

บทที่ 8

ฟิสิกส์สถานะของแข็งเบื้องต้น

(Introduction to solid state physics)

8.1 บทนำ

สสารที่มีสถานะเป็นของแข็งสามารถจำแนกออกตามชนิดของพันธะ และการจัดเรียงตัวของอะตอมได้หลายประเภท ซึ่งในบทเรียนนี้จะกล่าวไว้ในส่วนแรก รวมทั้งสมบัติการเป็นฉนวน ตัวนำ และสารกึ่งตัวนำของของแข็ง มีการเปรียบเทียบการอธิบายโดยทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่าและตามแบบกลศาสตร์ควอนตัม และการจำแนกของของแข็งออกเป็น ฉนวน ตัวนำและสารกึ่งตัวนำ โดยใช้ทฤษฎีควอนตัมเบื้องต้น ได้แก่ ทฤษฎีแถบพลังงาน มีการกล่าวถึงสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ซึ่งต่างจากสารกึ่งตัวนำที่เจือปน โดยจะทำให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจคุณลักษณะที่สำคัญของฉนวน ตัวนำ และสารกึ่งตัวนำได้ดี ซึ่งของแข็งมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมากกว่าของเหลวและแก๊ส จึงทำให้ของแข็งมีความแข็งแรงมาก เมื่อเทียบกับของเหลวและแก๊ส และมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจึงทำให้เกิดรูปทรงทางเรขาคณิตเกิดเป็นผลึกขึ้น อาจจำแนกตามการจัดเรียงของอนุภาคตามชนิดของของแข็งได้เป็นของแข็งผลึกและของแข็งอสัณฐาน เนื่องจากของแข็งบางชนิดจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบทำให้ไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิตเกิดขึ้น หรือจำแนกตามแรงดึงดูดระหว่างของแข็งที่เกิดขึ้น ได้แก่ ผลึกไอออนิก ผลึกโมเลกุล ผลึกโลหะ และผลึกโควาเลนต์ ผลึกที่เกิดขึ้นจึงมีรูปทรงทางเรขาคณิตในรูปสามมิติที่แตกต่างกัน ในบทนี้จะเป็นการอธิบายสมบัติของของแข็ง ซึ่งจำแนกประเภทของแข็ง โครงผลึก ระบบผลึก และแลตทิซบราว เป็นต้น ซึ่งทำให้เข้าใจโครงสร้างและสมบัติของของแข็ง นำไปสู่การใช้ประโยชน์ทางด้านเทคโนโลยี และนวัตกรรมต่อไป

8.2 สถานะทางฟิสิกส์ของสสาร (Physics state of matter)

เมื่ออะตอมและโมเลกุลจำนวนมากมาอยู่ใกล้กัน ลักษณะของอันตรกิริยาระหว่างอะตอมและโมเลกุลเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสถานะก๊าซ ของเหลว หรือของแข็งที่ก่อรูปขึ้นมา โดยในบทเรียนนี้จะ

กล่าวถึงสสารที่มีสถานะของแข็ง โดยแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ของแข็งผลึก (Crystalline solids) และของแข็งอสัณฐาน (Amorphous solids) สำหรับของแข็งผลึกจะประกอบด้วยอะตอมที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบหรือเป็นคาบในสามมิติ ส่วนของแข็งอสัณฐานอะตอมหรือโมเลกุลจะไม่มี การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เช่น แก้ว ไม้ และพลาสติก เป็นต้น อย่างไรก็ตามเราสามารถพบของแข็งบางชนิดที่อยู่ในรูปทั้งผลึกและอสัณฐาน เช่น โบรอน ไตรออกไซด์ B_2O_3 เป็นต้น ซึ่งพลังงานยึดเหนี่ยวของผลึกจะเป็นตัววัดเสถียรภาพของผลึก ยังมีพลังงานยึดเหนี่ยวมาก พลังงานที่ต้องใช้ในการแยกอะตอมออกมาเป็นอะตอมย่อย ๆ ยังมีค่ามาก พลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับพลังงานของผลึกในสถานะพลังงานต่ำสุดหรือที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ลบด้วยผลรวมของพลังงานสถานะพื้นของอะตอมเดี่ยว ๆ โดยหน่วยของพลังงานจะเป็นอิเล็กตรอน โวลต์ต่ออะตอมหรือต่อโมเลกุล ซึ่ง 1 eV ต่ออะตอม จะมีค่าเท่ากับ 23.052 กิโลแคลอรีต่อโมล

8.2.1 การจำแนกประเภทของแข็ง

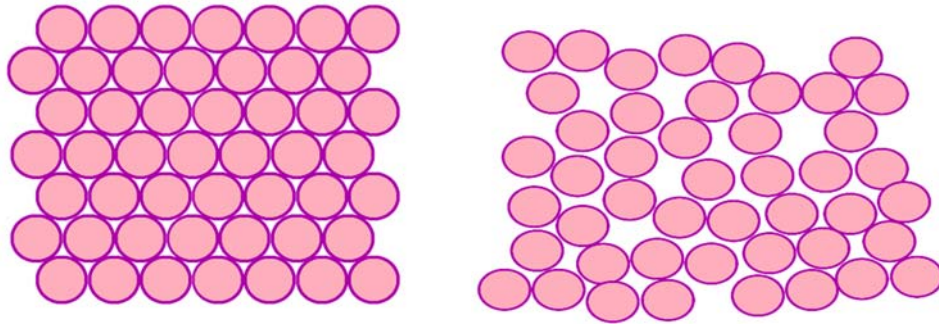
สำหรับการจำแนกประเภทของของแข็งจะแบ่งตามการจัดเรียงของอนุภาค ได้แก่ ผลึกและอสัณฐาน และการจำแนกตามชนิดของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค ได้แก่ ผลึกโลหะ ผลึกไอออนิก ผลึกโมเลกุล และผลึกโคเวเลนต์ การจำแนกประเภทของแข็งตามการจัดเรียงอนุภาคของแข็งตามการจัดเรียงของอนุภาค สามารถจำแนกได้เป็นของแข็งผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและของแข็งอสัณฐานที่มีการจัดเรียงไม่เป็นระเบียบ

1. ของแข็งผลึก

อนุภาคของของแข็งมีการจัดเรียงอนุภาคชิดกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้เกิดเป็นรูปทรงทางเรขาคณิต ผิวหน้าเรียบและมีขอบตัดมุมระหว่างผิวหน้าที่แน่นอน ของแข็งประเภทนี้ เรียกว่าของแข็งผลึก เมื่อผลึกเกิดการแตกออกจะทำให้บางส่วนของผลึกหลุดออกไป แต่ยังคงมีบางส่วนหลงเหลืออยู่ในรูปผลึกแต่อาจเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้รูปทรงภายนอกไม่เป็นไปตามรูปทรงทางเรขาคณิต แต่ยังคงสมบัติความเป็นผลึกอยู่ หากของแข็งอยู่ในรูปผลึก จะทำให้สมบัติบางอย่าง เช่น การนำไฟฟ้า หรือดรชนีการหักเหของแสงแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง เรียกสมบัตินี้ว่า ไอโซทรอปี (Isotropy) ซึ่งเกิดขึ้นกับทิศทางการตกผลึกทั้งหมด โดยแม้จะเป็นธาตุเดียวกัน แต่อาจจะเกิดรูปผลึกได้แตกต่างกันตามการจัดเรียงตัวของของแข็ง

2. ของแข็งอสัณฐาน

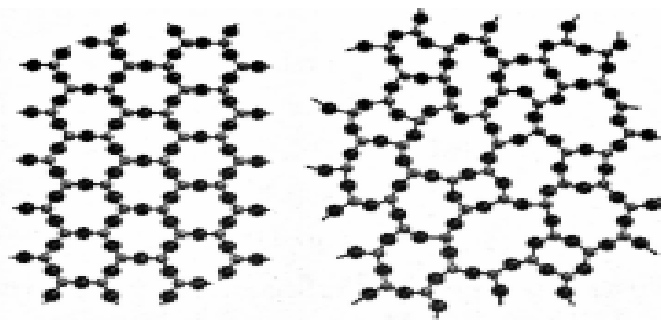
ในขณะที่ของแข็งบางประเภท อนุภาคมีการเรียงตัวชิดกันแต่ไม่เป็นระเบียบ จึงไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิต เรียกของแข็งประเภทนี้ว่า ออสัณฐาน (Amorphous) ของแข็งอสัณฐานไม่มีจุดหลอมเหลวที่เด่นชัด เมื่อเทียบกับของแข็งผลึกที่มีจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน



ก) ของแข็งผลึก

ข) ของแข็งอสัณฐาน

ภาพที่ 8.1 แสดงวิภาคของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวแบบ ก) ของแข็งผลึก ข) ของแข็งอสัณฐาน ตัวอย่างของแข็งอสัณฐาน เช่น พลาสติก แก้ว โดยแก้วเป็นชนิดของแข็งอสัณฐานที่มีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งไม่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ แต่หากมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจะได้เป็นของแข็งผลึก คือ ควอตซ์ (Quartz) จะเห็นได้ว่าแม้จะมีสารที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกันนั่นคือ ซิลิกา แต่หากการจัดเรียงตัวไม่เหมือนกันจะทำให้ได้ทั้งรูปผลึก (ก) และอสัณฐาน (ข) จากสารที่เป็นองค์ประกอบเดียวกัน โดยอนุภาคขนาดเล็กแทนอะตอมของซิลิกอน และอนุภาคขนาดใหญ่สีดำเข้มแทนอะตอมของออกซิเจน



ก) ของแข็งผลึก

ข) ของแข็งอสัณฐาน

ภาพที่ 8.2 การจัดเรียงตัวของซิลิกาแบบผลึกและอสัณฐาน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Chang, R., 2010

8.3 พันธะของแข็ง (Bonding of solid)

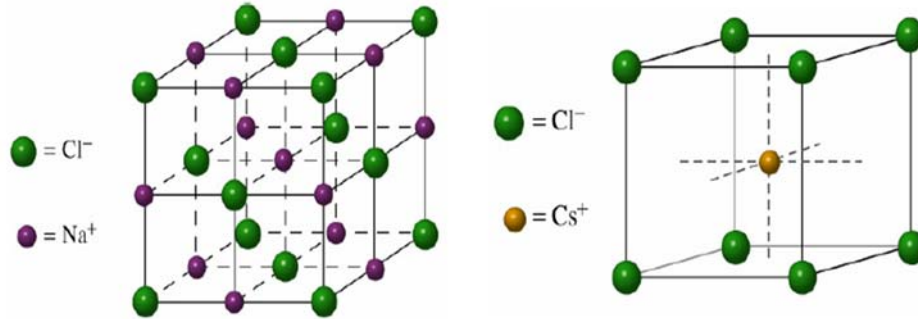
พลังงานยึดเหนี่ยวของผลึกเป็นตัววัดความมีเสถียรภาพของผลึก ยิ่งผลึกมีพลังงานยึดเหนี่ยวมากจำนวนพลังงานที่ใช้ในการแยกออกเป็นอะตอมย่อย ๆ ยิ่งมากด้วย พลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับพลังงานของผลึกในสถานะพลังงานต่ำสุด ลบด้วยผลรวมของพลังงานสถานะพื้นของอะตอมเดี่ยว ๆ ดังนั้นพลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าเป็นลบและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของผลึก โดยปกติพลังงานยึดเหนี่ยวมีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ต่ออะตอมหรือต่อ โมเลกุล สำหรับพันธะของแข็งผลึกแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ตามลักษณะและความแข็งแรงของพันธะ ได้แก่

1. พันธะไอออนิก (ionic bond) พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 5 – 10 eV ต่อ โมเลกุล เช่น โซเดียมคลอไรด์
 2. พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 10 eV ต่อ โมเลกุล เช่น เพชร
 3. พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 0.5 eV ต่อ โมเลกุล เช่น น้ำแข็ง
 4. พันธะโมเลกุล (molecule) พลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าสูงถึง 0.1 eV เช่น มีเทน
 5. พันธะโลหะ (metallic bonded) พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 1-5 eV ต่อ โมเลกุล เช่น โซเดียม
- แรงที่ทำให้อะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบในผลึกเป็นแรงเดียวกับในพันธะโมเลกุล บวกแรงเพิ่มเติมอีกชนิดหนึ่ง เช่น แกลือธรรมดา (NaCl) แรงดึงดูดคือแรงตามกฎคูลอมบ์ระหว่างอนุภาคประจุไม่มีทิศทางที่แน่นอน ส่วนอะตอมคาร์บอน ซิลิคอน เจอร์เมเนียม และดีบุกในโครงสร้างเพชรเป็นตัวอย่างของผลึกโคเวเลนต์ธาตุที่อยู่ในหมู่ IV ของตารางธาตุแต่ละอะตอมมีอิเล็กตรอนสี่ตัวในระดับชั้นนอกสุด แต่ละอะตอมสร้างพันธะโคเวเลนต์กับแต่ละสี่อะตอมข้างเคียงที่มุมของทรงสี่ด้าน พันธะเหล่านี้ขึ้นกับทิศทาง ชนิดของพันธะมีดังต่อไปนี้

8.3.1 พันธะไอออนิก

พันธะไอออนิกเป็นพันธะที่แรงระหว่างอะตอมเกิดจากการย้ายอิเล็กตรอนทำให้อะตอมกลายเป็นไอออนที่มีประจุ + และ - ตรงข้ามกัน ประกอบด้วยไอออนบวกและลบจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงและไม่มีทิศทาง โดยทั่วไปแล้วมีโครงสร้าง 2 ประเภทที่พบใน

ผลึก คือ โครงสร้างที่มีอะตอมอยู่ที่ผิวทุกด้าน (face-centered cubic, fcc) และโครงสร้างแบบที่มีจุดศูนย์กลางในตัวและที่มุมทุกมุม (body-centered cubic, bcc)



ภาพที่ 8.3 ผลึกของโซเดียมคลอไรด์ และซีเซียมคลอไรด์

ที่มา : Flowers, P. et al., 2017

พลังงานเกาะกัน (cohesive energy) หรือพลังงานศักย์ภายในของผลึกเป็นผลรวมของแรงดูดกันทางไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออน กับแรงผลักรังสีสั้น เนื่องจากการผลักกันของนิวเคลียส และการผลักกันของอิเล็กตรอนในชั้นปิดของไอออนต่างชนิดกัน

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วมีโครงสร้างผลึกดังกล่าวที่พบอยู่มี 2 ประเภท คือ

1. โครงสร้างแบบลูกบาศก์ที่มีอะตอมจุดศูนย์กลางที่หน้าทุกด้าน เช่น โซเดียมคลอไรด์ ดังภาพที่ 8.3
2. โครงสร้างแบบลูกบาศก์ที่มีจุดศูนย์กลางในตัว เช่น ซีเซียมคลอไรด์ ระยะห่างระหว่างไอออนที่เหมือนกันใน NaCl คือ 5.62 \AA และใน CsCl คือ 4.11 \AA จำนวนเลขคอร์ดิเนชัน เป็นจำนวนของไอออนต่างชนิดกันที่ใกล้ที่สุดรอบ ๆ ไอออนแต่ละตัวในผลึกมีค่าเท่ากับ 6 สำหรับ NaCl และ 8 สำหรับ CsCl

พลังงานยึดเหนี่ยว หรือพลังงานเกาะกันหรือพลังงานศักย์ภายในของพันธะไอออนิก เป็นผลรวมของ ก) แรงดูดกันทางไฟฟ้าสถิตรวมระหว่างไอออน ข) แรงผลักรังสีสั้น เนื่องจากการผลักกันของนิวเคลียส และการผลักกันของอิเล็กตรอนในเซลล์ปิดของไอออนต่างชนิดกัน พลังงานศักย์ทางไฟฟ้าสถิตรวมของผลึกไอออนิก กำหนดโดย

$$U_{\text{ดึงดูด}} = -\alpha k \frac{e^2}{r} \quad (8-1)$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างไอออนสองตัวที่ใกล้ที่สุด

α คือ ค่าที่แมดเดอลุง (Madelung's constant) ซึ่งขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของผลึก ส่วนมาก

มีค่าอยู่ระหว่าง 1.6 และ 1.8 สำหรับผลึก fcc เช่น NaCl ค่า α เท่ากับ 1.7627

ต่อมาแมกซ์บอร์นได้ประมาณแรงผลึกโดยศักย์

$$U_{\text{ผลึก}} = Bk \frac{e^2}{r^m} \quad (8-2)$$

เมื่อ B และ m เป็นค่าคงตัว n มากกว่า 1 ทำให้เกิดแรงพิสัยสั้น ดังนั้นพลังงานศักย์รวม U_p คือ

$$U_p = -\alpha k \frac{e^2}{r} + \frac{B}{r^m} \quad (8-3)$$

ที่ระยะสมดุล $r = r_0$ พลังงานศักย์จะมีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือ

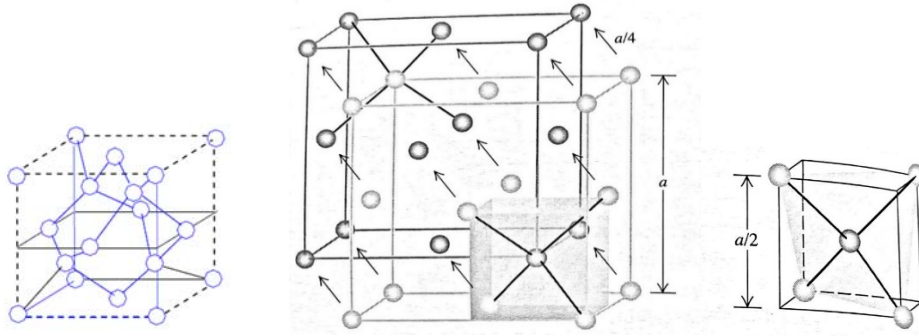
$$\begin{aligned} \left(\frac{dU_p}{dr} \right) &= 0 \\ -ke^2 \left(-\frac{\alpha}{r_0^2} - \frac{mB}{r_0^{m+1}} \right) &= 0 \\ \text{ได้} \quad B &= \frac{\alpha(r_0^{m-1})}{m} \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานศักย์ที่ระยะสมดุล U_0 คือ

$$U_0 = -\alpha k \frac{e^2}{r_0} \left(1 - \frac{1}{m} \right) \quad (8-4)$$

8.3.2 พันธะโคเวเลนต์

พันธะโคเวเลนต์ในอะตอมคล้ายกับพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุล แต่ละอะตอมในพันธะใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน อิเล็กตรอนที่เข้าร่วมกันนี้จะอยู่ระหว่างอะตอมทั้งสองมากกว่าบริเวณอื่นๆ ตัวอย่างของผลึกโคเวเลนต์ คือ เพชร ซิลิกอน ซิลิกอนคาร์ไบด์ และเจอร์มาเนียม ผลึกโคเวเลนต์มีพลังงานเกาะกัน ประมาณ 6 ถึง 12 eV ต่ออะตอม ดังนั้นจึงแข็งแรงมาก ซึ่งทำให้ยากต่อการทำลายอย่างที่ทราบกันดีว่า เพชรเป็นสารที่แข็งที่สุดและซิลิกอนคาร์ไบด์ใช้เป็นวัสดุสำหรับขัดในทางอุตสาหกรรม พันธะโคเวเลนต์มีจุดหลอมเหลวสูงมาก และไม่ละลายในของเหลวหลายชนิด ผลึกโคเวเลนต์มีอิเล็กตรอนอิสระน้อยมาก เช่นเดียวกับผลึกไอออนิก ดังนั้นพันธะโคเวเลนต์นี้จึงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่เร็ว มีความโปร่งแสงเนื่องจากการไม่มีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้น



ภาพที่ 8.4 โครงสร้างผลึกของเพชร

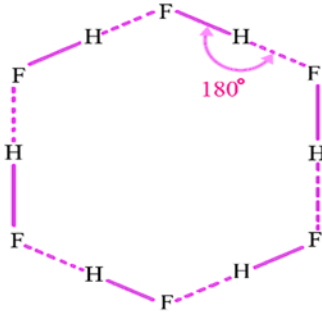
8.3.3 พันธะไฮโดรเจน

พันธะไฮโดรเจนมีความคล้ายกับพันธะไอออนิก เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนมีแรงพันธะอ่อน และยังเป็นไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าอย่างถาวร แสดงว่า โมเลกุลมีความเป็นขั้ว จุดหลอมเหลวและจุดเดือดของผลึกจะมีค่าค่อนข้างสูง พันธะไฮโดรเจนอาจจะเกิดขึ้นได้ เช่น ในสารประกอบไฮโดรด์ของอโลหะ ซึ่งมีอะตอมหนึ่งในโมเลกุลมีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนจากไฮโดรเจนได้ดี ทำให้ไฮโดรเจนอะตอมกลายเป็นไอออนบวก โมเลกุลของน้ำสถานะของแข็งจะมีโครงสร้างเตตระฮีดรอล การที่มีโครงสร้างเปิดเป็นเหตุให้โครงสร้างของน้ำแข็งมีปริมาตรมากกว่าน้ำ หรืออาจกล่าวง่ายๆว่า น้ำแข็งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เมื่อน้ำแข็งหลอมเหลวพันธะของไฮโดรเจนจะแตกตัวออกทำให้เป็นกลุ่มเล็ก ๆ หมายความว่าความหนาแน่นของน้ำที่ 0°C จะน้อยกว่าที่ 4°C ซึ่งเป็นจุดที่น้ำมีความหนาแน่นมากที่สุด

8.3.4 พันธะโมเลกุล

พันธะโมเลกุลเกิดการรวมตัวของโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ทำให้โมเลกุลแบบนี้ไม่มีไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าอย่างถาวร อิเล็กตรอนในโมเลกุลจะวางตัวเป็นกลุ่มสมบูรณ์ ดังนั้นจึงไม่มีการเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอมในโมเลกุล เช่นก๊าซเฉื่อยสถานะของแข็งที่จัดเป็นผลึกโมเลกุลเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนในสถานะของแข็ง โมเลกุลในผลึกโมเลกุลจะจับกันด้วยแรงระหว่างโมเลกุลที่เรียกว่า แรงวันเดอร์วาลส์ แรงนี้เป็นแรงอ่อนมาก อย่างไรก็ตามเมื่อมีพันธะไอออนิก พันธะโคเวเลนต์ หรือพันธะโลหะพันธะวันเดอร์วาลส์ก็สามารถจะตอบสนองต่อการเกิดการควบแน่นจากสถานะก๊าซเป็นของเหลว และเกิดการเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็ง แม้ว่าโมเลกุลซึ่งเป็นผลึกโมเลกุลนี้จะไม่ไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าอย่างถาวรแต่ก็ปรากฏไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้าอย่างชั่วคราวได้ จึงทำให้เกิดแรงวันเดอร์

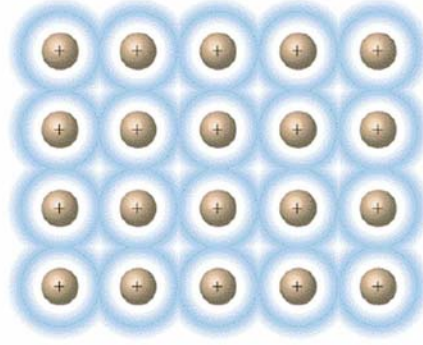
วาล์วการที่มีพลังงานต่ำมากนี้เองทำให้ผลึกโมเลกุลมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดต่ำมาก โดยคุณสมบัติที่สำคัญของสสารทั้งก้อน เช่น ความตึงผิว แรงเสียดทาน และความหนืด เกิดขึ้นเนื่องจากแรงวันเดอร์วาลส์



ภาพที่ 8.5 โครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนฟลูออไรด์

8.3.5 พันธะโลหะ

ถ้าอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ยึดกันอย่างอ่อนๆ ถูกนำเข้ามาใกล้ๆ กันเพื่อก่อรูปเป็นของแข็ง อิเล็กตรอนวาเลนซ์แต่ละตัวเฉลี่ยแล้วจะอยู่ใกล้กับนิวเคลียสตัวหนึ่งตัวใดมากกว่าที่มันจะอยู่ในกรณีอะตอมเดี่ยวๆ ดังนั้นพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนในผลึกจะน้อยกว่าของอิเล็กตรอนในอะตอมเดี่ยว พลังงานศักย์ที่ลดลงนี้นำไปสู่การก่อรูปของพันธะโลหะ แต่ในขณะเดียวกันนั้นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนวาเลนซ์จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนตัวนอกจึงเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนเหล่านี้ในผลึกไม่ได้เป็นของไอออนตัวใดตัวหนึ่ง แต่จะเคลื่อนที่อย่างอิสระตลอดทั้งแลตทิซผลึก และเราเรียกว่ามันเป็นก๊าซอิเล็กตรอน พันธะโลหะเป็นผลจากการดึงดูดระหว่างแกนไอออนบวกและก๊าซอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้ในโลหะอาจมีพลังงานระหว่างศูนย์และค่าที่มากที่สุด ซึ่งเรียกว่า พลังงานเฟอร์มิ การที่โลหะมีอิเล็กตรอนอิสระ เป็นผลให้โลหะเป็นตัวนำความร้อนและตัวนำไฟฟ้าที่ดีเนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้สามารถเคลื่อนพลังงานจำนวนต่างๆ ได้ และสามารถเคลื่อนโฟตอนในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งเป็นการอธิบายว่าทำไมโลหะจึงทึบแสง พันธะโลหะนั้นแข็งแรงน้อยกว่าพันธะไอออนิกหรือพันธะโคเวเลนต์ แต่มากกว่าพันธะวันเดอร์วาลส์



ภาพที่ 8.6 แบบจำลองของพันธะโลหะ

ที่มา : Petrucci, Harwood & Herring, 2011

8.4 ทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระของโลหะ (Theory of free electron in metal)

คุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติแม่เหล็กของของแข็งถูกกำหนดด้วยประจุอินทรินซิก (intrinsic charge) โมเมนต์แม่เหล็ก และการกระจายของอิเล็กตรอนรอบ ๆ อะตอม เมื่อจำแนกของของแข็งตามการจัดตัวของอิเล็กตรอน อาจแบ่งได้เป็น ก) ฉนวน ข) โลหะ ในกรณีของ ฉนวน อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะยึดแน่นอยู่กับอะตอมมีอิเล็กตรอนจำนวนน้อยมากที่เคลื่อนที่อย่างอิสระไปในผลึก สำหรับโลหะมีอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระไปในผลึกได้ ในขณะที่ฉนวน อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะยึดแน่นอยู่กับอะตอมมีอิเล็กตรอนจำนวนน้อยมากที่เคลื่อนที่อย่างอิสระได้ต่อไปพิจารณาคุณสมบัติของโลหะ โดยใช้ทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระอย่างคร่าวๆ

8.4.1 ทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระตามแบบยุคเก่า

พอล คาร์ล ลักวิกดรูค (Paul Karl Ludwig Drude) ในปี ค.ศ.1900 ได้เสนอว่าโลหะไอออนบวกอยู่นิ่งกับที่แต่อิเล็กตรอนวาเลนซ์ มีอิสระสามารถเคลื่อนที่ไปไหนมาไหนได้ภายในผลึก อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้เรียกว่า อิเล็กตรอนตัวนำ (conduction electrons) และอิเล็กตรอนในชั้นปิด เรียกว่า อิเล็กตรอนแกนไอออน ต่อมาในปี ค.ศ. 1909 เอช เอ ลอเรนตซ์ (H.A.Lorentz) ได้เสนอแนวความคิดร่วมด้วย ทำให้เกิดการตั้งทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่าและของดรูค-ลอเรนตซ์ ได้ดังนี้

- 1) ใช้สถิติแบบดั้งเดิมของแมกซ์เวลล์-โบลทซ์มานน์กับก๊าซอิเล็กตรอนอิสระ
- 2) การผลักกันระหว่างอิเล็กตรอนอิสระละทิ้งได้

3) ไอออนบวกทำให้เกิดสนามของศักย์คงตัว

ทฤษฎีนี้ประสบความสำเร็จในการอธิบายการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า ได้อย่างดีเช่น การอธิบายกฎของโอห์ม และความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อน และการนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามพบว่าไม่สามารถอธิบายการนำไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิได้ และความร้อนจำเพาะของอิเล็กตรอนในโลหะ ตลอดจนคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เช่น ไดอะแมกเนติกซ์เซพติบิลิตี (diamagnetic susceptibility) โดยความขัดแย้งที่เกิดขึ้นจากทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่า สามารถสรุปได้เป็น 2 ประเด็น

ก. ตามทฤษฎียุคเก่าเราจะได้ว่า
$$\sigma = \frac{10^6}{\sqrt{T}}$$

เมื่อ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ และ σ คือสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะ แต่จากการทดลองเราพบว่า σ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\frac{1}{T}$ ในทางตรงข้ามทฤษฎียุคเก่าทำนายอัตราส่วนระหว่างการนำไฟฟ้า σ กับการนำความร้อน K ได้อย่างถูกต้องว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ T คือ $\frac{1}{TK}$ มีค่าเท่ากับค่าคงตัว ≈ 2.5 โดยอัตราส่วน $\frac{\sigma}{K}$ นี้เรียกว่า อัตราส่วนไวด์มันน์ - ฟรานซ์ (Wiedemann-Franze)

ข. ความร้อนจำเพาะ

ตามทฤษฎีจลน์ของก๊าซ ถ้าก๊าซอิเล็กตรอนประพฤติตัวเหมือนก๊าซอุดมคติความร้อนจำเพาะควรมีค่าเท่ากับ $\frac{3}{2}R$ เมื่อ R เป็นค่าคงที่ของก๊าซ แต่จากการทดลองพบว่า ความร้อนจำเพาะของก๊าซอิเล็กตรอนอิสระขึ้นกับอุณหภูมิตามความสัมพันธ์ C_V อิเล็กตรอนเท่ากับ $10^{-4}RT$ ดังนั้นจะเห็นข้อบกพร่องของทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่า ทำให้มีการเสนอแนวความคิดใหม่ขึ้นมา

8.4.2 ทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระตามแบบกลศาสตร์ควอนตัม

ซอมเมอร์เฟลด์ (Sommerfeld) ในปี ค.ศ. 1928 ได้เสนอเปลี่ยนแปลงแก้ไขทฤษฎียุคเก่า 2 ประการ ประการแรกต้องพิจารณาอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ โดยใช้กลศาสตร์ควอนตัม ซึ่งนำไปสู่แนวความคิดที่ว่าอิเล็กตรอนเหล่านี้มีพลังงานเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง ประการที่สอง ต้องใช้สถิติเฟอร์มิดิแรกกับก๊าซอิเล็กตรอน ซึ่งแบ่งการพิจารณาดังนี้

1. การประยุกต์ทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม และสถิติเฟอร์มี-ดิแรค กับอิเล็กตรอนอิสระ ในโลหะ ตามที่ชอเมอร์เฟลด์ได้กล่าวคือ สักภายในผลึกโลหะอาจสมมุติได้ว่ามีค่าคงที่ ดังนั้นจึงไม่มีแรงลัพท์กระทำต่ออิเล็กตรอนในผลึก การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนถูกจำกัดด้วยกำแพงศักย์สูงมากที่บริเวณขอบของผลึก เพื่อความง่ายจะพิจารณาผลึกเป็นกล่องรูปลูกบาศก์ ความยาว L บรรจุอิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีพลังงานของอิเล็กตรอนในกล่องที่กว้าง L กรณีหนึ่งมิติ คือ

$$E_x = n_x^2 \frac{h^2}{8mL^2}, \quad n_x = 1, 2, 3, \dots$$

เมื่อ m เป็นมวลของอิเล็กตรอน

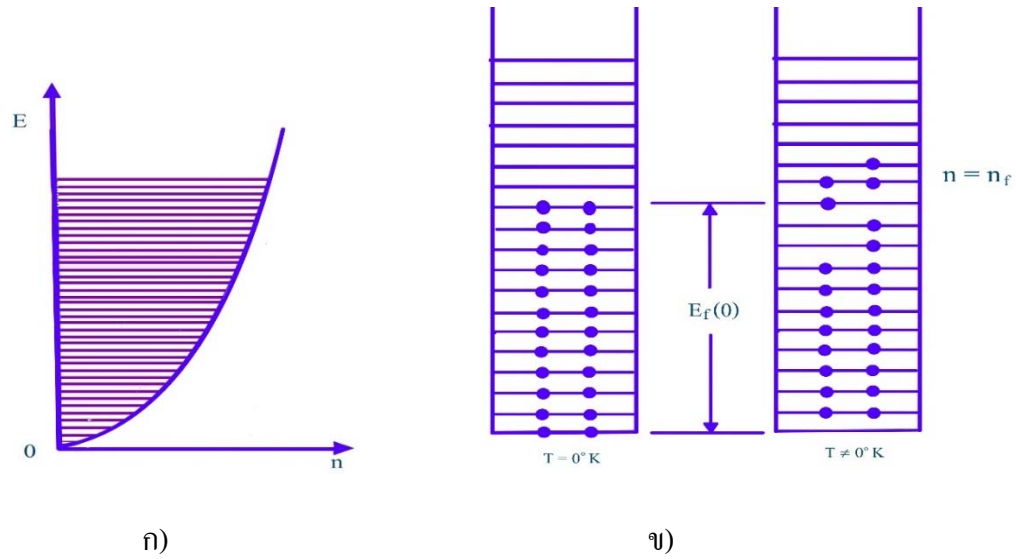
สำหรับกรณีสามมิติ อาจเขียนได้เป็น

$$E_n = (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \frac{h^2}{8mL^2}$$

$$E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2}$$

$$\text{เมื่อ } n^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

พิจารณาภาพที่ 8.7 ด้านล่าง แสดงกราฟของ E กับ n แม้ค่า L จะน้อย เช่น $L = 0.1$ เซนติเมตร ความห่างระหว่างระดับพลังงานคือ 10^{-4} eV ซึ่งมีค่าน้อยมากจนสามารถพิจารณาได้ว่าระดับพลังงานเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกัน ลักษณะเป็นกึ่งต่อเนื่อง แต่ละระดับพลังงานกำหนดด้วยเลขควอนตัม 4 ตัว กล่าวคือ n_x คือเลขควอนตัมหลัก n_y คือเลขควอนตัมออร์บิทัล n_z คือเลขควอนตัมแม่เหล็ก และ m คือเลขควอนตัมสปิน เมื่อ $m_s = \pm \frac{1}{2}$ เนื่องจาก m_s มีค่าได้เพียง 2 ค่าเท่านั้น แต่ละระดับพลังงานจึงมีอิเล็กตรอนอยู่ได้เพียง 2 ตัว ดังภาพ 8.4 ข) เป็นฟังก์ชันของ n_f และ L พลังงานของอิเล็กตรอนสูงสุดค่านี้ที่ล่องจองกับ $n = n_f$ ที่ ศูนย์องศาสัมบูรณ์ เรียกว่า พลังงานเฟอร์มีที่จุดศูนย์ (zero point Fermi energy), $E_f(0)$



ภาพที่ 8.7 ก) กราฟของ E กับ n แสดงระดับกึ่งต่อเนื่องสำหรับอนุภาคในกล่อง 1 มิติที่มี L มาก

ข) ระดับพลังงานโดยอิเล็กตรอน

โดยปกติแล้วหากอยากทราบสถานะพื้นหรือพลังงานเฟอร์มิในเทอมของจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดและขนาดของกล่อง สมมติว่า N อิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดในระบบคือ NL^3 ให้แต่ละจุดแลตทิซมีอิเล็กตรอนที่มีเลขควอนตัม n_x, n_y, n_z และ m_s มีพลังงานเฟอร์มิที่จุดศูนย์

$$E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3}$$

สมการข้างต้นจะเห็นว่า พลังงานเฟอร์มิ เป็นฟังก์ชันของจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (N)

ตัวอย่างที่ 8.1 จงหาระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่บรรจุในกล่องยาว 0.1 nm ซึ่งเป็นกล่องที่มีขนาดเท่ากับอะตอม

วิธีทำ	จาก	$E_n = n^2 \frac{\hbar^2}{8mL^2}$ $= n^2 \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2}{8(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.1 \times 10^{-9} \text{ m})^2}$ $= 6 \times 10^{-18} n^2 \text{ J}$ $= 38 n^2 \text{ eV}$
--------	-----	--

จะสังเกตเห็นว่าในกรณีนี้ระดับพลังงานจะแยกกันด้วยขนาดพลังงานมากพอเมื่อเทียบกับพลังงานของอะตอม

คำตอบ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ควอนไทเซชันของพลังงานเป็นส่วนสำคัญสำหรับอิเล็กตรอน และอนุภาคเล็กอื่นๆ เมื่อบรรจุอยู่ในบริเวณที่มีขนาดเท่าอะตอม

ตัวอย่างที่ 8.2 ที่อุณหภูมิตำทองแดงมีความเข้มข้นอิเล็กตรอนอิสระ $8.45 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ โดยการใส่แบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ จงหาพลังงานเฟอร์มิของทองแดงของแข็ง

วิธีทำ เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะ และจาก

$$E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3}$$

$$\begin{aligned} E_F &= \frac{3^{2/3} \pi^{4/3} (1.055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2 (8.45 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})^{2/3}}{2(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})} \\ &= 1.126 \times 10^{-18} \text{ J} = 7.03 \text{ eV} \end{aligned}$$

คำตอบ พลังงานเฟอร์มิของทองแดงเท่ากับ 7.03 อิเล็กตรอน โวลต์

2. การประยุกต์ทฤษฎีกับคุณสมบัติของโลหะ โดยจะใช้ทฤษฎีควอนตัมของอิเล็กตรอนอิสระในการอธิบายคุณสมบัติบางประการได้

2.1 การนำไฟฟ้าของโลหะ ตามทฤษฎีควอนตัมอิเล็กตรอนอิสระในโลหะจะอยู่ในสถานะพลังงานที่กำหนดแน่นอนซึ่งเป็นไปตามสถิติเฟอร์มิ-ดิแรค หากไม่มีสนามภายนอก อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่อย่างสุ่ม หากพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในหนึ่งมิติตามแกน x มองว่าอิเล็กตรอนจำนวนมากจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดในทิศ +x พอกับในทิศ -x ดังนั้นจึงไม่มีกระแสลัพธ์ หากให้สนามไฟฟ้าเข้าไป อิเล็กตรอนจะถูกเร่งไปยังขั้วบวกของสนาม การเร่งนี้ทำให้เป็นการเพิ่มความเร็วและพลังงานให้กับอิเล็กตรอน แต่เฉพาะอิเล็กตรอนที่มีพลังงานใกล้เคียงพลังงานเฟอร์มิเท่านั้น ที่จะได้รับพลังงานพอที่จะกระจายใหม่ อิเล็กตรอนลัพธ์จะเป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้า และมีส่วนช่วยในการนำไฟฟ้า การคำนวณโดยใช้หลักของทฤษฎีนี้แสดงว่า สภาพนำไฟฟ้า σ เป็นสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ T ซึ่งให้ค่าตรงกับผลการทดลอง

2.2 การนำความร้อนของโลหะ ในโลหะการนำความร้อนเกิดขึ้นทั้งจากการสั่นของอะตอมและอิเล็กตรอนอิสระ สำหรับสารที่ไม่ใช่โลหะการนำความร้อนเกิดขึ้นจากการสั่นของอะตอมเป็นหลัก แทนที่จะกล่าวเกี่ยวกับการสั่นของอะตอม เราจะกล่าวถึงในเทอมของโฟนอน จำนวนของโฟนอนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่วิถีอิสระเฉลี่ยของโฟนอน ยังคงมีค่าน้อย ดังนั้นสำหรับสารที่ไม่ใช่โลหะการนำความร้อนจึงมีค่าน้อยมาก ถึงแม้วิถีอิสระเฉลี่ยของโฟนอนในโลหะจะมีค่าน้อย แต่ของอิเล็กตรอนอิสระมีค่ามาก ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระจึงเป็นเหตุให้โลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ทฤษฎีควอนตัมของอิเล็กตรอนอิสระได้ทำนายกฎของไวน์มานน์-ฟรานซ์ที่ว่า $(1/T)(\sigma/k)$ เท่ากับค่าคงที่ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าและสภาพนำความร้อน

2.3 ความร้อนจำเพาะอิเล็กตรอนของโลหะ อาจเขียนได้เป็น อิเล็กตรอนที่มี 3 ระดับขึ้นความเสรี (degrees of freedom)

$$\begin{aligned} C_V &= C_V(\text{อะตอม}) + C_V(\text{อิเล็กตรอน}) \\ &= 3R + \frac{3}{2}R = \frac{9}{2}R \end{aligned}$$

แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าความร้อนจำเพาะของของแข็งทั้งหมดที่อุณหภูมิสูงกว่าค่า ๆ หนึ่งมีค่าเท่ากับ $3R$ ดังนั้นเราต้องกำจัดเทอม $\frac{3}{2}R$ ตามสถิติของเฟอร์มี - ดิแรค ที่อุณหภูมิ T ใดๆ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานในช่วง $E_F \pm kT$ เท่านั้น จึงดูดกลืนความร้อน อัตราส่วนของอิเล็กตรอนเหล่านี้คือ $2kT/E_F$ ดังนั้นความร้อนจำเพาะอิเล็กตรอนกำหนดโดย

$$\begin{aligned} C_V(\text{อิเล็กตรอน}) &= \frac{3}{2}R \times \frac{2kT}{E_F} \\ &= \frac{3RkT}{E_F} \approx \gamma T \end{aligned}$$

เมื่อ γ มีค่าน้อยมาก จึงละทิ้งเทอม $C_V(\text{อิเล็กตรอน})$ และจะได้

$$C_V = C_V(\text{อะตอม})$$

8.5 การนำไฟฟ้าในโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ (Conductivity of metal, insulator, and semiconductor)

ตัวนำไฟฟ้าที่ดีต้องมีความหนาแน่นของประจุพาหะอิสระสูง ขณะที่ความหนาแน่นของประจุพาหะอิสระของฉนวนมีค่าเกือบเป็นศูนย์ สารกึ่งตัวนำเป็นกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนอยู่ระหว่างกลางระหว่าง ค่าของฉนวนและค่าของตัวนำ ที่มีความสำคัญทางเทคโนโลยี ในหัวข้อนี้จะอภิปรายถึงกลไกการนำไฟฟ้าในกลุ่มวัสดุสามชนิดนี้โดยใช้แบบจำลองที่มีพื้นฐานจากแถบพลังงาน

8.5.1 การนำไฟฟ้าของโลหะ

ถ้าวัสดุชนิดหนึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ประจุพาหะภายในวัสดุนั้นจะต้องมีความเป็นอิสระในการที่จะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า เมื่อเราทำการพิจารณาอิเล็กตรอนที่อยู่ในโลหะเป็นประจุพาหะ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเป็นตัวแทนของการเพิ่มขึ้นของพลังงานในระบบ โดยจะส่งผลในรูปของพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน การพิจารณาระบบจะใช้แบบจำลองของระบบที่ไม่โคดเคียวในรูปของพลังงาน จากงานเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ เมื่องานคือ งานที่กระทำไปยังอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับตัวนำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังสถานะพลังงานที่เป็นไปได้ที่อยู่สูงขึ้นไปในแผนภาพระดับพลังงาน เพื่อแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์ เนื่องจากอิเล็กตรอนประพฤติตัวตามสถิติของเฟอร์มิ-ดิแรก ระดับพลังงานทั้งหมดที่อยู่ต่ำกว่าพลังงานเฟอร์มิจะเต็มไปด้วยอิเล็กตรอน และระดับพลังงานที่อยู่เหนือพลังงานเฟอร์มิจะว่างเปล่า พลังงานเฟอร์มิ E_F มีตำแหน่งอยู่ภายในแถบ โดยเป็นตำแหน่งที่บ่งบอกถึงสถานะพลังงานเต็มที่มีค่าสูงสุด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 0 เคลวิน เล็กน้อย อิเล็กตรอนบางตัวจะถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิจนไปสู่ระดับที่เหนือกว่า E_F แต่โดยรวมแล้วเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจากกรณี 0 เคลวิน ถ้าทำการเป็นความต่างศักย์ให้กับโลหะ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานอยู่ใกล้กับพลังงานเฟอร์มิจะต้องการปริมาณพลังงานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป เพื่อให้เข้าถึงสถานะพลังงานว่างใกล้ๆ ที่อยู่เหนือพลังงานเฟอร์มิ ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนในโลหะที่ได้รับการป้อนสนามไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ ก็มีอิสระที่จะเคลื่อนที่ ทั้งนี้เพราะมีระดับว่างมากมายที่เป็นไปได้อยู่ใกล้

กับระดับพลังงานที่ถูกครอบครอง แบบจำลองของโลหะที่ใช้พื้นฐานของทฤษฎีแถบพลังงานแสดงให้เห็นว่าโลหะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม

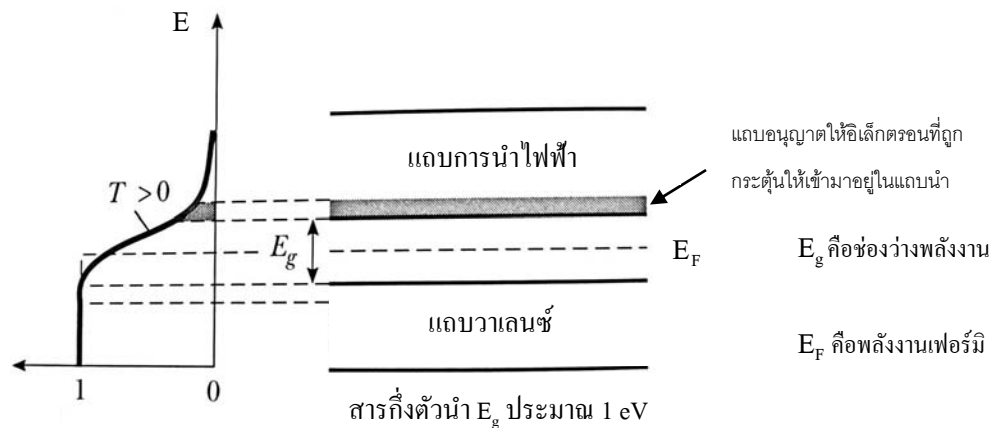
8.5.2 การนำไฟฟ้าของฉนวน

พิจารณาแถบพลังงานที่อยู่นอกสุดสองแถบของวัสดุ โดยแถบที่อยู่ต่ำกว่ามีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม และแถบที่อยู่สูงกว่านั้นว่างที่ 0 เคลวิน แถบที่อยู่ต่ำกว่าหรือแถบเต็ม เรียกว่า แถบวาเลนซ์ และแถบที่อยู่สูงกว่าหรือแถบว่างเรียกว่าแถบนำ โดยพลังงานที่แยกห่างระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำเป็นช่องว่างพลังงานของวัสดุ พลังงานเฟอร์มีมีค่าอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งในช่องว่างพลังงาน โดยนิยามให้พลังงานเฟอร์มีเป็นเหมือนกับพลังงานของสถานะที่ถูกเติมเต็มสูงสุดที่อุณหภูมิศูนย์เคลวินซึ่งอาจกล่าวได้ว่าพลังงานเฟอร์มีควรเป็นจุดบนสุดของแถบวาเลนซ์ สมมติว่าวัสดุชนิดหนึ่งมีช่องว่างพลังงานที่ค่อนข้างกว้าง ตัวอย่างเช่น มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 5 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ 300 เคลวิน ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิกำนั้น การกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรกทำนายว่ามีอิเล็กตรอนเพียงส่วนน้อยที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิไปยังแถบนำ แต่เนื่องจากไม่มีสถานะที่เป็นไปได้ที่อยู่ใกล้ ๆ กับพลังงานเหนือแถบวาเลนซ์ จึงทำให้อิเล็กตรอนไม่เคลื่อนที่ วัสดุนี้จึงเป็นฉนวน แม้ว่าฉนวนหนึ่ง ๆ จะมีสถานะว่างมากมายในแถบนำที่สามารถรองรับอิเล็กตรอนได้ แต่สถานะเหล่านี้ถูกแยกห่างจากสถานะเต็มด้วยช่องว่างพลังงานขนาดใหญ่จึงมีอิเล็กตรอนเพียงส่วนน้อยที่เข้าครอบครองสถานะเหล่านี้ทำให้สภาพนำไฟฟ้า โดยรวมของฉนวนมีค่าน้อย

8.5.3 การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างของแถบพลังงานแบบเดียวกับฉนวน แต่มีช่องว่างพลังงานเล็กกว่ามาก โดยมีค่าประมาณ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงค่าช่องว่างพลังงานของวัสดุบางชนิด โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากระดับเฟอร์มีอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และมีค่าพลังงานที่เล็กพอที่จะทำให้จำนวนอิเล็กตรอนเกิดการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ และเนื่องจากการมีระดับพลังงานที่ว่างอยู่มากมายเหนือระดับพลังงานที่ถูกเติมเต็มด้วยปัจจัยจากอุณหภูมิในแถบนำ การบ่อนความต่างศักย์ค่าเล็กน้อยก็ทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในแถบนำในสถานะพลังงานที่เป็นไปได้ ทำให้เกิดเป็นกระแสในระดับปานกลางที่อุณหภูมิต่ำเคลวิน อิเล็กตรอนทั้งหมดในวัสดุเหล่านี้จะอยู่ในแถบวาเลนซ์ และไม่มีพลังงานที่จะ

กระตุ้นอิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงาน ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงเป็นตัวนำที่ไม่ดีในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ และเนื่องจากการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิให้กับอิเล็กตรอนเพื่อที่จะข้ามช่องว่างแคบ ๆ มีความเป็นไปได้มากขึ้นที่สถานะอุณหภูมิสูง ค่าการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับค่าการนำไฟฟ้าในโลหะที่จะลดลงอย่างช้า ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำที่เป็นไปได้ นั้นอาจจะเป็นประจุลบ ประจุบวก หรือประจุทั้งสอง เมื่ออิเล็กตรอนตัวหนึ่งเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ ไปสู่แถบนำอิเล็กตรอนนั้นจะทิ้งที่ว่างเอาไว้ เรียกว่า โฮล (Hole) ในแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนตัวอื่นอยู่ โฮลนี้ประพฤติตัวราวกับเป็นประจุพาหะในลักษณะที่อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ๆ สามารถเคลื่อนที่มายังโฮล เมื่อใดก็ตามที่อิเล็กตรอนทำเช่นนั้นจะเป็นการสร้างโฮลใหม่ในตำแหน่งที่อิเล็กตรอนหลุดออกมา ดังนั้นผลสืบเนื่องสุทธิสามารถแสดงได้ในรูปของการเคลื่อนที่ของโฮลในเนื้อวัสดุในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โฮลประพฤติตัวราวกับว่าเป็นอนุภาคที่มี ประจุ $+e$ ภาพที่ 8.8 เป็นภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แสดงค่าช่องพลังงานมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานในจำนวนมาก และแสดงช่องว่างพลังงานและแถบพลังงานเฟอร์มิ



ภาพที่ 8.8 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน แสดงแถบพลังงานเฟอร์มิ

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Raymond A. Serway, Clement J. Moses, & Curt A. Moyer, 2005.

8.5.3.1 สารกึ่งตัวนำอินทรินสิก

ผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยธาตุเพียงชนิดเดียวหรือสารประกอบเพียงชนิดเดียว เรียกว่า สารกึ่งตัวนำอินทรินสิก (intrinsic semiconductor) ในสารกึ่งตัวนำเหล่านี้จำนวนอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและจำนวนโฮลจะเท่ากัน การจับคู่กันของประจุเหล่านี้เรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล

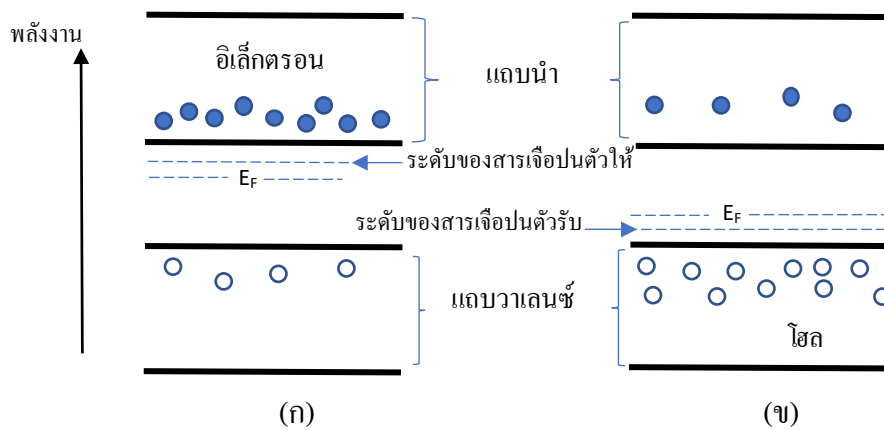
(electron-hole pairs) เมื่อปรากฏว่ามีสนามไฟฟ้าจากภายนอก โสลจะเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามและ อิเล็กตรอนตัวนำจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับสนาม เนื่องจากอิเล็กตรอนและ โสลเคลื่อนที่ตรงข้ามกัน การเคลื่อนที่ของประจุทั้งสอง จึงทำให้เกิดเป็นกระแสในทิศทางเดียวกัน

8.5.3.2 สารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือ

เมื่อมีการเติมสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้ง โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า การเติมสารอื่นผสมลงไป เรียกว่า การเจือ (doping) มีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมค่าการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่อะตอมในกลุ่มธาตุหมู่ 5 เช่น P, As หรือ Sb เป็นต้น ตัวหนึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดห้าตัว ถูกนำไปเติมให้กับสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุหมู่สี่ อิเล็กตรอนสี่ตัวจะจับเป็นพันธะโควาเลนต์กับอะตอมสารกึ่งตัวนำ และเหลือเป็นอิเล็กตรอนว่างอยู่หนึ่งตัวอิเล็กตรอนที่เกินมานี้เกือบจะเป็นอิสระกับอะตอมหลัก และเราสามารถสร้างเป็นแบบจำลองโดยให้มีระดับพลังงานเกิดขึ้นในช่องว่างพลังงานที่ตำแหน่งด้านล่างใกล้กับแถบนำ การมีอะตอมเพนตะวาเลนต์ (pentavalent atom) ส่งผลให้เกิดการมีอิเล็กตรอนในโครงสร้าง ดังนั้นจึงถูกเรียกว่าเป็น อะตอมผู้ให้ (donor atom) เนื่องจากระยะห่างระหว่างระดับพลังงานของอิเล็กตรอนของอะตอมผู้ให้กับขอบล่างของแถบนำมีค่าน้อย ประมาณ 0.05 อิเล็กตรอนโวลต์ ปริมาณการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิต่ำเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่ไปสู่แถบนำได้ สารกึ่งตัวนำที่เจือด้วยอะตอมผู้ให้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด n (n-type semiconductors) เนื่องจากเป็นสารที่มีประจุพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ ถ้าสารกึ่งตัวนำหมู่ 4 ถูกเจือด้วยอะตอมหมู่ 3 เช่น B, Al, Ga หรือ In เป็นต้น ที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามตัว ดังเช่นในอินเดียม และอะลูมิเนียม อิเล็กตรอนสามตัวจะรวมเป็นพันธะโควาเลนต์กับอะตอมสารกึ่งตัวนำที่อยู่ใกล้เคียง เหลือที่ว่างสำหรับอิเล็กตรอนไว้หนึ่งที่ - โสลตัวหนึ่ง - ซึ่งจะจับเป็นพันธะที่สี่ถ้ามีอิเล็กตรอนในอะตอมสารเจือมากพอที่จะรวมตัวเป็นพันธะในสถานการณ์นี้สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยการวาดระดับพลังงานในช่องว่างพลังงานในบริเวณที่อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ที่มีพลังงานเพียงพอจากอุณหภูมิจึงเข้าไปเติมระดับพลังงานที่ว่างนี้จะเหลือ โสลที่ว่างตัวหนึ่งในแถบวาเลนซ์ โสล ตัวนี้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่ เนื่องจากอะตอมไตรวาเลนต์ (trivalent atom) ได้รับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ สารเจือประเภทนี้จึงถูกเรียกว่า อะตอมผู้รับ (acceptor atoms) สารกึ่ง

ตัวนำที่ถูกเจือด้วยสารเจือแบบไตรวาเลนต์ (ผู้รับ) มีชื่อว่า สารกึ่งตัวนำชนิด p เนื่องจากประจุพาหะข้างมากคือ โฮลที่มีประจุบวก เมื่อการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำเป็นผลเนื่องมาจากสารเจือผู้รับหรือสารเจือผู้ให้วัสดุนั้นจึงถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิค

ช่วงความหนาแน่นของสารเจือทั่วไปสำหรับสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิคคือ $10^{13} - 10^{19}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขณะที่ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำทั่วไปมีค่า 10^{21} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยประมาณ



ภาพที่ 8.9 (ก) สารกึ่งตัวนำชนิดเอิน (ข) สารกึ่งตัวนำชนิดพี

การเติมอะตอมของธาตุในหมู่ III (B, Al, Ga, In, Tl) ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียงสามตัวให้ผลทำนองเดียวกัน ตัวอย่างหนึ่งคือ แกลเลียม ($Z = 31$) ในฐานะสารเจือปนแทนในเจอร์เมเนียม อะตอมแกลเลียมอยากจะสร้างพันธะโคเวเลนต์สี่พันธะ แต่มันมีอิเล็กตรอนตัวนอกแค่สามตัว อย่างไรก็ตามมันสามารถขโมยอิเล็กตรอนหนึ่งตัวจากอะตอมเจอร์เมเนียมข้างเคียงเพื่อให้ครบพันธะโคเวเลนต์สี่พันธะที่ต้องการได้ อะตอมที่ได้มีโครงสร้างอิเล็กตรอนเดียวกับ Ge แต่มีขนาดใหญ่กว่าเล็กน้อย เพราะประจุนิวเคลียสของแกลเลียมน้อยกว่า คือมี $+31e$ แทนที่จะเป็น $+32e$ การขโมยนี้ทั้งอะตอมข้างเคียงให้มีโฮลหรืออิเล็กตรอนที่หายไปหนึ่งตัว โฮลทำตัวเป็นประจุบวกที่เคลื่อนที่ทั่วผลึกได้ด้วยสภาพนำในตัว อิเล็กตรอนที่ถูกขโมยถูกยึดกับอะตอมแกลเลียมในระดับที่เรียกว่า ระดับตัวรับประมาณ 0.01 อิเล็กตรอนโวลต์ เหนือด้านบนของแถบวาเลนซ์ อะตอมแกลเลียมซึ่งเรียกว่า เป็นตัวรับ จึงรับอิเล็กตรอนหนึ่งตัวไปเพื่อให้ครบ พันธะโคเวเลนต์สี่พันธะที่ต้องการ อิเล็กตรอนพิเศษนี้ทำให้อะตอม

แกเลียมที่เติมเป็นกลางมีประจุสุทธิ $-e$ ไอออนแกเลียมที่เกิดขึ้นไม่มีอิสระในการเคลื่อนที่ ในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือสารด้วยตัวรับโดยมองสภาพนำไฟฟ้าเกือบทั้งหมดว่าเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของประจุบวก (โฮล)

8.6 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor equipments)

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีบทบาทซึ่งขาดไม่ได้ในอิเล็กทรอนิกส์ร่วมสมัย ในวิทยุและโทรทัศน์สมัยแรก อุปกรณ์รับส่งอาศัยหลอดสุญญากาศ แต่สิ่งเหล่านี้ได้ถูกแทนที่เกือบหมดในสามทศวรรษสุดท้ายด้วยอุปกรณ์สถานะของแข็ง ซึ่งรวมทั้งทรานซิสเตอร์ ไดโอด วงจรรวม และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่น หลอดสุญญากาศที่เหลือรอดอย่างเดียวในอุปกรณ์วิทยุและโทรทัศน์คือหลอดภาพในเครื่องรับโทรทัศน์ส่วนใหญ่ อุปกรณ์ภาพในกล้องโทรทัศน์ในห้องถ่าย และเครื่องส่งกำลังสูง แผ่นสารกึ่งตัวนำบางใช้เป็นโฟโตเซลล์ได้ เมื่อวัสดุถูกฉายด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่โฟตอน มีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับช่องว่างแถบระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำ อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะถูกคลื่นโฟตอนและกระโดดไปแถบการนำที่มีส่วนต่อสภาพนำได้ สภาพนำจึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มคลื่น เครื่องตรวจจับอนุภาคประจำงานด้วยหลักการเดียวกัน วงจรภายนอกให้โวลเตจคร่อมสารกึ่งตัวนำ อนุภาคประจุมีพลังที่เคลื่อนที่ผ่านสารกึ่งตัวนำจนอย่างไม่ยึดหยุ่นกับวาเลนซ์อิเล็กตรอน กระตุ้นมันจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำและสร้างคู่ของโฮล และอิเล็กตรอนการนำ สภาพนำเพิ่มขึ้นชั่วขณะ ทำให้เกิดพัลส์ กระแสในวงจรรวมนอก เครื่องตรวจจับสถานะของแข็งใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยฟิสิกส์ทางด้านฟิสิกส์นิวเคลียร์และฟิสิกส์พลังงานสูง

ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหลายชนิดหลักการสำคัญคือ สภาพการนำของวัสดุถูกควบคุมด้วยความเข้มข้นสารเจือปน ซึ่งเปลี่ยนค่าได้ในขอบเขตที่กว้างจากบริเวณหนึ่งของอุปกรณ์ไปยังอีกบริเวณหนึ่ง ตัวอย่างหนึ่งคือ รอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) ที่ขอบเขตระหว่างบริเวณหนึ่งของสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือปนชนิด p กับอีกบริเวณหนึ่งที่มีสารเจือปนชนิด n วิธีหนึ่งในการสร้างรอยต่อ p-n ทำโดยพอกพูนวัสดุชนิด n บางชนิดบนผิวสะอาดมาก ๆ ของวัสดุชนิด p บางชนิด การประดิษฐ์รอยต่อพี เริ่มจากการเปลี่ยนแปลงผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ให้เป็นชนิดเอ็น โดยเติมสารเจือปนชนิดให้อิเล็กตรอน แล้วจึงเปลี่ยนแปลงผลึกเดี่ยวของสารที่เหลือให้เป็นชนิดพี โดยการเติมสารเจือปนชนิดรับ

อิเล็กตรอน บริเวณที่แยกชนิดเอ็นจากชนิดพี เมื่อเกิดรอยต่อพี-เอ็น โหมดจะแพร่จากซ้ายไปขวาและอิเล็กตรอนจะแพร่จากขวาไปซ้าย ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น โหมดบางตัวที่มีพลังงานมากพอ จะแพร่ข้ามรอยต่อไปยังบริเวณเอ็น และเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนตัวนำ ทำให้เกิดกระแสโหมด I_1 จากด้านพีไปยังด้านเอ็น ในขณะที่เดียวกันการกระตุ้นของพลังงานความร้อนจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โหมดขึ้นใน ด้านเอ็น และโหมดที่เกิดนี้จะแพร่ข้ามรอยต่อไปยังบริเวณพี ทำให้เกิดกระแส I_2 ที่สถานะสมดุลกระแสทั้งสองจะเท่ากัน เมื่อเราให้ความต่างศักย์ V โดยที่ขั้วบวกของเซลล์ไฟฟ้าต่อกับด้านพี และขั้วลบของเซลล์ไฟฟ้าต่อกับด้านเอ็น เรียกว่าไบอัสเดินหน้า (forward bias) กำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อจะลดต่ำลง กระแส I_1 มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับกระแสอิเล็กตรอนตรงข้ามกับกระแสโหมด ในขณะที่ไบอัสเดินหน้าอิเล็กตรอนจำนวนมากสามารถข้ามกำแพงศักย์ได้ และไปรวมกับกระแสโหมดในทิศทางตรงกันข้ามทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจำนวนมาก ในกรณีตรงกันข้ามถ้าต่อขั้วลบเข้ากับด้านพี และขั้วบวกกับด้านเอ็น เรียกรายไบอัสกลับทาง (reverse bias) กำแพงศักย์บริเวณรอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแส I_1 ลดลงแต่กระแส I_2 ไม่เปลี่ยนแปลง

8.6.1 ทรานซิสเตอร์

การประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์โดยจอห์น บาร์ดีน (John Bardeen) ค.ศ. 1908 – 1991 วอลเตอร์ แบริตเทน (Walter Brattain) ค.ศ. 1902 – 1987 และวิลเลียม ชอกกิลีย์ (William Shockley) ค.ศ. 1910 – 1989 ในปี ค.ศ. 1948 เป็นการปฏิวัติโลกอิเล็กทรอนิกส์อย่างสิ้นเชิง ผลงานชิ้นนี้ทำให้พวกเขาทั้งสามคนได้ร่วมกันกรับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 1956 โดยในปี ค.ศ. 1960 ทรานซิสเตอร์ได้เข้ามาแทนที่หลอดสุญญากาศในอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ การเริ่มต้นใช้ทรานซิสเตอร์ก่อให้เกิดอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าเป็นล้านล้านดอลลาร์ที่ผลิตอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างเช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล คีบอร์ดไร้สาย และคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กพกพา

ทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อ (junction transistor) ตัวหนึ่งประกอบไปด้วยวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีบริเวณ n แคบมากๆ โดยถูกประกอบด้วยบริเวณ p สองบริเวณ หรืออาจจะเป็นบริเวณ p ที่ถูกประกอบด้วยบริเวณ n สองบริเวณ ซึ่งในแต่ละกรณีนั้นทรานซิสเตอร์จะเกิดจากรอยต่อ $p-n$ สองรอยต่อ ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในช่วงแรกของอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ

8.7 บทสรุป

ของแข็งสามารถจำแนกออกเป็นออสัณฐาน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไม่เป็นระเบียบและผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ ถ้าจำแนกตามชนิดของพันธะจะแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ (1) พันธะไอออนิก (2) พันธะโคเวเลนต์ (3) พันธะไฮโดรเจน (4) พันธะโมเลกุล และ (5) พันธะโลหะ เซลหนึ่งหน่วยเป็นกลุ่มที่เล็กที่สุดในผลึกซึ่งแทน โครงสร้างของผลึกนั้น หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อใช้การดำเนินการเคลื่อนย้ายซ้ำๆ กันจะทำให้เกิดผลึกขึ้นมา แถวของจุดที่ได้จากการดำเนินการเคลื่อนย้ายเรียกว่า แลตทิซ สำหรับสสารที่เป็นฉนวน อิเล็กตรอนจะยึดแน่นอยู่กับอะตอมและไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในผลึก โลหะถือเป็นตัวนำที่ดีจะมีอิเล็กตรอนซึ่งไม่ยึดแน่นกับอะตอมและสามารถเคลื่อนที่ในผลึกอย่างอิสระ ทรูตและลอเรนทซ์เป็นผู้เสนอทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่าของโลหะ ซึ่งสามารถทำนายกฎของโอห์ม และความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ แต่ทฤษฎีนี้ไม่สามารถทำนายสภาพนำไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และความร้อนจำเพาะของโลหะตลอดจนคุณสมบัติของแม่เหล็กได้ ปัญหาดังกล่าวหมดไปเมื่อชอมเมอร์เฟลด์ได้เสนอทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระตามแบบกลศาสตร์ควอนตัมขึ้นมา การจัดจำแนกของของแข็งออกเป็น ฉนวน ตัวนำ และสารกึ่งตัวนำ อธิบายได้ด้วยทฤษฎีควอนตัม มีวิธีการเบื้องต้น คือ ทฤษฎีแถบพลังงาน สำหรับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ หลักสำคัญเบื้องต้นคือ หลักของรอยต่อพี-เอ็น การประดิษฐ์รอยต่อพี-เอ็น เริ่มจากการเปลี่ยนแปลงผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ให้เป็นชนิดเอ็น โดยเติมสารเจือปนชนิดให้อิเล็กตรอน แล้วจึงเปลี่ยนแปลงผลึกเดี่ยวของสารที่เหลือให้เป็นชนิดพี โดยการเติมสารเจือปนชนิดรับอิเล็กตรอน บริเวณที่แยกชนิดเอ็นจากชนิดพี เรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น คุณสมบัติที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ ไดโอด และทรานซิสเตอร์

แบบฝึกหัด

1. พันธะที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุลของของแข็งมีอะไรบ้าง แตกต่างกันอย่างใด จงอธิบาย
2. อิเล็กตรอนตัวหนึ่งอยู่ในกล่องศักย์รูปสี่เหลี่ยม ที่สถานะพื้นอิเล็กตรอนนี้มีพลังงาน 1 อิเล็กตรอนโวลต์ จงหาความกว้างของกล่อง [คำตอบ 0.614 นาโนเมตร]
3. จงแสดงว่าสำหรับผลึกรูปลูกบาศก์ที่มีจุดศูนย์กลางในตัวมีค่าคงที่เมดเดอสูงเท่ากับ 1.7627
4. จงหาค่าพลังงานที่จำเป็นต้องใช้กระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น $n = 3$ ในโลหะตัวนำ [คำตอบ 9 อิเล็กตรอนโวลต์]
5. สำหรับผลึก NaCl ที่มีรัศมีอะตอมเท่ากับ 2.81 ค่าเมดเดอสูงเท่ากับ 1.7476 และ $n = 9$ จงหาพลังงานยึดเกาะรวมกันต่ออะตอม [คำตอบ -7.94 อิเล็กตรอนโวลต์]
6. จงคำนวณหาพลังงานเฟอร์มิของโซเดียมที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ [คำตอบ 3.15 อิเล็กตรอนโวลต์]
7. ทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมช่วยแก้ปัญหาข้อจำกัดของทฤษฎีอิเล็กตรอนอิสระยุคเก่าได้อย่างไร
8. วัสดุใดบ้างที่เหมาะสมสำหรับการเป็นสารเจือปนในซิลิกอนเพื่อทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น

เอกสารอ้างอิง

- กฤษฎา ชูติมา. (2556). หล็กเคมีทั่วไป 1. (พิมพ์ครั้งที่ 19). กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และคณะ. (2560). เคมี 1 12/e. กรุงเทพมหานคร : แมคกรอ-ฮิล.
- ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2553). ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 3. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูลักษณ์ จำกัด
- ประภาณี เกษมศรี ณ อยุธยา และคณะ. (2555). เคมีทั่วไปเล่ม 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัชนิกร วันจันทิก. (2557). พื้นฐานและการประยุกต์ของจลนพลศาสตร์เคมี. มหาสารคาม : อภิชาติการ
พิมพ์.
- วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. (2558). เคมีวัสดุ เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Ashcroft, N. W., and Mermin, D.N. (1975). Solid State Physics. Tokyo: CBS Publishing Japan, LTD.
- Chang, R. (2010). Chemistry (10th Edition). United State of America : McGraw-Hill Higher
Education.
- Flowers, P., et al. (2014). Chemistry. United State of America : OpenStax.
- Moore, J.W., Stanitski, C.L & Jurs, P.C. (2002). CHEMISTRY-The Molecular Science.
Fort Worth: Harcourt college.
- Petrucci, R. H., et al. (2011). General Chemistry : Principles and Modern Applications (10th
Edition). United State of America : MacMillian Publishing Company.
- Serway, R.A., Moses, C.J., & Moyer, C.A. (2005). Modern Physics 3rd ed. California: Brooks/Cole-
Thomson Learning.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). Physics for Scientists and Engineers with Modern
Physics 9th ed. Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). Modern Physics for Scientists and Engineers 4th ed.
Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). Sear's & Zemansky's University Physics with
Modern Physics 14th ed. Essex: Pearson Education Limited.