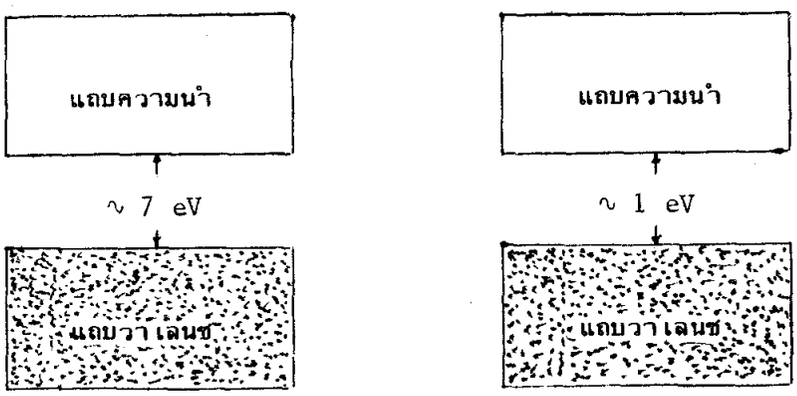
บทที่ 1
โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ

<u>วัตถุประสงค์</u>

เพื่อให้ทราบว่าสารกึ่งตัวนำคืออะไร มีโครงสร้างผลึกเป็นอย่างไร สารกึ่งตัวนำกลุ่มที่สำคัญๆ มีอะไรบ้าง และอะตอมในผลึกสารกึ่งตัวนำมีการยึดเหนี่ยวกันในลักษณะอย่างไร

1.1 <u>สารกึ่งตัวนำ</u>

ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะคล้ายกับของอโลหะ ต่างกันที่สารกึ่งตัวนำจะมีช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่าของอโลหะ คือของสารกึ่งตัวนำจะมีค่า - ประมาณ 1 eV ขณะที่ของอโลหะจะมีค่าประมาณ 7 eV ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่นที่อุณหภูมิห้อง อิเลคตรอนตอนบนของแถบวาเลนซ์ (valence band) จึงสามารถโลด (excite) ข้ามช่องว่างขึ้นไปยังตอนล่างของแถบความนำ (conduction band) ได้บ้าง และทำให้เกิดการ



รูป 1.1 แถบพลังงานของอโลหะ (ซ้าย) และสารกึ่งตัวนำ (ขวา)

นำกระแสไฟฟ้าขึ้นได้เมื่อมีสนามไฟฟ้า ขณะเดียวกันในแถบวาเลนซ์เมื่ออิเลคตรอนไลตออกไปจะทำให้เกิดสถานะว่างขึ้นเรียกว่าโฮล ซึ่งโฮลนี้จะเปรียบเสมือนเป็นอนุภาคที่มีประจุบวก ดังนั้นจึงช่วยทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นได้อีกส่วนหนึ่งด้วย

ที่อุณหภูมิห้องสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) ของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าประมาณ 10^{-2} - 10^{9} Q-cm ซึ่งอยู่กลางๆ ระหว่างโลหะซึ่งนำไฟฟ้าได้ดี คือมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ 10-6 Q-cm กับอโลหะซึ่งมีสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ 1014 - 10^{22} Cl-cm

สภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นกับอุณหภูมิมาก ที่อุณหภูมิต่ำค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าสูง ส่วนที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าต่ำ ซึ่งตรงกันข้ามกับของโลหะ ที่เป็นดังนี้ก็เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเลคตรอนจะไลตข้ามช่องว่างแถบพลังงานไปได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้จำนวนอิเลคตรอนอิสระในแถบความนำและจำนวนโฮลอิสระในแถบวาเลนซ์มีจำนวนมากขึ้น การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำก็จะดีขึ้น นั่นคือสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง

เราพอจะแบ่งสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ออกเป็นสองพวกใหญ่ ๆ คือ

1. ธาตุ ได้แก่ธาตุในตารางธาตุคอลัมน์ที่สี่
2. สารประกอบ ที่สำคัญได้แก่สารประกอบของธาตุจากตารางธาตุคอลัมน์ที่สามกับห้า สองกับหก และสี่กับสี่

ส่วนสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการเจือปน เพื่อให้การนำไฟฟ้าและขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเป็นไปตามที่เราต้องการนั้น จะไม่กล่าวถึงในที่นี้ เพราะโครงสร้างหลักของผลึกยังคงเป็นเช่นเดิม

1.2 <u>โครงสร้างผลึก</u>

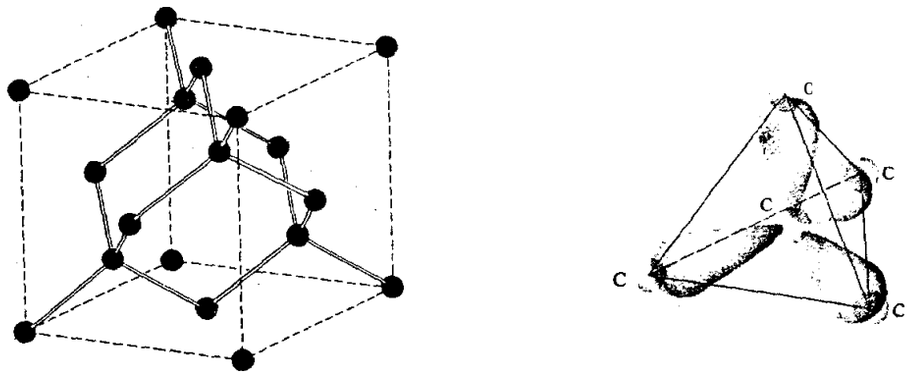
สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุทั้งหมดจะอยู่ในตารางธาตุคอลัมน์ที่สี่ และจะมีโครงสร้างแบบผลึกเพชร ที่สำคัญและรู้จักกันดีก็คือ ซิลิคอน (Si) และเจอร์เมเนียม (Ge) สิ่งประดิษฐ์

จากสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะทำจากซิลิคอนเพราะมีคุณภาพดี ได้รับการศึกษามานานและมีราคาถูก

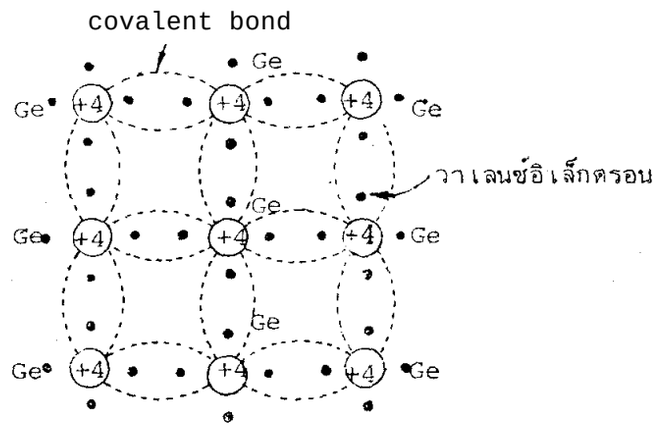
Period	I	II											III	IV	V	VI	VII	O
1	1 H 1.008																	2 He 4.003
2	3 Li 6.939	4 Be 9.012											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.183
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.312	Transition elements										13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
4	19 K 39.102	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.90	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.847	27 Co 58.933	28 Ni 58.71	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.22	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (99)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.4	47 Ag 107.87	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.30
6	55 Cs 132.91	56 Ba 137.34	57* La 138.91	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.98	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89† Ac (227)	104 Rf (?) (259)	105 Ha (?) (260)													
	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.35	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97	*Lanthanide series			
	90 Th 232.04	91 Pa (231)	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (249)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (253)	101 Md (256)	102 No (253)	103 Lr (257)	†Actinide series			

รูป 1.2 ตารางธาตุ

โครงสร้างแบบผลึกเพชร จะมีโครงผลึกเป็น fcc และมีเบสิส (basis) ประกอบด้วยอะตอมชนิดเดียวกัน 2 อะตอม อะตอมแต่ละตัวจะถูกล้อมรอบด้วยอะตอมอื่น 4 ตัว ในรูปทรงแบบเททระฮีดรอน (tetrahedron) ดังรูป 1.3 หรือเขียนในลักษณะ 2 มิติ เพื่อความสะดวก ดังรูป 1.4



รูป 1.3 โครงสร้างแบบผลึกเพชรและรูปทรงเททระฮีดรอน



รูป 1.4 โครงสร้างแบบผลึกเพชรในสองมิติแสดงอิเลคตรอนในแต่ละบอนด์

การจัดตัวในลักษณะแบบนี้ ทำให้เกิดบอนด์แบบโควาเลนท์ (covalent bond) หรือแบบเททระฮีดรอล (tetrahedral bond) ในแต่ละบอนด์มีอิเลคตรอน 2 ตัว สปินตรงกันข้าม โครงสร้างแบบนี้จะทำให้ผลึกมีความแข็งแกร่ง มีจุดหลอมเหลวสูง แต่เปราะ การที่เปราะอธิบายได้จากผลทางกลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งแสดงให้ทราบว่า บอนด์แบบโควาเลนท์ จะเกี่ยวพันกับทิศทางหรือตำแหน่งการจัดตัวของอะตอมที่แน่นอน เมื่อทำให้ทิศทางผิดไป (เช่นจากการงอ) ก็จะทำให้บอนด์โควาเลนท์ถูกทำลาย และผลึกก็จะแตกหรือหัก

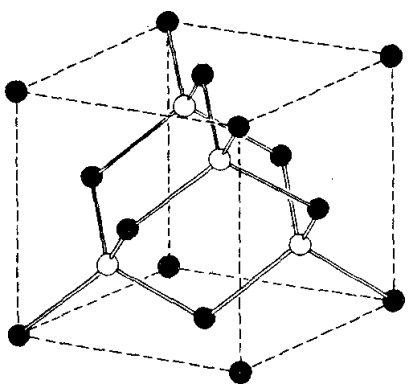
สารกึ่งตัวนำกลุ่มต่อไปคือ พวกสารประกอบ ซึ่งจะมีกลุ่มที่สำคัญ โดยเขียนในลักษณะของ AB (binary compound) คือ

1. A เป็นธาตุในตารางธาตุคอลัมน์ที่สาม uar B อยู่ในตารางธาตุคอลัมน์ที่ห้า เรียกสารประกอบพวกนี้ว่า สารประกอบกลุ่ม สาม-ห้า (III-V compound) เช่น อินเดียมแอนติโมไนด์ (InSb - indium antimonide) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs - gallium arsenide) อินเดียมอาร์เซไน์ (InAs - indium arsenide) อลูมินัมแอนติโมไนด์ (AlSb - aluminum antimonide) อินเดียมแอนติโมไนด์ (InSb - indium antimonide) เป็นต้น

2. A และ B เป็นธาตุในตารางธาตุคอลัมน์สี่ เรียกว่าสารประกอบกลุ่ม d-d (IV - IV compound) เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SIC - silicon carbide)

3. A เป็นธาตุในตารางธาตุคอลัมน์ สอง และ B อยู่ในตารางธาตุคอลัมน์ หก เรียกว่าสารประกอบกลุ่มสอง-หก (II - VI compound) เช่น ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS - sinc sulphide) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS - cadmium sulphide) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe - cadmium telluride) เป็นต้น

ในสารประกอบกลุ่ม สาม-ห้า อิเลคตรอน 8 ตัว ในบอนด์ทั้ง 4 มาจาก วาเลนซ์อิเลคตรอน 3 ตัว จากธาตุในคอลัมน์สาม และอีก 5 ตัว มาจากธาตุในคอลัมน์ ห้า โครงสร้างผลึกเป็นโครงสร้างแบบซิงค์ซัลไฟด์ (zinc sulphide) ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างแบบผลึกเพชรนั่นเองเพียงแต่เบสิสประกอบด้วยอะตอม 2 ชนิด สำหรับบอนด์ยังคงเป็นแบบโควาเลนท์เพราะอะตอมจัดตัวในลักษณะเททระฮีดรอน (รูปทรงแบบนี้จะคู่กับบอนด์แบบโควาเลนท์)



รูป 1.5 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์ซัลไฟด์

จริงๆ แล้วบอนด์ของสารประกอบกลุ่ม สาม-ห้า ไม่ได้เป็นบอนด์แบบโควาเลนท์ทีเดียว เพราะมีธาตุต่างกันดังนั้นการกระจายของอิเลคตรอนไปตามบอนด์จึงไม่สมมาตร แต่จะเลื่อนไปทางอะตอมหนึ่ง เพราะฉะนั้นอะตอมแต่ละตัวจึงมีประจุไฟฟ้าสุทธิไม่เท่ากับศูนย์ บอนด์แบบนี้มีชื่อเรียกว่า บอนด์แบบเฮทเทอโรโพลาร์(heteropolar) เป็นการใช้ชื่อตรงข้ามกับพวกบอนด์แบบโควาเลนท์ของธาตุในคอลัมน์สี่ ซึ่งเรียก โฮโมโพลาร์(homopolar) ยกตัวอย่างกรณีของแกลเลียมอาร์เซไนด์ GaAs อิเลคตรอนจะไปรวมอยู่ทางด้านอะตอม As มากกว่า ทำให้มีประจุไฟฟ้าลัพท์เท่ากับ -0.46e ต่อ 1 อะตอมของ As และอะตอมของ Ga มีประจุไฟฟ้าลัพท์เท่ากับ +0.46e ประจุที่เกิดจากการ

เคลื่อนย้ายเหล่านี้เรียกว่า effective charge ซึ่งทำให้เกิดการผสมกันของแรงยึดเหนี่ยวแบบไอออนิค และโควาเลนท์ แต่อย่างไรก็ดีอิทธิพลส่วนใหญ่ของแรงยึดเหนี่ยวมาจากแรงยึดเหนี่ยวแบบโควาเลนท์ และเนื่องจากการที่มีประจุไฟฟ้าลัพท์ต่างกัน สารพวกนี้จึงเป็นพวกมีขั้ว (polar) จะเกิดโพลาไรซ์เมื่อมีสนามไฟฟ้าผ่านและมีค่าคงตัวไดอิเลคตริค (dielectric constant) สำหรับในสารประกอบกลุ่ม สอง-หก การเคลื่อนย้ายของประจุมีมากขึ้น คือประมาณ 0.48e ต่อ 1 อะตอม และคุณสมบัติของไอออนิคกับความมีขั้วก็จะมากขึ้นด้วย

สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบประเภท ABC (ternary compound) ก็มีความสำคัญเช่นกัน สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้ที่รู้จักกันดีจะอยู่ในฟอร์ม 245_2 และ 136_2 เมื่อตัวเลข 1,2, 3,4,5,6 เป็นตัวเลขของธาตุในคอลัมน์นั้นๆ ตัวอย่างของกลุ่ม 245_2 เช่น $CdGeAs_2$, $CdSnP_2$, $ZnGeP_2$ และตัวอย่างกลุ่ม 136_2 เช่น $AgInSe_2$, $AgInS_2$, $AgGaS_2$, $CuAlS_2$ โครงสร้างผลึกพวกนี้ยังคงมีลักษณะคล้ายๆ ผลึกเพชร

เรื่องราวของสารกึ่งตัวนำบางชนิดที่สำคัญ จะได้กล่าวถึงอีกครั้งหนึ่งในบทสุดท้าย หลังจากที่ได้เข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำแล้ว

1.3 <u>แรงยึดเหนี่ยว</u>

แรงยึดเหนี่ยวของอะตอมในผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นแรงยึงเหนี่ยวประเภทโควาเลนท์ อะตอมแต่ละตัวถูกล้อมรอบด้วยอะตอมอื่น 4 อะตอมในรูปทรงเทตระฮีดรอน แรงยึดเหนี่ยวเกิจากการคาบเกี่ยวกัน (overlap) ของการกระจายของประจุ ในสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบบางตัวจะมีแรงยึดเหนี่ยวบางส่วนที่เป็นประเภทไอออนิคผสมเข้ามา แต่อย่างไรก็ดีแรงยึดเหนี่ยวประเภทโควาเลนท์ยังคงเด่นชัดกว่า แรงยึดเหนี่ยวของอะตอมประเภทนี้มีรายละเอียดอยู่แล้วในวิชาฟิสิกส์ของของแข็ง ซึ่งพอสรุปได้ว่าเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง แต่เกี่ยวพันกับทิศทางหรือตำแหน่งของการยึดกันที่แน่นอน ดังนั้นผลึกพวกนี้จึงมักจะเปราะ

บทสรุป

<u>สารกึ่งตัวนำ</u>

ที่ $0^{o}K$ สารกึ่งตัวนำมีแถบพลังงานเช่นเดียวกับอโลหะ แต่มีความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่า ($\sim$ 1eV) ดังนั้นที่ $T > 0^{o}K$ จะมีอิเลคตรอนบางส่วนจากตอนบนของแถบวาเลนซ์โลดข้ามช่องว่างแถบพลังงานขึ้นมายังตอนล่างของแถบความนำ สถานะว่างอิเลคตรอนในแถบวาเลนซ์เรียกว่าโฮล อิเลคตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบ - วาเลนซ์จะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นในสารกึ่งตัวนำเมื่อมีสนามไฟฟ้า

<u>โครงสร้างผลึก</u>

สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุจะมีโครงสร้างแบบผลึกเพชร ได้แก่ธาตุในคอลัมน์ สี่ ของตารางธาตุ สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบที่รู้จักกันดีได้แก่กลุ่ม สาม-ห้า, สี่-สี่, สอง-หก สารประกอบพวกนี้มีโครงสร้างแบบซิงค์ซัลไฟด์

<u>แรงยึดเหนี่ยว</u>

แรงยึดเหนี่ยวของสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะเกิดจากบอนด์แบบโควาเลนท์ ซึ่งมีความแข็งแรงแต่เกี่ยวพันกับตำแหน่งของการยึดกันที่แน่นอน ดังนั้นจึงเปราะ

คำถามท้ายบท

1. จงอธิบายถึงความแตกต่างของอโลหะและสารกึ่งตัวนำ ในเรื่องการนำไฟฟ้ามาให้เข้าใจ โดยใช้รูปจำลองแถบพลังงาน

2. ที่ว่าแรงยึดเหนี่ยวแบบโควาเลนท์เกี่ยวพันกับทิศทางหรือตำแหน่งที่แน่นอนนั้น สามารถจะอธิบายได้อย่างไร

3. จงเขียนโครงสร้างผลึกของ GaAs.