดุล

รูป 9.7 ผิวสัมผัสโอห์มมิก