



สารกึ่งตัวนำ

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ได้รับการศึกษาและนำไปใช้งานมานานก่อนที่จะมีทฤษฎีสำหรับอธิบายคุณสมบัติต่างๆของสารประเภทนี้เสียอีก ซึ่งในปัจจุบันนี้เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าที่อุณหภูมิห้อง (room temperature) สารกึ่งตัวนำมีสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง $10^6 - 10^{12} \Omega\text{-cm}$ ส่วนสารกึ่งตัวนำมีสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง $10^3 - 10^6 \Omega\text{-cm}$ ผลจากการศึกษาค้นคว้า ได้ข้อสรุปที่เป็นสมบัติสำคัญของสารกึ่งตัวนำ ดังนี้

1. มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานเป็นลบ (negative temperature coefficient of resistance) กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานจะลดลง
2. มีสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง $10^3 - 10^6 \Omega\text{-cm}$ ที่อุณหภูมิห้อง
3. มีสมบัติเกี่ยวกับการแปลงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง (rectifying effects)
4. สามารถตอบสนองต่อแสง กล่าวคือ เมื่อมีแสงตกกระทบสารจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า (photovoltage) เกิดขึ้น และความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้
5. ให้กำลังทางไฟฟ้าสูงเนื่องจากความร้อน (high thermoelectric power)
6. สามารถเติมอะตอมสิ่งเจือปนที่เรียกว่าการโด๊ป (Doping) ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

สมบัติเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงานของอิเล็กตรอนในของแข็ง สำหรับสารที่เป็นผลึก (crystal) อะตอมของสารจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบทำให้สนามศักย์ในผลึกมีลักษณะเป็นคาบ (periodic potential) พฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ในผลึกที่มีสนามศักย์ดังกล่าวอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของบลอค (Bloch's theorem) [8] และจากแบบจำลองอย่างง่าย ๆ ของโครนิคและเพนนี่ (Kronig and Penny model) แสดงให้เห็นถึงการเกิดแถบพลังงานโดยที่อิเล็กตรอนทั้งหมดในผลึกจะมีระดับพลังงานอยู่ในแถบพลังงาน ส่วนช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่เกิดขึ้นอิเล็กตรอนไม่สามารถมีค่าระดับพลังงานอยู่ในช่วงนี้ได้ การจัดอิเล็กตรอนลงในแถบพลังงานต่าง ๆ จะเริ่มจากแถบพลังงานที่มีค่าพลังงานน้อยก่อน เมื่อเต็มแล้วจึงเลื่อนขึ้นไปในชั้นที่มีค่า

พลังงานสูงกว่าจนหมดอิเล็กตรอน แถบพลังงานชั้นบนสุดที่มีอิเล็กตรอนอยู่เรียกว่าแถบวาเลนซ์ ส่วนแถบพลังงานชั้นถัดไปเรียกว่าแถบนำ

ทฤษฎีแถบพลังงานของอิเล็กตรอนมีความสำคัญต่อการเข้าใจสมบัติของสาร กล่าวคือสามารถใช้แถบพลังงานเพื่อแบ่งชนิดของสารเป็น โลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน ตามทฤษฎีแถบพลังงาน ฉนวน หมายถึง ของแข็งที่แถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนอยู่เต็มส่วนแถบนำจะว่างเปล่าและช่องว่างแถบพลังงานมีขนาดกว้างทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปสู่อิเล็กตรอนในแถบนำได้ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานที่เต็มจะเฉียดต่อแรงกระทำภายนอกเมื่อมีสนามไฟฟ้าผ่านเข้าไปในสาร อิเล็กตรอนเหล่านั้นจึงไม่นำไฟฟ้า ส่วนโลหะแถบพลังงานชั้นบนสุดมีอิเล็กตรอนอยู่เพียงครึ่งหนึ่งเท่านั้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนในแถบพลังงานนั้นได้ ทำให้มีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น สำหรับสารกึ่งตัวนำนั้นที่อุณหภูมิศูนย์องศาเคลวินแถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม แต่มีช่องว่างแถบพลังงานแคบขนาดไม่เกิน 3 eV ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานความร้อน (thermal energy) จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปยังแถบพลังงานที่อยู่สูงถัดไป ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นในแถบวาเลนซ์เมื่อผ่านสนามไฟฟ้าเข้าไปในสารนี้จะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นได้ ดังนั้นในกรณีของสารกึ่งตัวนำ ความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานมีความสำคัญมากต่อการเข้าใจสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงชนิดของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างคล้ายเพชร (diamondlike structure) โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ โพลีอิลเล็กตรอนอิสระ และการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ

ผลึกกึ่งตัวนำอาจประกอบด้วยธาตุเดี่ยวหรือเป็นสารประกอบที่เกิดจากธาตุหลายชนิดก็ได้ สารกึ่งตัวนำที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง คือ Si และ Ge ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกคล้ายกับโครงสร้างผลึกของเพชร โครงสร้างผลึกแบบนี้เกิดจากการจับกันของอะตอมเป็นแบบพันธะเชิงสี่หน้า (tetrahedral bond) เราสามารถจำแนกผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างคล้ายเพชรได้เป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

2.1.1 ผลึกกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยว (monoelements)

ธาตุกึ่งตัวนำประเภทนี้ได้แก่ ธาตุในกลุ่ม IV ของตารางธาตุ โดยเฉพาะ Si และ Ge ได้นำมาใช้ทำอุปกรณ์กึ่งตัวนำกันอย่างแพร่หลาย ส่วนตัวที่อยู่ในสภาวะที่เรียกว่า α -Sn มีช่องว่างแถบพลังงานแคบมากเกือบเป็นศูนย์ ในขณะที่เพชรซึ่งเป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอน(C)ถูกจัดให้เป็นฉนวนเพราะมีช่องว่างแถบพลังงานมากกว่า 5.0 eV [9 , 10]

2.1.2 ผลึกกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยวสองชนิด (binary compounds)

ผลึกกึ่งตัวนำประเภทนี้แยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1.2.1 กลุ่ม II-VI เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่เกิดจากการรวมกันของธาตุกลุ่ม II ซึ่งมีเลขอะตอม 2 ตัว กับธาตุกลุ่ม VI ซึ่งมีเลขอะตอม 6 ตัว ได้แก่ ZnS , ZnSe , ZnTe , CdS , CdTe เป็นต้น

2.1.2.2 กลุ่ม III-V เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่เกิดจากการรวมกันของธาตุกลุ่ม III ซึ่งมีเลขอะตอม 3 ตัวกับธาตุกลุ่ม V ซึ่งมีเลขอะตอม 5 ตัว ได้แก่ AlP , AlAs , GaP , GaAs , InP , InAs เป็นต้น

2.1.3 ผลึกกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุเดี่ยวสามชนิด (ternary compounds)

สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ได้จากการแทนที่ธาตุตัวที่ 3 ลงไปในสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI หรือ III-V เป็นผลให้ได้สารประกอบกึ่งตัวนำ 2 กลุ่ม ดังนี้

2.1.3.1 กลุ่ม I-III-VI₂ ได้จากการนำสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI มาขยายเป็น 2 เท่า แล้วแทนที่อะตอมทั้งสองของธาตุกลุ่ม II ด้วยธาตุในกลุ่ม I หนึ่งอะตอม และกลุ่ม III หนึ่งอะตอม สารในกลุ่มนี้ประกอบขึ้นจากธาตุกลุ่ม I คือ Cu, Ag กลุ่ม III คือ Al, Ga, In, Tl และกลุ่ม VI คือ S, Se, Te ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ได้แก่ CuGaS₂ , AgInTe₂ , CuInSe₂ เป็นต้น

2.1.3.2 กลุ่ม II-IV-V₂ ได้จากการนำสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V มาขยายเป็น 2 เท่าแล้วแทนที่อะตอมทั้งสองของธาตุกลุ่ม III ด้วยธาตุในกลุ่ม II หนึ่งอะตอมและกลุ่ม IV หนึ่งอะตอม สารในกลุ่มนี้ประกอบขึ้นจากธาตุกลุ่ม II คือ Zn, Cd กลุ่ม IV คือ Si, Ge, Sn และกลุ่ม V คือ P, As, Sb ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ได้แก่ ZnGeP₂ , CdSiP₂ , ZnSnAs₂ เป็นต้น

2.1.4 โลหะผสมกึ่งตัวนำ

ผลึกของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดที่เป็นธาตุและสารประกอบสามารถเตรียมขึ้นในลักษณะ

ของ โลหะผสม (alloys) ได้ โดยการนำเอาธาตุในกลุ่มเดียวกันสองธาตุมาแทนที่กัน โดยมี สัดส่วนอะตอมต่างกันทำให้ชนิดของสารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้จำนวน ไม่จำกัดแต่ละชนิดจะมีสมบัติ ทางฟิสิกส์แตกต่างกัน ตัวอย่าง โลหะผสมกึ่งตัวนำที่จำแนกตามชนิดของสารเริ่มต้น มีดังนี้

2.1.4.1 ชนิดเป็นธาตุ ได้แก่ $Si_{(1-x)}Ge_x$

2.1.4.2 ชนิดเป็นสารประกอบสองธาตุ ได้แก่ $Ga_{(1-x)}As_x$

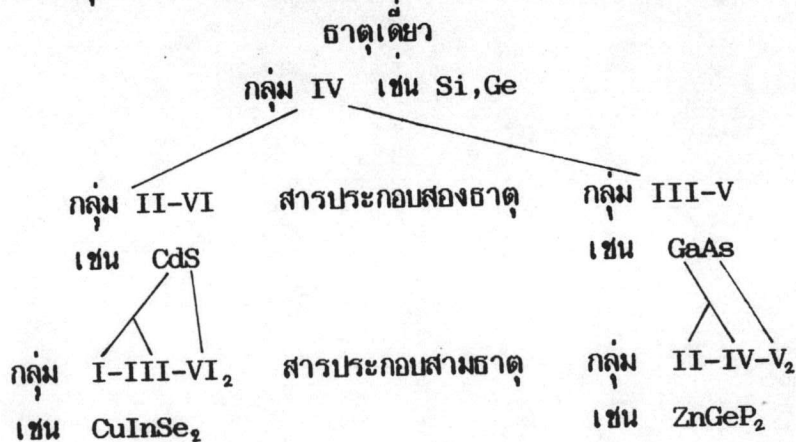
$CdS_{(1-y)}Te_y$ เป็นต้น

2.1.4.3. ชนิดเป็นสารประกอบสามธาตุ ได้แก่ $Ag_{(1-x)}Cu_xGaTe_2$, $Ag_{(1-x)}Cu_xGa_{(1-y)}In_yTe_2$, $Ag_{(1-x)}Cu_xGa_{(1-y)}In_y(Te_{(1-z)}Se_z)_2$ เป็นต้น

สิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับสารประกอบกึ่งตัวนำรวมทั้ง โลหะผสมกึ่งตัวนำที่กล่าวแล้วข้าง ต้นคือมันยังคงรักษา โครงสร้างพันธะ เป็นแบบพันธะ เชิงสี่หน้า แม้ว่าลักษณะของหน่วยเซลล์ของ ผลึกจะแตกต่างกัน ไปก็ตาม นั่นคือสารประกอบกึ่งตัวนำและ โลหะผสมกึ่งตัวนำที่กล่าวแล้วข้างต้น ยังคงสอดคล้องตามกฎของแปมปลิน (Pamplin Rule) ซึ่งกล่าวว่า [2]

$$\frac{\text{ผลรวมของจำนวนอิเล็กตรอนวาเลนซ์ของทุกอะตอม}}{\text{จำนวนอะตอมในสารประกอบตระกูลนี้}} = 4 \frac{\text{อิเล็กตรอน}}{\text{ตำแหน่งอะตอม}}$$

เราอาจสรุปชนิดของผลึกกึ่งตัวนำที่กล่าวมาแล้วข้างต้นด้วยรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบกึ่งตัวนำที่ได้จากการ แทนที่อะตอมลงในผลึกกึ่งตัวนำในตระกูล IV แล้วยังรักษาคุณสมบัติของอิเล็กตรอนต่ออะตอม

จากวิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการแสวงหาสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ ๆ ได้มากมาย

2.2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ

ถ้าแบ่งโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการเรียงตัวของอะตอมที่จับกันแบบพันธะเชิงสี่หน้าจะแบ่งออกได้เป็นชนิดใหญ่ ๆ 3 ชนิด (เฉพาะที่เกี่ยวกับซิลิคอนไดโพลาร์) คือ

2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure)

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างนี้ได้จากการเอาโครงสร้างผลึกแบบเพชเช่นเตอร์คิวบิก (face - centred cubic lattice ; $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$) 2 โครงสร้างวางเหลื่อมกันเป็นระยะทาง $\frac{1}{4}$ ของเส้นทะแยงมุม โดยอะตอมของโครงสร้างทั้งสองเป็นอะตอมชนิดเดียวกันดังรูปที่ 2.2 หนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบนี้จะมี 8 อะตอม ซึ่งเป็นอะตอมชนิดเดียวกันอยู่ที่ตำแหน่ง 000 , $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$, $\frac{111}{444}$, $\frac{133}{444}$, $\frac{313}{444}$ และ $\frac{331}{444}$ แต่ละอะตอมมีอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม จะเห็นว่าโครงสร้างแบบนี้เป็นรูปลูกบาศก์ซึ่งบิดเบี้ยวได้ยากมาก เพราะอะตอมที่จับในแต่ละแขนของพันธะเชิงสี่หน้าเป็นอะตอมชนิดเดียวกัน แรงดึงจึงเท่ากันทุกทาง โครงสร้างจึงสมมาตรมาก สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบนี้เป็นผลึกที่ประกอบด้วยธาตุกลุ่ม IV ได้แก่ เพชร(C) ซิลิคอน(Si), เยอรมันเนียม(Ge) และดีบุก(Sn)

2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblend structure)

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบนี้ส่วนมากเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V และกลุ่ม II-VI โครงสร้างแบบนี้ที่จริงคือโครงสร้างแบบเพชรนั่นเอง แต่โครงสร้างเพชเช่นเตอร์คิวบิกสอง โครงที่เหลื่อมกันนั้น แต่ละโครงสร้างเป็นอะตอมของชนิดดังรูปที่

2.3 หนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างแบบนี้จะมี 8 อะตอมซึ่งประกอบด้วยอะตอมของธาตุ 2 ชนิดแต่ละชนิดมี 4 อะตอม สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบนี้เช่น ZnS, GaAs เป็นต้น ตำแหน่งอะตอมของ Zn และ S มีดังนี้

Zn	มี 4 อะตอม	อยู่ที่	000	,	$0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$,	$\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$,	$\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$
S	มี 4 อะตอม	อยู่ที่	$\frac{111}{444}$,	$\frac{133}{444}$,	$\frac{313}{444}$,	$\frac{331}{444}$

ปลายแขนของ Zn จะมี S จับอยู่ 4 อะตอมและที่ปลายแขนของ S จะมี Zn จับอยู่ 4 อะตอมเช่นกัน ดังนั้นโครงสร้างแบบนี้ยังคงเป็นลูกบาศก์อยู่แต่จะมีสมมาตร

น้อยกว่า โครงผลึกแบบเพชร

2.2.3 โครงผลึกแบบซาลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure) [2]

เป็นโครงสร้างที่พบอย่างกว้างขวางในหมู่สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม I-III-VI₂ และ II-IV-V₂ หรือที่เขียนเป็นสูตรว่า ABC₂ โครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ที่จริงแล้วคือ โครงสร้างผลึกแบบเพชรเช่นกันกับซิงค์เบลนด์ แต่คราวนี้มีอะตอมแตกต่างกันถึง 3 ชนิด หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบนี้จะมี 16 อะตอม มีขนาดเป็น 2 เท่าของแบบซิงค์เบลนด์ ดังรูปที่ 2.4 ตำแหน่งอะตอมของธาตุกลุ่มต่างๆ มีดังนี้

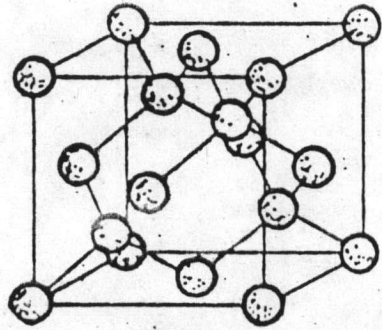
- ธาตุกลุ่ม A มี 4 อะตอมอยู่ที่ ; 000 , $0\frac{11}{24}$, $\frac{111}{222}$, $1\frac{1}{4}$
 - ธาตุกลุ่ม B มี 4 อะตอมอยู่ที่ ; $00\frac{1}{2}$, $0\frac{13}{24}$, $\frac{11}{22}1$, $1\frac{1}{4}$
 - ธาตุกลุ่ม C มี 8 อะตอมอยู่ที่ ; $\frac{11}{48}x$, $\frac{31}{48}x$, $\frac{2x}{4}\frac{7}{8}$, $\frac{1x}{4}\frac{7}{8}$
- $$\frac{1}{2}x\frac{25}{48} , \frac{1}{2}\bar{x}\frac{15}{48} , \frac{11}{42}\bar{x}\frac{3}{8} , \frac{31}{42}\bar{x}\frac{3}{8}$$

โดยที่ $x = \frac{1}{4} + u$ และ $\bar{x} = \frac{3}{4} + u$, u เป็นค่าการเลื่อนแบบเทระโกนอล (tetragonal distortion) ซึ่งเกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม C หนึ่งอะตอมที่เป็น แอนไอออน (anion) จับอยู่กับแคตไอออน (cation) สองอะตอมซึ่งเป็นธาตุกลุ่ม A และ กลุ่ม B อย่างละสองอะตอมทำให้ความยาวของพันธะ (bond length) ไม่เท่ากัน จึงเกิดการเลื่อนของตำแหน่งแอน ไอออนออกไปจากตำแหน่งจุดศูนย์กลาง ซึ่งผลจากการเลื่อนแบบเทระโกนอลนี้จะทำให้โครงสร้างผลึกมีลักษณะแตกต่างจากโครงสร้างสมบูรณ์เล็กน้อยหมายความว่า เมื่อเกิดการเลื่อนแบบเทระโกนอลขึ้นเป็นผลให้อัตราส่วน $c/a \neq 2$ ทำให้ความสมมาตรของผลึกมีค่าน้อยกว่า โครงผลึกแบบซิงค์เบลนด์

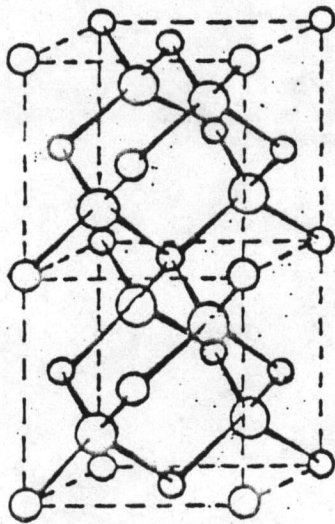
2.3 โยล และ อิเล็กตรอนอิสระ

อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (zero absolute temperature) ผลึกสารกึ่งตัวนำจะประพฤติตัวเป็นฉนวนเนื่องจากแถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม ดังนั้นจึงไม่มีอิเล็กตรอนอิสระสำหรับนำกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานเนื่องจากความร้อนที่ผลึกได้รับจะทำให้พันธะโควาเลนซ์บางพันธะของอะตอมแตกแยกออก อิเล็กตรอนที่รวมอยู่ในพันธะจะหนีหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระ เคลื่อนที่ไปได้ทั่วผลึก การขาดอิเล็กตรอนไปของพันธะโควาเลนซ์จะทำให้เกิดที่ว่างขึ้นเรียกว่า โยล อะตอมขณะนั้นจะมีสถานะทางไฟฟ้าเป็นประจุบวกและจะพยายามดึงอิเล็กตรอนจากพันธะใกล้เคียงมาเพิ่มเติมลงในที่ว่างที่เกิดขึ้น ดังนั้นตำแหน่งที่ว่างไปนี้จึงเปรียบเสมือนประจุบวก ซึ่งจะเห็นว่า โยล ไม่ใช่

ประจุบวก แต่เป็นช่องว่างที่ทำตัวคล้ายประจุบวก ตามทฤษฎีของแถบพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นมากพอมันจะกระโดดไปอยู่ยังแถบนำและทิ้งอนุภาคโฮลไว้ในแถบวาเลนซ์ดังรูปที่ 2.5 อิเล็กตรอนในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์นี้จะ เป็นพาหะอิสระ (free carrier) ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้

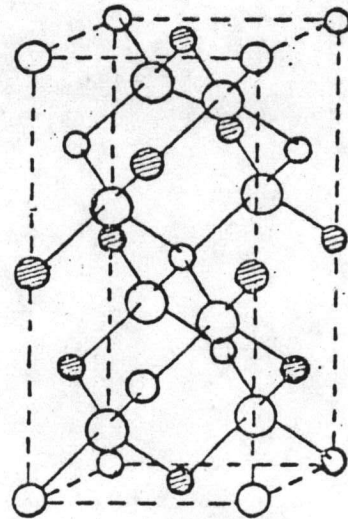


รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร



○ II
○ VI

รูปที่ 2.3

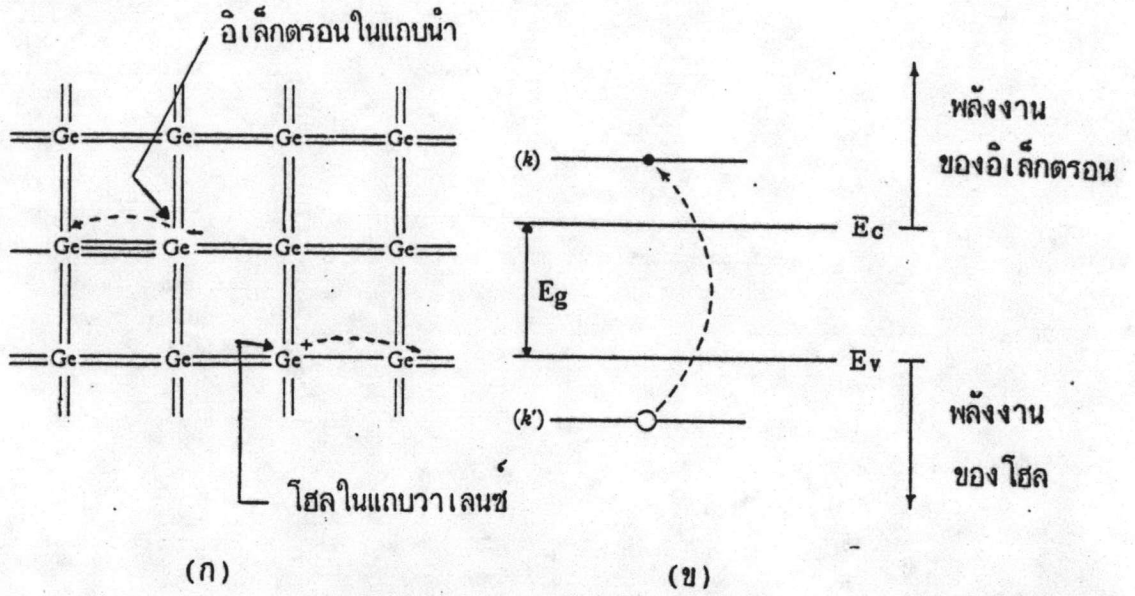


○ A
○ B
○ C

รูปที่ 2.4

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรต์



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮล

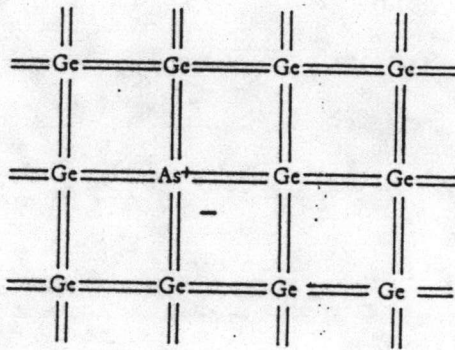
- ก) โดยใช้โครงสร้างพันธะ
- ข) โดยใช้แถบพลังงาน

2.4 การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

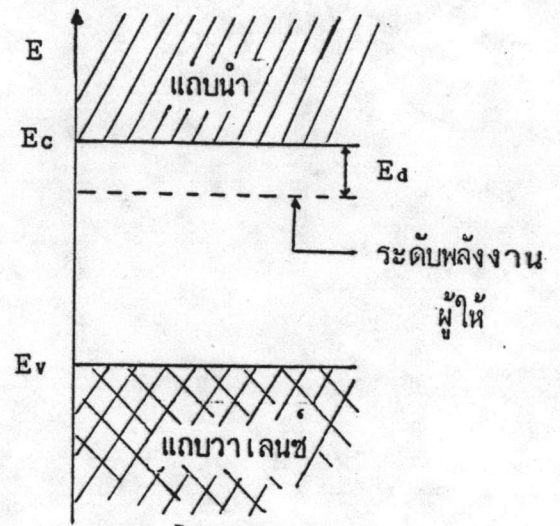
ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (pure หรือ intrinsic semiconductor) จำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบนำจะเท่ากับจำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์ซึ่งจะมีจำนวนเล็กน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับช่องว่างแถบพลังงานและอุณหภูมิ วิธีการที่จะทำให้นับจำนวนอิเล็กตรอนอิสระและโฮลเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งสามารถควบคุมได้ เรียกว่าการโด๊ป ซึ่งหมายถึง การเติมอะตอมของสิ่งเจือปน (impurity) ลงไปในผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ , สารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปแล้วเรียกว่า สารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิก (extrinsic semiconductor) การโด๊ปนี้เป็นการควบคุมสมบัติทางไฟฟ้าได้วิธีหนึ่ง

ในกรณีสารกึ่งตัวนำธาตุเดี่ยวกลุ่ม IV สิ่งเจือปนที่เติมเข้าไปจะยังคงมีการจับคู่กับอิเล็กตรอนของอะตอมเพื่อนบ้านเพื่อให้คงไว้ซึ่งลักษณะของพันธะเชิงสี่หน้า แต่จะก่อให้เกิดการขาดหรือเกินของจำนวนอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในบางพันธะ เช่น ถ้าสิ่งเจือปนที่เติมเข้าไปเป็นธาตุกลุ่ม V ทุก ๆ พันธะของแต่ละอะตอมจะมีอิเล็กตรอนครบตามจำนวนแต่จะมีอิเล็กตรอนเหลืออีกหนึ่งตัวซึ่งอิเล็กตรอนประเภทนี้จะเป็นอิเล็กตรอนที่ร้อนเร็วอยู่ทั่วไปภายในผลึก สิ่ง

เจือปนที่เติมลงไปในนี้เรียกว่า สิ่งเจือปนผู้ให้ (donor impurity) ทุกอะตอมของสิ่งเจือปนที่เติมเข้าไปจะให้อิเล็กตรอนอิสระหนึ่งตัวทำให้เกิดระดับพลังงาน (energy level) ของสิ่งเจือปนขึ้น ดังรูปที่ 2.6 จำนวนของอิเล็กตรอนมีมากกว่าโฮล กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจึงเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เรียกสารกึ่งตัวนำแบบนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนซึ่งมีจำนวนมากกว่าเรียกว่า พาหะข้างมาก (majority carrier) ส่วนโฮลซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าเรียกว่าพาหะข้างน้อย (minority carrier)



(ก)

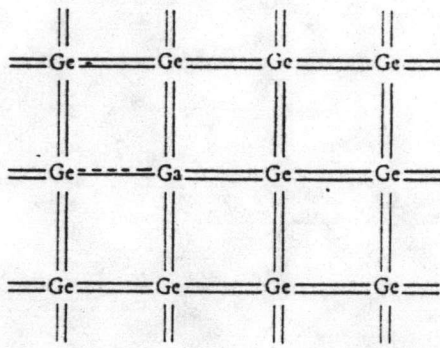


(ข)

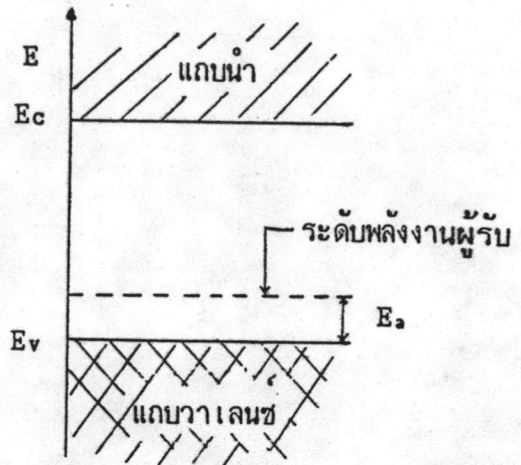
รูปที่ 2.6 ก) โครงสร้างผลึก Ge มีอะตอมของสิ่งเจือปนกลุ่ม V แทรก
ข) ระดับพลังงานของสิ่งเจือปนผู้ให้

สำหรับกรณีสิ่งเจือปนที่เติมเข้าไปเป็นธาตุกลุ่ม III บางพันธะจะมีอิเล็กตรอนอยู่เพียงตัวเดียวทำให้ผลึกมีความต้องการอิเล็กตรอนมาเติมในตำแหน่งที่ว่างในพันธะซึ่งขาดอิเล็กตรอนอยู่หนึ่งตัวหรือมีโฮลอยู่หนึ่งตัว สารกึ่งตัวนำที่ได้จะสามารถรับอิเล็กตรอนจากภายนอกได้ยกเพื่อให้จำนวนอิเล็กตรอนในพันธะมีครบจำนวน สิ่งเจือปนที่เติมให้เรียกว่า สิ่งเจือปนผู้รับ (acceptor impurity) โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ได้จึงมีโฮลเกิดขึ้นทุกอะตอมของสิ่งเจือปนที่เติมเข้าไป ดังนั้นจำนวนโฮลจึงมีมากกว่าอิเล็กตรอนอิสระ กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จึงเกิดจากการเคลื่อนที่ของโฮล เราจึงเรียกสาร

กึ่งตัวนำแบบนำสารกึ่งตัวนำชนิดที่ (p-type semiconductor) ในสารกึ่งตัวนำชนิดที่โฮลซึ่งมีจำนวนมากกว่าจะเป็นพาหะข้างมาก ส่วนอิเล็กตรอนซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าเป็นพาหะข้างน้อย



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 ก. โครงผลึก Ge มีอะตอมของสิ่งเจือปนกลุ่ม III แทรก
 ข. ระดับพลังงานของสิ่งเจือปนผู้รับ

จะเห็นว่าในสารกึ่งตัวนำธาตุเดี่ยว เมื่อมีการเติมจะมีสิ่งเจือปนชนิดผู้ให้หรือชนิดผู้รับเพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบ การบกพร่อง(defect) ของผลึกจะทำหน้าที่คล้ายกับสิ่งเจือปนได้ทั้งชนิดผู้ให้และชนิดผู้รับ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบจะแสดงชนิดของการนำไฟฟ้าแบบใดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะข้างมาก (majority carrier concentration) ว่าเกิดจากข้อบกพร่องที่ทำหน้าที่คล้ายกับสิ่งเจือปนชนิดใด