

บทที่ 3

สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

วัสดุประลึ้งค์

1. เพื่อศึกษาถึงการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำทึ้งชนิดอนติโนนซิกและ เอกซ์ทันซิก โดยอาศัยกฎของ ไอท์ เป็นหลักในการหาค่าสภาพนำไฟฟ้า
2. ให้สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาราบีประจุ ศืออิเลคตรอนในแต่ละชั้นนำ และใช้ในแบบว่า เสน่ห์ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ได้ เป็นจากความหนาแน่นของพาราบีประจุ เป็นตัวแปรที่สำคัญมากที่สุดนี้ ของสภาพนำไฟฟ้า
3. เพื่อให้ทราบถึงเรื่องราวของการโดยและการโดยปัชค เชย ซึ่งเป็นรากฐานที่สำคัญของ การทำให้สารกึ่งตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าและชนิดของพาราบีประจุ เป็นไปตามต้องการ
4. ให้สามารถคำนวณหาระดับเฟอร์มิ ซึ่ง เป็นระดับผังงานที่สำคัญมากในสารกึ่งตัวนำ
5. เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและความคล่องตัวของพาราบีประจุ รวมทั้งรากฐานที่สำคัญของกระบวนการกว้างของช่องว่างผังงาน
6. เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนการแทรปและการรวมตัวกันใหม่ของอิเลคตรอนกับไซด์ชิ้น มีผลต่อความหนาแน่นของพาราบีประจุ และช่วงมีวิด
7. เพื่อศึกษาถึงกระบวนการแทรปของพาราบีประจุในสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นกุญแจ ที่นฐานของการอธิบาย หลักคำนวณค่ากราฟและต่างๆ ในสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นของพาราบีประจุไม่สม่ำเสมอ (ได้แก่ หัวกังหันคั่งคั่งฯ เช่น ศ-เอ็น ซิงค์ชัน)

บทนำ

จากกฎของโอล์ม เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นของกระแสได้ว่า

$$\vec{J} = \sigma \vec{v}$$

เมื่อ σ เป็นส่วน率ไฟฟ้าของของแข็งนั้นๆ และ v คือความเร็วอะตอมในอิเลคตรอนในแกบความหนาแน่นที่อิเลคตรอนมีอยู่ในแกบ

$$\sigma = \frac{n e^2}{m} \tau$$

เมื่อ τ เป็นช่วงชีวิตของอิเลคตรอน (life time - mean collision time) n เป็นความหนาแน่นและ m เป็นมวลของอิเลคตรอน ในกรณีของสารกึ่งตัวนำสมการเหล่านี้ยังคงใช้ได้ เพราะอิเลคตรอนในแกบความนำมีอยู่บริเวณตอนล่าง และไฮโลในแกบฯ เน้นชื้ออยู่บริเวณตอนบนของแกบ พลังงาน ซึ่งพฤติกรรมของมันเป็นเช่นเดียวกับอิเลคตรอนในโลหะ โดยใช้มวลเป็นมวลยังคง (ดูบทที่ 2) และเนื่องจากมีพารามิเตอร์ τ ชนิด คืออิเลคตรอนและไฮโลตั้งนั้น

$$\sigma_{\text{สารกึ่งตัวนำ}} = \sigma_{\text{อิเลคตรอน}} + \sigma_{\text{ไฮโล}}$$

$$= \frac{n e^2 \tau_e}{m_e} + \frac{p e^2 \tau_h}{m_h}$$

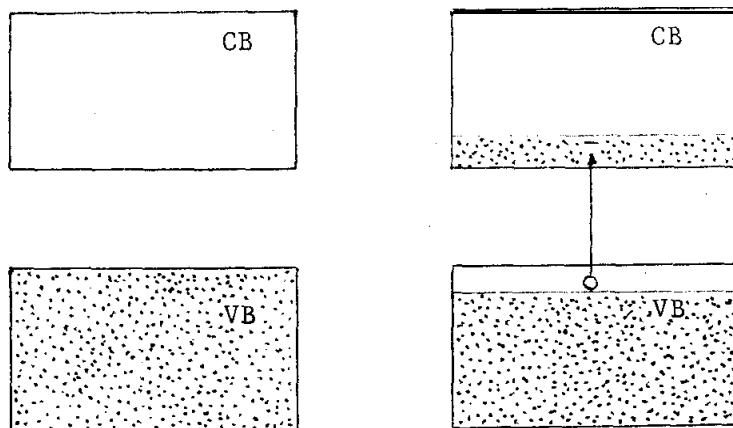
เมื่อ n และ p เป็นความหนาแน่นของอิเลคตรอนในแกบความนำและไฮโลในแกบฯ เน้นๆ ตามลำดับ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสิ่งสำคัญยิ่งสิ่งหนึ่งในการคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ
ก็คือ ค่า n และ p

3.1 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

3.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

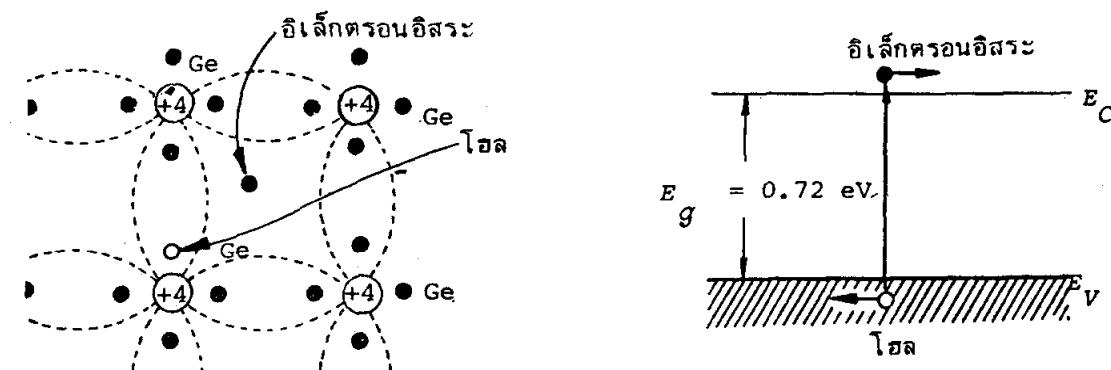
สารกึ่งตัวนำอินทรินซิกหรือสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก (Intrinsic semiconductors) คือสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีอะตอมอื่นๆ มาเจือปน รูป 3.1 แสดงแบบพลังงานของสารตั้งกล่าวที่อุณหภูมิ 0°K และที่อุณหภูมิ $T > 0^{\circ}\text{K}$ ให้



รูป 3.1 แบบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ 0°K และที่ $T > 0^{\circ}\text{K}$

ที่อุณหภูมิ 0°K สารกึ่งตัวนำจะไม่นำไฟฟ้า เนื่องจากในแบบความนำว่างเปล่าและใน
แบบว่างแบบพลังงานนี้เป็นไปยังคงล่างของแบบความนำ อะล็อกตรอนในแบบความนำจะทำให้สารกึ่ง
ตัวนำนำไฟฟ้าได้ ขณะเดียวกันการเคลื่อนที่ของโซลในแบบว่างแบบว่า เลนซ์เมื่อยืนนามไฟฟ้าก็จะเป็นส่วน

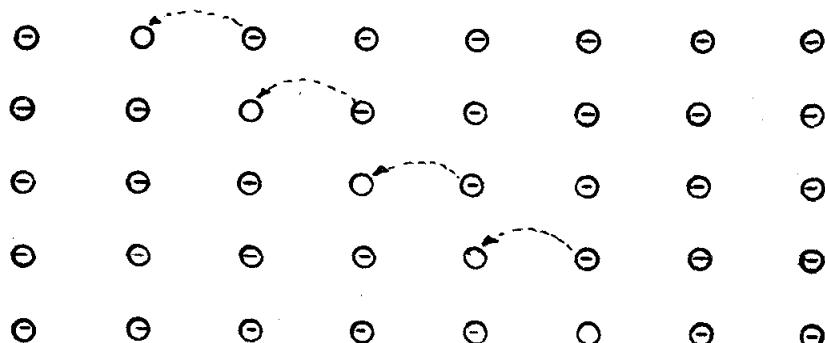
หนึ่งของการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำด้วย การเกิดอิเล็กตรอนและไซด์เราเรียกว่า "ขบวนการเกิดพาหะ (generation)" เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้ไปรวมตัวกันโดย ทั้งอิเล็กตรอนและไซด์



รูป ๓.๒ อิเล็กตรอนที่โลกออกไปจะทำให้เกิดสถานะว่าง เรียกว่าไซด์

ถ้ามีอะตอมใน เราเรียกขบวนการนี้ว่า "การรวมตัวกันใหม่ (recombination)" ที่ภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ $T > 0^{\circ}\text{K}$ โดย ขบวนการเกิดพาหะและการรวมตัวกันใหม่จะเกิดขึ้นตลอดเวลา โดย จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในขณะนี้และไซด์ในขณะเดียวกันที่ค่าเท่ากัน

รูป ๓.๓ แสดงการเกลื่อนที่ของไซด์ ช่องช่องๆ และก็ต้องการ เกลื่อนที่ของอิเล็กตรอน นำรวมตัวกันโดยผลลัพธ์เกิดไซด์ใหม่ ในสถานะที่อิเล็กตรอนตัวนี้จากมา นั่นเอง



รูป ๓.๓ การเกลื่อนที่ของไซด์

3.1.2 ความหนาแน่นของอิเลคตรอนและไฮล์

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก เป็นจากการเกิดอิเลคตรอนและไฮล์เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน เมื่ออิเลคตรอนตัวหนึ่งโอลชีนไปยังแผลความนำก็จะเกิดไฮล์ตัวหนึ่งในแผลว่า เลนซ์ด้วย ดังนั้นถ้ามีอิเลคตรอนอยู่ในแผลความนำเท่าไก่จะมีไฮล์อยู่เท่ากันในแผลว่า เลนซ์ นั่นคือความหนาแน่นของอิเลคตรอนและไฮล์มีค่าเท่ากัน

$$n = p = n_i \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

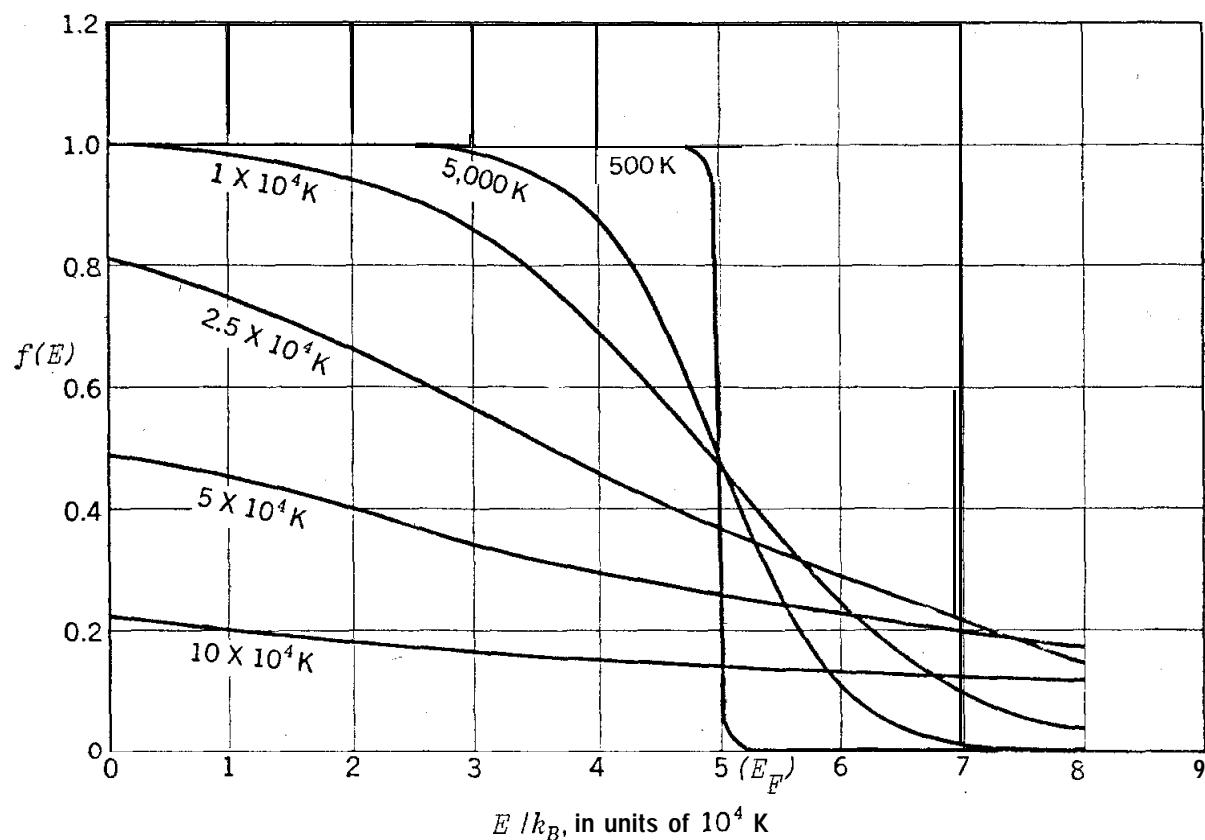
เมื่อ
 n คือ ความหนาแน่นของอิเลคตรอนในแผลความนำ
 p คือ ความหนาแน่นของไฮล์ในแผลว่า \perp au
 n_i คือ ความหนาแน่นของพาหะนำประจุอินทรินซิก (intrinsic concentration)

การคำนวณหาค่า n และ p สามารถหาได้จากพัธศั不住การกระจายของเฟอร์นิ-ดิแรค

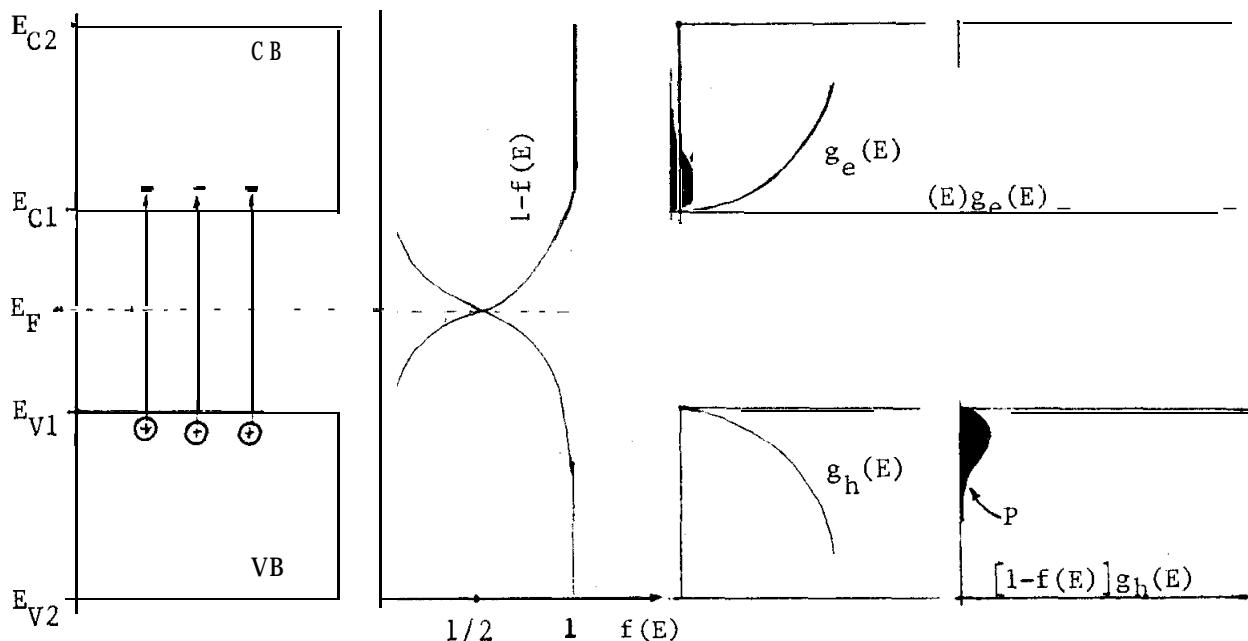
$$f(E) = (e^{(E-E_F)/k_B T} + 1)^{-1} \quad \dots \dots \dots (3-2)$$

$f(E)$ คือค่าความนำจะเป็นที่จะพบอิเลคตรอนที่ระดับพลังงาน E เมื่อระบบสมดุลที่อุณหภูมิ T ได้

รูป 3.4 เป็นการplot $f(E)$ เทียบกับ E ซึ่งจะสังเกตได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่วนทางของพังค์ชัน (tail region) จะยืดออกไป นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จำนวนอิเลคตรอนที่ระดับพลังงาน ($E > E_F$) จะเพิ่มขึ้น นอกจ้านี้จะเห็นว่าที่อุณหภูมิใดๆ $f(E_F)$ จะมีค่า $\frac{1}{2}$ นั่นคือที่ระดับเฟอร์นิ ความนำจะเป็นที่จะพบอิเลคตรอนจะมีค่า $\frac{1}{2}$ เช่น (ยกเว้นที่อุณหภูมิสูงมาก ซึ่งของนั้นจะลดลงเหลือไปก่อน)



รูป 3.4 ผังค์ชั้นการกระจายของเฟอร์มิ-ดิแรค



รูป 3.5 อิเลคตรอนและไฮล์ในແຄນພລັງງານ ຮວມທັງ $f(E)$, $g(E)$ ແລະ $f(E)g(E)$ ທີ່ຮະດັບພລັງງານຕ່າງໆ ຂອງລາຍກິ່ງສ້ານດຳອິນທຣິນຊີກ

ຮູບ 3.5 ແສດງຄື່ງໄວກາສທີ່ຈະພບອີເລັກຕຽນແລະ ໄໂສລ ຄວາມທາແນ່ນຂອງສການະ ແລະ ພລຸງຜົນຂອງຄໍາທັງສອງ ໃນກາພໄດ້ເຫັນພົງຄັນການກະຈາຍຜິດຈາກຄວາມເປັນຈິງໄປນັ້ງ ເພື່ອໃຫ້ສັງເກດໄດ້ຈ່າຍ (ທີ່ອຸປະກິດທົ່ວ່າ $f(E)$ ຈະມີຮູບຮ່າງເກືອບເໜືອນ ທີ່ອຸປະກິດ 0°K ສຶອຄລ້າຍ step function)

ເຮົາສາມາຄຄຳນວຍຫາຄວາມທາແນ່ນຂອງອີເລັກຕຽນໃນແຄນຄວາມນໍາໄດ້ດັ່ງຕ່ອນນີ້ ອີ
ໃຫ້ $g_e(E)$ ເປັນຄວາມທາແນ່ນຂອງສການະຂອງອີເລັກຕຽນ ດັ່ງນັ້ນຈຳນວນສການະຂອງອີເລັກຕຽນຕ່ອ
1 ມີຫຼາຍປະມາດຕະ ຈາກຮະດັບພລັງງານ E ອື່ງ $E + dE$ ໄດ້ ຈະມີຄໍາ $g_e(E)dE$ ແລະ ເນື່ອງຈາກແຕ່
ລະສການະມີຄວາມນໍາຈະເປັນທີ່ອີເລັກຕຽນຈະເບົ້າໄປຄຣອນຄຣອງເທົ່າກັນ $f(E)$ ດັ່ງນັ້ນຈຳນວນອີເລັກຕຽນ
ຕ່ອ 1 ມີຫຼາຍປະມາດຕະໃນຂ່າງພລັງງານ E ອື່ງ $E + dE$ ໄດ້ ຈຶ່ງມີຄໍາ

$$f(E)g_e(E)dE$$

และความหนาแน่นของอิเลคตรอนในແບນຄວາມນໍາ ໄກດ້ຈາກກາຮັງການທີ່ເກຣຕະລອດຫົວໜ້າແບນຄວາມນໍາ
ຕືອ

$$n = \frac{\int_{E_{C1}}^{E_{C2}} f(E) g_e(E) dE}{I} \dots \dots \dots (3-3)$$

ເນື້ອ E_{C1} ແລະ E_{C2} ສໍາວະດັບພລັງງານທີ່ຈຸດຕ່າສຸດ ແລະ ສູງສຸດຂອງແບນຄວາມນໍາ

ເພື່ອຄວາມສະຫວັກໃນກາຣຄໍານວັນເຮົາຈະໄຫ້ຮະດັບພລັງງານ $E = 0$ ອູ້ທີ່ຄອນນັ້ນສຸດຂອງແບນ
ຄວາມນໍາ ແລະ ໄດ້ຂ່ອງວ່າງແບນພລັງງານມີຄ່າ E_g ຕັ້ງນັ້ນ $E_{C1} = E_g$

ມີຈາຣຳພາຄ່າ $(E - E_F)$ ກັບ $k_B T$ ໃນສົມກາຣ (3-2) ເນື້ອຈາກຫົວໜ້າພລັງງານທີ່ເຮົາ
ສົນໃຈຈະອູ້ໃນແບນຄວາມນໍາ ນັ້ນຄູ່ $E \geq E_g$ ສ່ວນ E_F ອູ້ກ່າງໆ ຂອງຂ່ອງວ່າງແບນພລັງງານ (ຈະ
ມີສູງນໍາກາຍພລັງ) ຄ່າ E_g ໄດ້ພ້ວໄປມີຄ່າປະນາມ 1 eV ຕັ້ງນັ້ນ $(E - E_F)$ ຈຶ່ງມີຄ່າປະນາມ $\geq E_g/2$
 $(\frac{E_g}{2} \approx 0.5 \text{ eV})$ ສ່ວນຄ່າ $k_B T$ ທີ່ອຸດຫຼາຍມີຫຼອງມີຄ່າປະນາມ 0.02 eV ຕັ້ງນັ້ນ $[(E - E_F)/k_B T] \gg 1$

ຈາກເຫຼຸມລັດກໍລ້າວໜ້າທີ່ ເຮົາຈະປະນາມໄທ

$$e^{(E - E_F)/k_B T} + 1 = e^{(E - E_F)/k_B T}$$

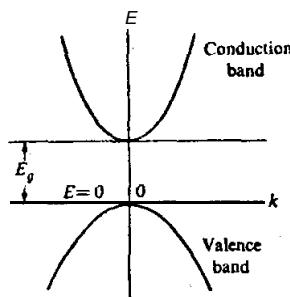
ທີ່ອັກສົນກາຣຈະຈາຍຂອງ ເພອරັນ-ດິນາຣ ຈະເປັນ

$$f(E) = e^{E_F/k_B T} \cdot e^{-E/k_B T} \dots \dots \dots (3-4)$$

ຫົງກໍສໍາກາຣຈະຈາຍໃນລັກຜະແນກໜີ້ເວລ-ໄໂນລທໍ່ມານ ນັ້ນເອງ

สำหรับความทناณน์ของสถานะ ของอิเลคตรอนนั้น เป็นจากที่อุณหภูมิตามปกติในการใช้งานของสารกึ่งดีบันดา อิเลคตรอนจะไอลซีนไปอยู่ตอนล่างๆของแบบความน่าและไฮล์ฟ์จะเกิดขึ้นที่ตอนบนๆ ของแบบวาราเดน์เท่านั้น ซึ่งในเรื่องสังกัดวาระงานจะเป็นรูปพาราใบลา ในเคน-สเบช ศิริอิเลคตรอนและไฮล์ฟ์ก็จะอยู่ในภาคอิสระโดยมีมวลเป็นมวลยังผล ดังนั้น เราจะใช้สมการความทนาณน์ของสถานะของอิเลคตรอนตามฟอร์มน้ำครฐานของอนุภาคอิสระ ศิริ

$$g(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad \dots \dots \dots (3-5)$$



รูป 3.6 พลังงานของอิเลคตรอนและไฮล์ฟ์ในแบบความน่าและแบบวาราเดน์

และเนื่องจากในแบบความน่า จุดศูนย์สูงของรูปพาราใบลาของพลังงานอยู่ที่ E_g (รูป 3.6) แทนที่จะอยู่ที่ 0 ตามรูปมาตรฐาน ดังนั้น

$$g_e(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^* e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots \quad (3-6)$$

ค่า $g_e(E)$ ได้ผลตัวดังนี้ (3.5)

แทนค่า $f(E)$ จากสมการ (3-4) และ $g_e(E)$ จากสมการ (3-6) ลงในสมการ (3-3) จะได้

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^* e}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{E_F/k_B T} \int_{E_g}^{\infty} (E - E_g)^{\frac{1}{2}} e^{-E/k_B T} dE \quad \dots \dots \dots \quad (3-7)$$

ในสมการ (3-7) E_{C1} เป็น E_g เนื่องจากการเลือกระดับ $E = 0$ ตั้งที่กล่าวไปแล้ว และ E_{C2} เป็น ∞ เพราะว่า $f(E) g_e(E)$ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วสูงยิ่งเมื่อ E มีค่ามากกว่า E_g เวลาเดียวกันความกว้างของแคนความนำก็มีค่ามากกว่า $k_B T$ มาก นั่นคืออิเลคตรอนเกือบทั้งหมดจะอยู่ที่ตอนล่างของแคนความนำ ดังนั้น เมื่อเราขึ้นมาต่อไปถึง ∞ จึงได้ผลลัพท์ที่ไม่ต่างกันนักกับการอินติเกรตถึง E_{C2}

$$\text{เขียน } (E - E_g) / k_B T = x$$

$$\text{หรือ } (E - E_g)^{\frac{1}{2}} = (k_B T x)^{\frac{1}{2}}$$

$$dE = k_B T dx$$

$$E = k_B T x + E_g$$

และที่ $E = E_g \quad x = 0$ ตั้งนั้นจุดค่าว่าสูดของการอินติเกรตจึงเปลี่ยนไปเป็น 0

แทนค่าลงในสมการ (3-7)

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^* k_B T}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{(E_F - E_g)/k_B T} \int_0^\infty x^{1/2} e^{-x} dx$$

จาก $\int_0^\infty x^{1/2} e^{-x} dx = \Gamma(\frac{3}{2}) = \frac{\pi^{1/2}}{2}$

$$n = 2 \left(\frac{m^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{E_F/k_B T} e^{-E_g/k_B T} \dots \dots \dots (3-8)$$

ค่าความหนาแน่นของอิเลคตรอนนี้ยังคงไม่ทราบ เพราะค่า E_F ยังไม่สามารถหาได้
เราจะหาค่า E_F ได้เมื่อได้ทำการคำนวณค่าความหนาแน่นของไฮลัล์ว

* แกมมาฟังค์ชัน

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty x^{n-1} e^{-x} dx$$

$$\Gamma(n+1) = n \Gamma(n)$$

$$\Gamma(\frac{1}{2}) = \pi^{1/2}$$

ความหนาแน่นของไฮล์บินเดอร์ท่าได้ด้วยวิธีการคล้ายๆ กับของอิเลคตรอน
ความน่าจะเป็นที่จะพบไฮล์บินเดอร์ที่ระดับพลังงาน E ได้ $[f_h(E)]$ จะมีค่าเท่ากับ $1 - f(E)$
 เพราะว่า $f(E)$ คือความน่าจะเป็นที่อิเลคตรอนจะเข้าครอบครองสถานะ E ได้ ดังนั้น
 ที่เหลือจึงเป็นของไฮล์บินเดอร์ (ดูรูป 3.5) นั่นคือ

$$f_h(E) = 1 - f(E) \quad \dots \dots \dots (3-9)$$

$$\begin{aligned} &= 1 - \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1} \\ &= \frac{1}{e^{(E_F-E)/k_B T} + 1} \end{aligned}$$

เนื่องจาก E ของไฮล์บินเดอร์เป็นลบและศูนย์ (ดูรูป 3.6) $(E_F - E)$ จึงมีค่าประมาณ $E_g/2$
 (≈ 0.5 eV) หรือมากกว่า ดังนั้น $(E_F - E)/k_B T \gg 1$ และ $f_h(E)$ จะมีค่าประมาณ
 ดังนี้

$$f_h(E) = e^{-E_F/k_B T} e^{E/k_B T} \quad \dots \dots \dots (3-10)$$

สำหรับความหนาแน่นของสถานะของไฮล์บินเดอร์จะได้

$$g_h(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_h^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (-E)^{1/2} \quad \dots \dots \dots (3-11)$$

ซึ่งใช้ฟอร์มเดียวกับอิเลคตรอนอิสระ เพียงแต่พาราโบลาของพลังงานจะนี้กว่าลง สำหรับเทอม $-E$ นั้นเป็นค่าบวก เนื่องจากเราให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ที่ตอนบนสุดของแกนว่า เลนซ์และพลังงานมีค่าลบ เมื่อออยู่ด้านล่างไป

ความหนาแน่นของไฮโลจิงเขียนได้ดังนี้

$$P = \int_{-\infty}^0 f_h(E) g_h(E) dE$$

โดยที่การอินติเกรตจาก $-\infty$ มีผลเช่นเดียวกันกับในสมการ (3-7)

$$P = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_h^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_F/k_B T} \int_{-\infty}^0 e^{E/k_B T} (-E)^{\frac{1}{2}} dE$$

เมื่อ x แทน $-E/k_B T$ จะได้

$$P = 2 \left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_F/k_B T} \dots \dots \dots (3-12)$$

จากสมการ (3-1) $n = p$ แทนค่าจะได้

$$e^{E_F/k_B T} = \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right)^{3/4} e^{E_g/2k_B T}$$

$$\text{หรือ } E_F = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} k_B T \log \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right) \dots \dots \dots (3-13)$$

เนื่องจาก $E_g >> k_B T$ และ $\log \frac{m_h^*}{m_e^*}$ มีค่าน้อย เทอมหลังจึงมีค่าน้อยมาก เมื่อ
เทียบกับ เทอมแรก ดังนั้นระดับเฟอร์เมจิจึงอยู่กลางๆ ของช่องว่างแอบพลังงาน และถ้า $m_h^* = m_e^*$
ระดับเฟอร์เมจจะอยู่ตรงกลางช่องว่างแอบพลังงานพอดี

แทนค่า $e^{E_F/k_B T}$ ลงในสมการ (3-8) จะได้ค่าความหนาแน่นของอิเลคตรอน

$$n = 2 \left(\frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-E_g / 2k_B T} \quad \dots \dots \dots (3-14)$$

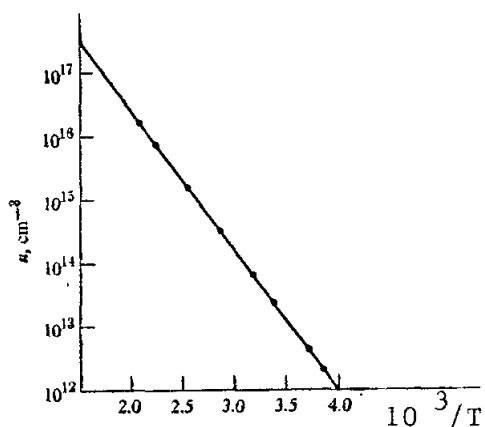
สมการ (3-14) จะเป็นความหนาแน่นของไฮล์ไนแอบวาเลนซ์ด้วย ความหนาแน่น
ของอิเลคตรอนและไฮล์ อาจหาได้อิกวิธีหนึ่งที่สะดวกกว่า ศึกษาระบบทั่วไป (3-8) คุณกับสมการ
(3-12)

$$n_p = n = p^2$$

จากสมการ (3-14) จะเห็นว่า n และ p มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอกซ์ปอยเนนเชียลกับอุณหภูมิ

รูป 3.7 เป็นการplot $\log n$ กับ $10^3/T$ ได้กราฟเส้นตรงมีความชัน $-E_g/2k_B$
(เทอม $T^{3/2}$ มีอทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเทอม เอกซ์ปอยเนนเชียลมาก จนไม่ต้องคำนึง
พิจารณาได้ในเรื่องนี้)

เราพอจะหาค่าโดยประมาณของ n ได้โดยแทนค่า $E_g = 1\text{eV}$ $m_e^* = m_h^* = m_e$ และ
 $T = 300^\circ\text{K}$ จะได้ $n \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งเป็นค่าที่พบโดยทั่วๆ ไปของสารกึ่งตัวนำ



รูป 3.7 การแปรผันของ n กับ $(T)^{-1}$

ข้อนำสังเกตคือค่า np จากสมการ (3-8) และ (3-12)

$$np = 4 \left[\frac{(m_h^* m_e^*)^{1/2} k_B T}{2\pi \hbar^2} \right]^3 e^{-E_g/k_B T}$$

จะเห็นว่าเป็นค่าที่ขึ้นกับ มวลยังผลและอุณหภูมิเท่านั้น ไม่ขึ้นกับระดับเพอร์เซ็ต (คือไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของอะตอม เจือปนน้ำเอง) ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งและที่อุณหภูมิหนึ่ง ผลคูณของความหนาแน่นของอิเลคตรอนกับความหนาแน่นของไฮโลจะมีค่าคงที่เสมอ ไม่ว่าสารกึ่งตัวนำนั้นจะ เป็นอินทรินซิก (บริสุทธิ์) หรือไม่ก็ตาม กฎหมายเรียกว่า " Mass Action Law " คือ

$$np = n_1^2 \dots \dots \dots \quad (3-15)$$

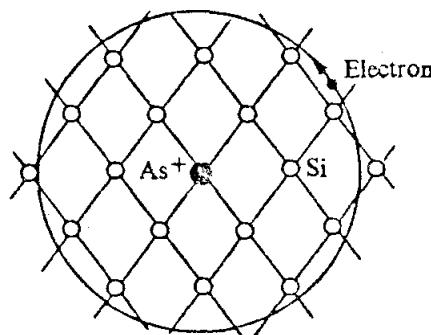
เมื่อ n และ p เป็นความหนาแน่นของอิเลคตรอนและโพลของสารกึ่งตัวนำอินทรินซิกหรือสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการเจือปน (dope) แล้วก็ได้ และ n_p เป็นความหนาแน่นอินทรินซิกของสารกึ่งตัวนำนั้น ที่อุณหภูมิเดียวกัน (ดูสมการ 3-1)

3.2 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำเอกซ์ทรินซิก

สารกึ่งตัวนำอินทรินซิกดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1 นั้น ยังมีสภาพนำไฟฟ้าค่อนข้างเมื่อย เทียบกับโลหะ ค่าสกัดนำไฟฟ้าของสารพวกรู้จักกันนี้จะเปลี่ยนไปเมื่อมีอิทธิพลจากภายนอก เช่นความร้อน หรือแสงมากจะทำเท่านั้น และค่าที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ก็มีค่าน้อย ดังนั้นสารพวกรู้จักกันนี้ จึงนำไปประดิษฐ์เป็นสิ่งประดิษฐ์ค่างๆ ได้น้อยมาก การที่จะนำสารกึ่งตัวนำไปใช้ประโยชน์ในเทคโนโลยีได้นั้น จะต้องมีวิธีการควบคุมสภาพนำไฟฟ้าให้ได้มากและสะดวกมากกว่ามี แต่ต้องกำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องการ เช่นความต้องการต้องการอีกด้วย เราสามารถควบคุมเรื่องเหล่านี้ได้โดยการเติมสารเจือ (impurity) ลงไปในสารกึ่งตัวนำริสุทธิ์ สารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยสารเจือไปแล้วเรารู้ว่าสาร กึ่งตัวนำเอกซ์ทรินซิก (Extrinsic semiconductor) ธาตุที่เป็นสารเจือที่สำคัญคือธาตุในกลุ่มนี้ III และ V ของตารางธาตุ การควบคุมและการเติมสารเจือ เรียกว่า "การโดป (doping)" ปริมาณของสารเจือที่เติมลงไปในสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนน้อย แต่มีผลทำให้สภาพนำไฟฟ้าของสาร กึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปมาก สารกึ่งตัวนำเอกซ์ทรินซิกมี 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็น (n-type) และ ชนิดพี (p-type)

3.2.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n - type , negative type) เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกโดปด้วยธาตุในกลุ่มนี้ V เช่น ซิลิคอน (Si) โดยด้วยอาร์เซนิค (As) อะตอม As จะไปแทนที่ Si บางตัวที่ตำแหน่งของ Si ดังในรูป 3.8 การแทนที่นี้จะกระจายไปทั่วผิว



รูป 3.8 อิเลคตรอนตัวที่ห้า โคจรอบโดเนอร์

อิเลคตรอนวงนอก 4 ตัวของ As จะอยู่ในโควาเลนท์บอนด์ ส่วนตัวที่ 5 เนื่องจากเข้าไปอยู่ในบอนด์ไม่ได้ (ไม่มีสถานะว่าง) มันจะโคจรอ卜อะตอน As โดยมีพลังงานยิดเห็นใจน้อยมาก (ศีรษะโคจรอ卜ห่างจากอะตอน As) ในขณะนั้นอะตอน As จะมีประจุบวก e ยึดเห็นใจกับอิเลคตรอนตัวที่ห้าซึ่งมีประจุลบ e จึงมีสภาพคล้ายๆ อะตอนของไฮโตรเจน (แต่ศีรษะวงโคจรอาจกว่ามาก) และเนื่องจากแรงยึดเห็นใจของอิเลคตรอนตัวที่ห้ากับ As^+ มีค่าน้อยมาก (แรงยึดเห็นใจที่ว่ามีค่าน้อยมากและรัศมีวงโคจรซึ่งอยู่ห่างจาก As^+ มากนี้จะได้พิสูจน์ต่อไป) ดังนั้นมีอิเลคตรอนพลังงานเพียงเล็กน้อยมันจะไอออกไนซ์เป็นอิสระ คือเข้าไปอยู่ในแอบความนำ เทสือแต่ไอออกบวกของ As จะเห็นว่าอะตอน As พากนี้จะ “ให้” อิเลคตรอนแก่แอบความนำเพิ่มขึ้น จึงเรียกอะตอน As พากนี้ว่า “โดเนอร์ (donors, ผู้ให้)” ตามปกติที่อุณหภูมิห้องโดเนอร์เกือบทุกตัวจะไอออกไนซ์

และเกิดอิเลคตรอนมากขึ้นในแบบความนำโดยไม่มีไฮลเพิ่มขึ้น ดังนั้นสารกึ่งตัวนำประเกทนีจึงมี $\mu >> p$ และเรียกว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเงิน

อิเลคตรอนตัวที่ 5 หรือตัวอื่นๆ ที่ปั้งເວູຍເຄລືອນທີ່ເຂົ້າມາໃນສະນາຂອງ As^+ จะຢູກດຶງອຸດໄວ້ແລະໄຄຈະໄປຮອນ As^+ ຄ້າຍກັບອິເລັດຮອນຂອງອະຄອນໄຊໂໂໂຣເຈນ ເຮົາສາມາດຄົກຄໍານວຍຫາຄ່າພັດງານຍົດເຫັນຍົວໄດ້ໂດຍອາຫັຍໄມ່ເຄລືອນນອ່ວ້າ ບົວແທກຕ່າງກັນກີ່ອຂັ້ນຕຽກຮັງຢູ່ລອນນີ້ (Coulomb interaction) ຮະຫວ່າງ As^+ ແລະອິເລັດຮອນຈະມີຄໍານ້ອຍກວ່າໃນອະຄອນໄຊໂໂຣເຈນ ທັງນີ້ເນື່ອງນາຈາກເກີດກາຮັກນິນ (screen) ຈາກອະຄອນຕ່າງໆ ໃນຜົກສິ່ງຈະມີສັກຜະເປັນຕົວກລາງ (medium) ຂຶ້ງ As^+ ແລະອິເລັດຮອນແຫ່ງໝໍ່ (ຂອງໄຊໂໂຣເຈນຕົວກລາງສຶກສູງຢາກສາ) ດັ່ງນັ້ນພັດງານສັກຍໍຂະນະນີ້ຈະເປັນ

$$V(r) = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r}$$

ເນື້ອ ϵ_r ເປັນ "relative dielectric constant" ຂອງພັກ Al ϵ_r ໂດຍທີ່ວ່າ ໄປຈະມີຄໍາປະນາພັນ 10 (ຂອງ Si ມີຄໍາ 11.7) ສໍາຫັນອະຄອນໄຊໂໂຣເຈນ ເຮົາທຣານແລ້ວວ່າ

$$V(r) = - e^2 / 4\pi r \epsilon_0$$

$$E_n = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{\pi e^2 m_0}{n^2 h^2 \epsilon_0}$$

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi e^2 m_0}$$

$$E_1 = - 13.6 \text{ eV}$$

$$r_1 = 0.53 \text{ \AA}^0$$

โดยที่ E_n คือพลังงานของอิเลคตรอนในวงโคจรที่ n , m_0 เป็นมวลของอิเลคตรอน ในกรณีของ อิเลคตรอนตัวที่ 5 เราจะใช้ผลต่างๆ เช่นเดียวกับอะตอมของไฮโตรเจน โดยแทน ϵ_0 ด้วย $\epsilon_0 \epsilon_r$ และแทน m_0 ด้วย m_e^* . $\frac{m_0}{m_e^*}$ เรานำ ϵ_0 และ m_0 มาไว้ด้วยกันเพื่อที่จะได้นำค่าที่คำนวณ ไว้แล้วจากอะตอมของไฮโตรเจนมาใช้ได้เลย ดังนั้นจะได้ผลลัพธ์สำหรับอิเลคตรอนตัวที่ 5 ของ เราๆ

$$E'_1 = -\frac{e}{8\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{\frac{\pi e^2 m_e^* m_0}{h^2}}{\epsilon_0 \epsilon_r m_0}$$

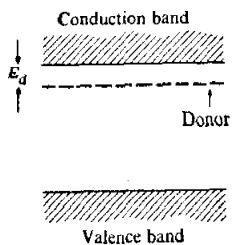
$$= -13.6 \frac{m_e^*}{\epsilon_r m_0}$$

แทนค่า $\epsilon_r = 10$ และ $m_e^* / m_0 = 0.2$ ซึ่งเป็นค่าที่พบโดยทั่วๆ ไป จะได้พลังงานยิดเหนี้ ของอิเลคตรอนตัวที่ 5 เท่ากัน

$$E'_1 = -0.01 \text{ eV}$$

ซึ่งเป็นค่าประมาณ 1/500 เท่าของอะตอมไฮโตรเจน ในรูป 3.9 แสดงถึงระดับพลังงานนี้อยู่ต่ำ จากรดอนล่างของแอนด์ความนำลงมาประมาณ 0.01 eV ซึ่งเราจะเรียกว่าระดับไดโอนอร์ (donor level, E_D) ระดับไดเอนอร์อยู่ต่ำกว่าระดับล่างจากแอนด์ความนำเป็น เพราะ เมื่ออิเลคตรอนตัวที่ห้า เริ่ม

เป็นอิสระนั้น คือเมื่อเริ่มเข้าไปอยู่ในแคนความนำ ดังนั้นที่ $E'_1 = -0.01 \text{ eV}$ จึงอยู่ต่ำกว่า แคนความนำลงมา ซึ่งค่าพลังงานนี้แทนด้วย E_d



รูป 3.9 ระดับໂດเนอร์

เนื่องจากที่อุณหภูมิห้อง $k_B T$ มีค่าประมาณ 0.02 eV ดังนั้นໂດเนอร์เกือบทั้งหมดจะ ~~ถูก~~ ไออ่อนิช แล้วอิเลคตรอนตัวที่ 5 หรือที่เรียกว่า อิเลคตรอนส่วนเกิน (excess electron) จะเป็นอิสระ คือเข้าไปอยู่ในแคนความนำ (จะสังเกตว่าในขบวนการนี้ไม่เกิดไฮล)

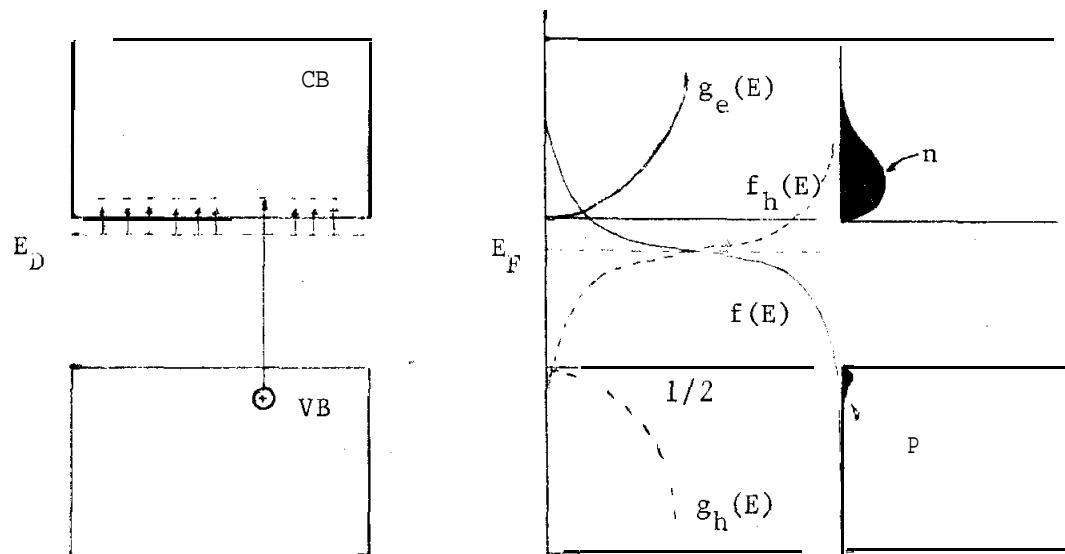
ลองพิจารณาศักดิ์สิ่ง โคจรของอิเลคตรอนตัวที่ 5, r'_1

$$\begin{aligned}
 r'_1 &= \frac{h^2 \epsilon_0 \epsilon_r m_0}{\pi e^2 m_e^* m_0} \\
 &= 0.53 \cdot \frac{\epsilon_r}{r} \frac{m_0}{m_e^*} \\
 &\approx 30 \text{ Å}^\circ
 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าอิเลคตรอนนี้มีวงโคจรที่ผ่านเข้าไป (กินเนือที่) ในอะตอมของผลึกเจ้าบ้าน (host atoms) เป็นจำนวนมาก คืออะตอมของผลึกเจ้าบ้าน (เช่น Si) ทำตัวเสมือนตัวกลางเนื้อเดียว กัน ดังที่เราได้กำหนดไว้ในตอนแรกๆ

การคำนวณหา n ของสารกึ่งตัวนำชนิดเงินโดยตรงสามารถหาได้โดยใช้พัฒน์ชันการกระจายของเฟอร์ริ-ดิแรค และจะมีสมการ เช่นเดียวกับในกรณีการหา n ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนิก สิ่งที่ต่างกันคือ $n >> p$ และ E_F จะเลื่อนขึ้นไปใกล้ๆ ตอนล่างของแกนความนำ ดังรูป

3.10



รูป 3.10 การกระจายของอิเลคตรอนและไฮล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเงิน

จากสมการ (3-8) ความหนาแน่นของอิเลคตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเงินจะมีพื้นที่ เช่นเดียวกัน คือ

$$n = 2 \left(\frac{m^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{E_F/k_B T} e^{-E_g/k_B T} \dots \quad (3-16)$$

โดยที่ E_F เป็นสีน้ำเงิน ไม่ใช้สีฟ้า แต่เป็นสีน้ำเงิน

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนี่เราจะเห็นได้ว่า $n >> P$ เรายังเรียกอิเลคตรอนว่า พาหะน้ำประจุบวก (majority carrier) ส่วนไฮดรอกซิลิคที่มีจำนวนน้อยกว่า เรียกว่า พาหะน้ำประจุลบ (minority carrier) ค่าความหนาแน่นของอิเลคตรอนอาจหาได้โดยประมาณดังนี้คือ เนื่องจาก $n >> p$ ตั้งนั้นอิเลคตรอนที่เกิดจากการโลดแล่นช่องว่างแอบพลังงานชีบมากกว่า กับ จึงมีค่าน้อยกว่าอิเลคตรอนทั้งหมดมากจนไม่ต้องคำนึงถึง และเนื่องจากที่อุณหภูมิห้อง โดยเนอร์ เกือบทุกตัวໄວอ่อนในชั้นนี้ N_D เป็นความหนาแน่นของโดยเนอร์แล้ว

สำหรับ p สามารถหาได้จาก Mass Action Law (สมการ 3-15)

$$n_p = n \uparrow = 4 \left[\frac{\left(\frac{m_h^* m_e^*}{2\pi \hbar^2} e^{\frac{1}{2}} k_B T \right)^3}{e^{-E_g/k_B T}} \right]$$

ເນື່ອງຈາກ

$$n \approx N_D$$

$$P \approx n_i^2 / N_D$$

การหาระดันเพอร์เซ็นต์โดยประมาณในสารกึ่งตัวนำชนิดเงิน หาได้จากสมการ (3-16)

โดยที่ $n = N_D$

$$N_D = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{E_F/k_B T} e^{-E_g/k_B T}$$

$$E_F = E_g - k_B T \log \frac{N_C}{N_D} \quad \dots \dots \dots \quad (3-19)$$

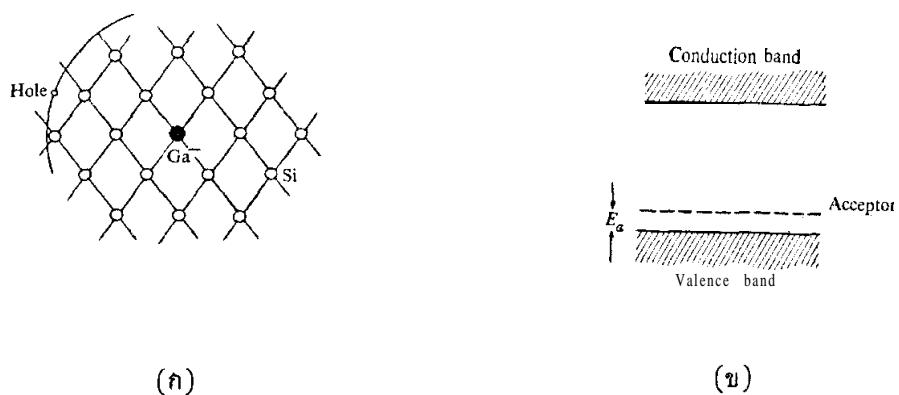
เมื่อ $N_C = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$

(อย่าลืมว่าระดับพลังงาน $= 0$ อยู่ที่ตอนบนสุดของแคมวาเลนซ์)*

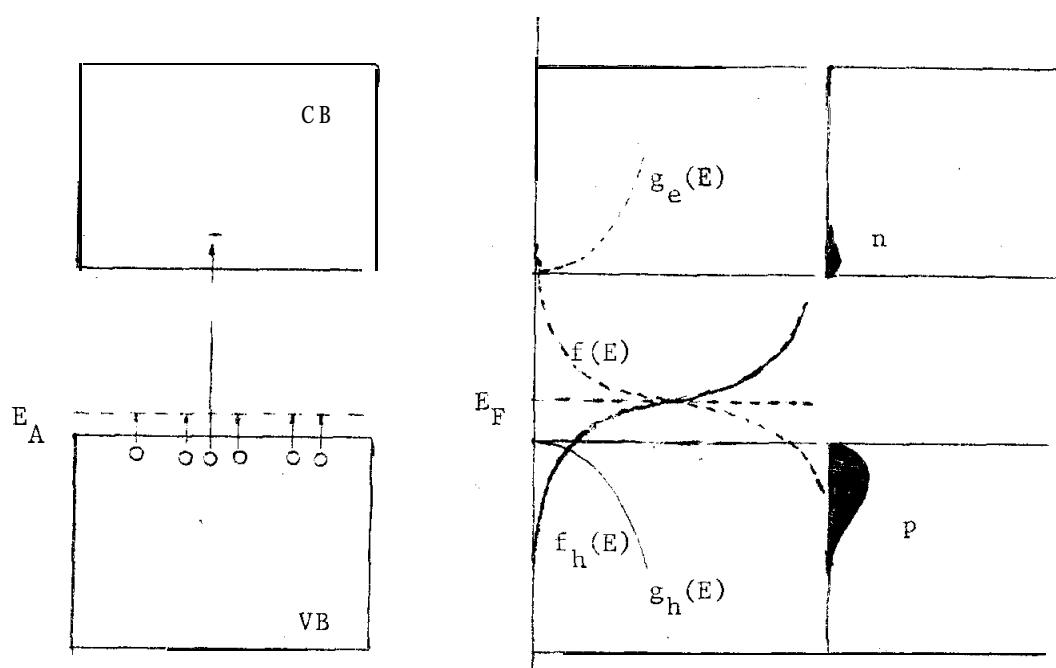
3.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี

ถ้าเราเติบสารเจือในคลัมบ์ III เช่น B, Al, In ลงในสารกึ่งตัวนำ จะได้ผลทรงกันข้ามกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รูป 3.11 (ก) แสดงวงโคจรของไฮดรอกา อะตอม B ซึ่ง "รับ" อิเลคตรอนเข้ามาทำให้ตัวมันเองมีประจุลบและดึงดูดกับไฮโลไว้ด้วยพลังงานยิดเหนี่ยวน้อยมาก คือประมาณ 0.01 eV อะตอมของสารเจือพวกนี้เรียกว่า แอกเซฟเตอร์ (acceptor - ผู้รับ) ส่วนภาพ 3.11 (ข) แสดงระดับแอกเซฟเตอร์ (E_A) ซึ่งอยู่เหนือตอนบนของแคมวาเลนซ์ ด้วยปริมาณ E_a ซึ่งเป็นพลังงานยิดเหนี่ยวนของไฮดรอกาเอง ตั้งนั้นที่อุณหภูมิท่องแอกเซฟเตอร์เกือบทุกด้วยจะได้ออนไซด์และไฮโอลอิสระแก่แคมวาเลนซ์ (โดยไม่เกิดอิเลคตรอนขึ้นในกระบวนการนี้)

* ในหนังสือบางเล่ม สมการต่างๆ จะมีรูปผิดไปจากนี้ ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการกำหนดระดับพลังงาน $= 0$ ว่าอยู่ที่ใด



รูป 3.11 (ก) ไฮโลจิรรอนอะตอมแอดเชฟเตอร์, (ข) ระดับแอดเชฟเตอร์



รูป 3.12 การกระจายของไฮโลและอิเลคตรอนในสารกึ่งตัวนำชินิกี

รูป 3.12 แสดงไฮโลจำนวนมากในแบบว่าเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำประเกทนี และ อิเลคตรอนจำนวนน้อยในแบบความนำ ดังนี้ไฮโลจึงเป็นพานะนำประจุบวกและอิเลคตรอน เป็นพานะนำประจุลบ เราเรียกสารกึ่งตัวนำประเกทนีว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p - type, positive type)

ถ้าให้ N_A เป็นความหนาแน่นของอะเซฟเตอร์ จะได้ความหนาแน่นของพานะนำประจุโดยประมาณในสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังนี้คือ

$$P \approx N_A \quad \dots \dots \dots (3-20)$$

$$n \approx n_1^2 / P \quad \dots \dots \dots (3-21)$$

สำหรับระดับ เพอร์มิโดยประมาณก็สามารถหาได้ดัง เช่น ในการเมืองสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น โดยเริ่มจากสมการ (3-12) ซึ่งจะได้

$$E_F = k_B T \log \frac{N_V}{N_A} \quad \dots \dots \dots (3-22)$$

เมื่อ $N_V = 2 \left(\frac{m^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$

และระดับพลังงาน = 0 อุบัติคณบนสุดของแบบว่าเลนซ์ตามที่ได้กำหนดไว้ตั้งแต่ตอนแรก

พลังงานไออ่อนิวเคลียร์ (E_d, E_a) ของสารเจือชนิดต่างๆ ในผลึก S_i และ G_e และในตาราง 3.1

ตาราง 3.1

พังงานไออโนนของสาร เจือชนิดต่างๆ

Impurity	Si ($\epsilon_r = 11.7$)	Ge ($\epsilon_r = 16.0$)
<i>Donors</i>		
Li	0.033	---
P	0.044	0.012
As	0.049	0.013
Sb	0.039	0.096
Bi	0.069	
<i>Acceptors</i>		
B	0.045	0.010
Al	0.057	0.010
Ga	0.065	0.011
In	0.16	0.011

3.2.3 ระดับเพอร์มิชั่นสารกึ่งตัวนำເອກซ์ทรินชิก

ในตอนที่แล้ว เราได้ระดับเพอร์มิชั่นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และพีโดยประมาณ (คือ กำหนดให้ $n = N_D$ ใน n-type และ $P = N_A$ ใน p-type) เรียงตามลำดับดังนี้

$$(E_F)_n = E_g - k_B T \log \frac{N_C}{N_D}$$

$$(E_F)_p = k_B T \log \frac{N_V}{N_A}$$

เนื่องจาก E_F เป็นระดับพลังงานที่มีความสำคัญในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอิเลคตรอนและไฮโลในแบบความนำและแบบว่าเลนซ์คานลัตัน และโดยทั่วๆ ไปในทางปฏิบัติสารกึ่งตัวนำมักจะถูกเติมด้วยสารเจือทึ้งสองชนิด และมักจะเป็นการยากที่จะหาค่า E_F ที่แน่นอนอย่างไรก็ได้เราอาจนำหลักการของวัสดุที่จะต้องเป็นกลางทางไฟฟ้าเข้ามาช่วย เนื่องไขตั้งกล่าวเกิดขึ้นที่ภาวะสมดุลชึ่ง E_F อยู่ในค่าแทนที่คงที่ ในสารกึ่งตัวนำเอกซ์ทรินซิก ประจุลบได้แก่ อิเลคตรอนและแอคเชฟเตอร์ที่ถูกไอออกอินซ์ ส่วนประจุบวกได้แก่ ไฮโลและโอดเนอร์ที่ถูกไอออกอินซ์ ดังนั้น

$$p + N_D^+ = n + N_A^- \quad \dots \dots \dots \quad (3-23)$$

เมื่อ	p	คือความหนาแน่นของไฮโลในแบบว่าเลนซ์
	n	คือความหนาแน่นของอิเลคตรอนในแบบความนำ
	N_D^+	คือความหนาแน่นของโอดเนอร์ที่ถูกไอออกอินซ์ เป็นประจุบวก
	N_A^-	คือความหนาแน่นของแอคเชฟเตอร์ที่ถูกไอออกอินซ์ เป็นประจุลบ

ค่า n และ p จะเป็นไปตามสมการ (3-8) และ (3-12) คือ

$$n = N_C e^{E_F/k_B T} e^{-E_g/k_B T}$$

$$p = N_V e^{-E_F/k_B T}$$

โดยที่ N_C และ N_V คือ $2(m_e^* k_B T / 2\pi \hbar^2)^{3/2}$ และ $2(m_h^* k_B T / 2\pi \hbar^2)^{3/2}$ ตามลำดับ

สำหรับ N_A^- ซึ่งเป็นไออ่อนลบจะมีค่าเท่ากับผลคูณของความหนาแน่นของแอดเชฟ เทอร์ทั้งหมด N_A กับความน่าจะเป็นที่จะพบอิเลคตรอนที่ระดับพังงาน E_A (ศักดิ์แอดเชฟ เทอร์มีพังงานอยู่ที่ E_A ทั้งหมด) ดังนั้นที่อุณหภูมิ T ได้

$$N_A^- = N_A f(E_A)$$

หรือ

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + \exp \left[(E_A - E_F)/k_B T \right]} \quad \dots \dots (3-24)$$

ท่านองเดียวกัน N_D^+ จะมีค่าเท่ากับผลคูณของความหนาแน่นของໂດเนอර์ทั้งหมด N_D กับความน่าจะเป็นที่จะพบไฮล์ที่ระดับ E_D (ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นที่จะไม่พบอิเลคตรอนที่ระดับนี้)

$$N_D^+ = N_D [1 - f(E_D)]$$

หรือ

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + \exp \left[-(E_D - E_F)/k_B T \right]} \quad \dots \dots (3-25)$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (3-23) จะได้

$$N_V \exp(-E_F/k_B T) + \frac{N_D}{1 + \exp[-(E_D - E_F)/k_B T]}$$

$$= N_C \exp [-(E_g - E_F)/k_B T] + \frac{N_A}{1 + \exp [(E_A - E_F)/k_B T]}$$

(3-26)

ดังนั้นเราทราบค่า E_g , N_A , N_D , E_A , E_D ก็จะสามารถหาค่า E_F ได้ และทำให้หาค่า n , p ได้ สำหรับค่า E_g ของสารกึ่งตัวนำสามารถวัดได้โดยวิธีวัดสภาพนำไฟฟ้าหรือวิธีทางแสง ซึ่งจะได้กล่าวถึงในตอนต่อๆ ไป ค่า N_A และ N_D เราทราบจากการโดย ส่วน E_A และ E_D ก็สามารถคำนวณหาได้ดังที่กล่าวไว้ในตอนที่แล้ว

เราจะพิจารณาสมการ (3-26) ต่อไปอีกเพื่อให้ได้ความเข้าใจทางประการของระดับเฟอร์บี

1. ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นความหนาแน่นของโคลนอร์มีค่ามากกว่าความหนาแน่นของแอดเซฟเตอร์มาก (ในอุดมคติ $N_A = 0$) ดังนั้นเราจะตัด N_A ออกไปจากการพิจารณา เมื่อเทียบกับ N_D และเขียนสมการ (3-23) ใหม่เป็น

$$n = p + N_D^+$$

ถ้าให้อุณหภูมิต่ำ จะมีจำนวนอิเลคตรอนจำนวนน้อยโดยข้ามช่องว่างแบบพลังงานไปยังแบบความนำ นั่นคือมีไฮล์เบินจำนวนน้อยเช่นกัน ดังนั้นเราจะตัด p ออกไปเมื่อเทียบกับ n ในกรณีอุณหภูมิต่ำนี้เราเรียกว่าช่วงเอกซ์ทรินซิก (extrinsic region) ศือผลจากความเป็น - อินทรินซิกเข้ามาเกี่ยวข้องน้อยมากจนตัดทิ้งไปได้ หรือจะศึกษาช่วงเอกซ์ทรินซิกก็ช่วงที่เมื่อมีการ

โดยด้วยความเข้มข้นสูง คือ N_D มีค่ามากและอุณหภูมิไม่สูงนักก็ได้ จากเหตุผลดังกล่าว เราจะให้

$$n = N_D^+$$

หรือ

$$N_C e^{-(E_g - E_F)/k_B T} = \frac{N_D}{1 + e^{(E_F - E_D)/k_B T}}$$

ที่อุณหภูมิค่ามาก

$$e^{(E_F - E_D)/k_B T} + 1 \approx e^{(E_F - E_D)/k_B T}$$

แทนค่าในสมการที่แล้วจะได้

$$E_g + E_D - 2E_F = k_B T \log \frac{N_C}{N_D} \quad \dots \dots \dots (3-27)$$

และ

$$E_F = \frac{E_g + E_D}{2} - \frac{k_B T}{2} \log \frac{N_C}{N_D} \quad \dots \dots (3-28)$$

กรณีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ $10^0 K$ หรือต่ำกว่า แทนค่า E_F จากสมการ (3-28) ลงในสมการ (3-8) จะได้

$$\begin{aligned} n &= N_C e^{(-E_g/k_B T)} \left(\frac{N_D}{N_C} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[(E_g + E_D)/2k_B T \right] \\ &= (N_C N_D)^{\frac{1}{2}} \exp \left[(E_D - E_g)/2k_B T \right] \end{aligned}$$

ซึ่งเปรียบเทียบ $N_D^{\frac{1}{2}}$ ด้วย