

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความบกพร่องในโครงสร้างผลึก (Defect in Crystals)

2.1.1 โครงสร้างของสารของแข็ง

สารของแข็งหรือวัสดุสถานะของแข็ง (solid state materials) เกิดขึ้นได้โดยการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมจำนวนมากมายของธาตุ แต่ละอะตอมจะเกาะเกี่ยวกันอย่างแข็งแรง ลักษณะการเรียงตัวของอะตอมภายในสารของแข็งและรูปแบบการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอม จะมีผลไปถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารของแข็งนั้นด้วย อาจพิจารณาจัดแบ่งลักษณะโครงสร้างของสารของแข็ง ตามลักษณะการเกาะเกี่ยวและการเรียงตัวของอะตอมได้เป็น 2 ประเภท คือ

- ก. โครงสร้างแบบอสัณฐาน (non crystalline) หรืออสัณฐาน หรืออะมอร์ฟัส (amorphous)
- ข. โครงสร้างแบบผลึก (crystalline)

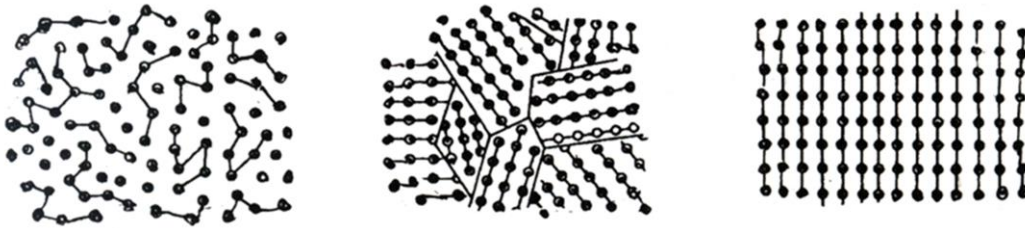
2.1.1.1 ออสัณฐาน หรือ อะมอร์ฟัส (amorphous)

อสัณฐาน หรือ อะมอร์ฟัส หมายถึงลักษณะโครงสร้างของสารของแข็ง ซึ่งมีการจัดเรียงของอะตอมเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน อะตอมต่างๆจะเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายไร้รูปแบบ และไม่มีตำแหน่งที่อยู่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) ทำให้วัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่แน่นอน เปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อม ซึ่งไม่สามารถจะควบคุมได้ จึงไม่เหมาะสมหรือไม่สามารถที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัย และทดลองสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำแบบอะมอร์ฟัสกันอย่างกว้างขวาง คือ มีสิ่งประดิษฐ์บางชนิดสามารถสร้างจากอะมอร์ฟัสได้ แต่คุณภาพหรือประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์ จะต้องได้รับการพัฒนาต่อไป ดังนั้นการผลิตในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่นิยมนิยม และจุดเด่นของวัสดุประเภทนี้ก็คือ การใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ เพราะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทำให้วัสดุเป็นผลึก ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์จากอะมอร์ฟัส ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบางของอะมอร์ฟัสซิลิคอน เป็นต้น

2.1.1.2 ผลึก (Crystalline)

ผลึก หมายถึงสารของแข็งที่มีลักษณะโครงสร้างภายใน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างมีระเบียบ มีรูปแบบที่แน่นอน โดยอะตอมต่างๆจะมีตำแหน่งที่อยู่แน่นอน ในทางปฏิบัติจะหาผลึกที่สมบูรณ์ร้อยเปอร์เซ็นต์ได้ยาก เพราะอย่างไรก็ตาม มักจะเกิดความบกพร่อง (defect) หรือจุดตำหนิบ้างไม่มากนักน้อย ทำให้ความเป็นระเบียบของอะตอมสูญเสียไป ความบกพร่องมีหลายลักษณะและมีสาเหตุการเกิดที่แตกต่างกัน



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างภายในของสารของแข็งโดยพิจารณาความเป็นระเบียบในการจัดเรียงอะตอม (ก) อะมอร์ฟัส (ข) ผลึกหลายรูป (poly crystalline) และ (ค) ผลึกรูปเดียว (single crystalline)

ดังนั้นจึงแบ่งวัสดุสารของแข็งที่เป็นผลึกออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) ผลึกไม่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีความบกพร่องเป็นจำนวนมาก หรือมีลักษณะของผลึกแต่ไม่ต่อเนื่อง หรือมีความเป็นระเบียบน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข) วัสดุดังกล่าวนิยมเรียกกันว่า ผลึกโพลีคริสตัล (Poly Crystalline) หรือผลึกหลายรูป

ข) ผลึกที่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีความบกพร่อง หรือตำหนิมีจำนวนน้อย อะตอมส่วนใหญ่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีรูปแบบที่แน่นอนเหมือนกันทั้งหมด ผลึกชนิดนี้นิยมเรียกกันว่า ผลึกรูปเดียว (Single Crystalline) ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ค)

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ส่วนมากที่ใช้กันในปัจจุบัน สร้างมาจากผลึกรูปเดียวของซิลิคอน และอาจมีบ้างที่ใช้ผลึกหลายรูป เพื่อการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของสิ่งประดิษฐ์ เช่น การนำเอาผลึกหลายรูปของซิลิคอน หรือเรียกง่าย ๆ ว่า โพลีซิลิคอน สร้างเป็นส่วนเกต (gate) ของทรานซิสเตอร์ประเภท MOS Transistor) เป็นต้น

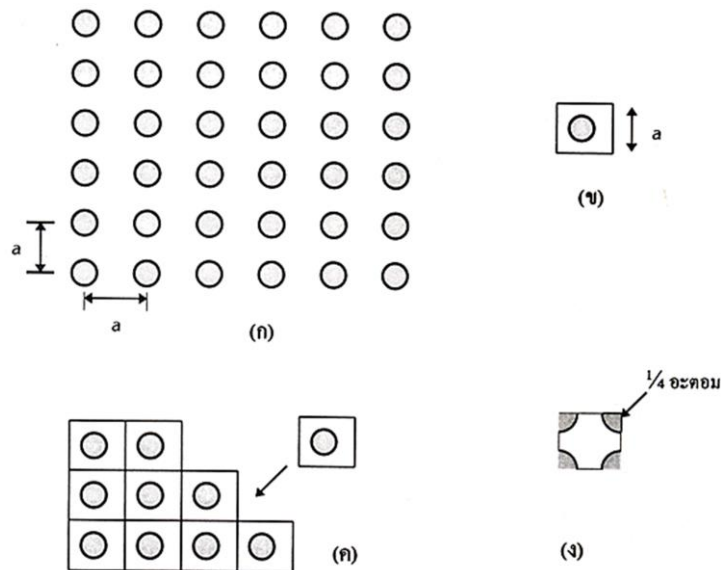
2.1.2 โครงสร้างผลึก

ในผลึกสารของแข็งใดๆ อะตอมจะเกาะเกี่ยวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยมีรูปแบบการเรียงตัวเป็นลักษณะหนึ่งๆโดยเฉพาะ ผลึกสารของแข็งแต่ละชนิด อาจมีรูปแบบของผลึกที่เหมือนกันหรือไม่ก็ได้ แต่ผลึกสารของแข็งชนิดเดียวกัน จะต้องมีความเหมือนกัน รูปแบบมาตรฐานของการจัดเรียงตัวของอะตอมของผลึกสารของแข็งมีหลายรูปแบบ การกำหนดระนาบ (plane) และทิศทาง (direction) ของผลึกนิยมแสดงด้วยตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ซึ่งจะทำให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน และสะดวกที่จะใช้เพื่อการอธิบาย อ้างอิง หรือเปรียบเทียบ โครงสร้างของผลึกได้อย่างถูกต้องและชัดเจน

2.1.2.1 ยูนิทเซลล์ หรือหน่วยเซลล์ (Unit cell)

คำว่า ยูนิทเซลล์ หรือ หน่วยเซลล์ หมายถึง ส่วนที่เล็กๆหรือส่วนที่เล็กที่สุดของผลึกที่มีความสมบูรณ์ และสามารถแสดงรูปแบบของผลึกได้อย่างชัดเจน ดังนั้นผลึกสารของแข็งจึงถูกพิจารณาได้ว่าประกอบขึ้นมาจากหน่วยเซลล์เล็กๆเหล่านี้ จำนวนมากมายมาเรียงต่อกันอย่างต่อเนื่อง รูปที่ 2.2(ก) ซึ่ง

เป็นรูปแสดงการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ และต่อเนื่องในลักษณะ 2 มิติ ภาพลักษณะนี้ถูกเรียกว่า แลตทิซของผลึก (crystal lattice) วงกลมแสดงแกนของอะตอม ซึ่งแต่ละอะตอมจะอยู่ห่างจากกันเป็นระยะ a หรือก็คือ ระยะห่างระหว่างอะตอม (atomic spacing) หรือบางครั้งนิยมเรียกว่า ค่าคงตัวของแลตทิซ (lattice constant) เพื่อที่จะอธิบายคุณสมบัติแลตทิซเหล่านี้ อาจใช้หน่วยเซลล์ของแลตทิซนี้ มาแสดงแทนแลตทิซทั้งหมด ซึ่งในที่นี้ ลักษณะของยูนิตเซลล์ แสดงดังในรูปที่ 2.2(ข) และ 2.2(ง)

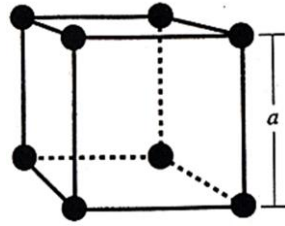


รูปที่ 2.2 ลักษณะรูปแบบของผลึก ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของยูนิตเซลล์ จำนวนมากมาย

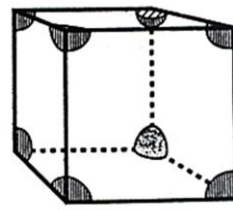
- (ก) ลักษณะของแลตทิซ (ข) หนึ่งยูนิตเซลล์ของแลตทิซ
 (ค) การเรียงตัวของยูนิตเซลล์ เพื่อประกอบเป็นผลึกหรือแลตทิซที่สมบูรณ์
 (ง) ลักษณะของยูนิตเซลล์อีกรูปแบบหนึ่ง

2.1.2.2 ยูนิตเซลล์ 3 มิติ

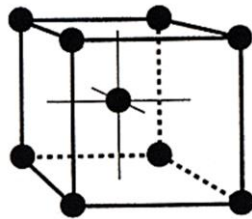
ในทางปฏิบัติ ผลึกสารกึ่งตัวนำ จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ 3 มิติ ดังนั้นเพื่อความเข้าใจที่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องอธิบายลักษณะของยูนิตเซลล์ในลักษณะ 3 มิติ (3D unit cells) จากลักษณะของผลึกที่มีรูปแบบของแลตทิซ เมื่อเขียนเป็นรูป 3 มิติ จะได้ดังในรูปที่ 2.3(ก) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของผลึกรูปแบบนี้ เรียกว่า เซลล์ลูกบาศก์พื้นฐาน (Simple Cubic Cell) โดยมีอะตอมอยู่ที่มุมทุกมุมของรูปลูกบาศก์ ยูนิตเซลล์ของแลตทิซในลักษณะ 3 มิติ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.3(ข) ซึ่งจะเห็นว่าภายในกรอบหรือขอบเขตของลูกบาศก์นี้ที่มุมทุกมุม จะมีเพียง $1/8$ ของอะตอมเท่านั้นที่บรรจุอยู่ภายในกรอบของยูนิตเซลล์นี้



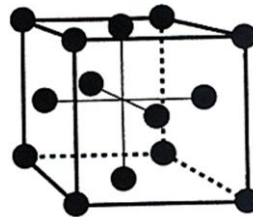
(ก) Simple Cubic Cell



(ข) Pedantically correct simple cubic



(ค) Body Centered Cubic



(ง) Face Centered Cubic

รูปที่ 2.3 ลักษณะของแลททิซแบบ 3 มิติ (ก) แบบ Simple Cubic Cell

(ข) ยูนิตเซลล์ของแลททิซแบบ Simple Cubic Cell ที่ถูกต้อง

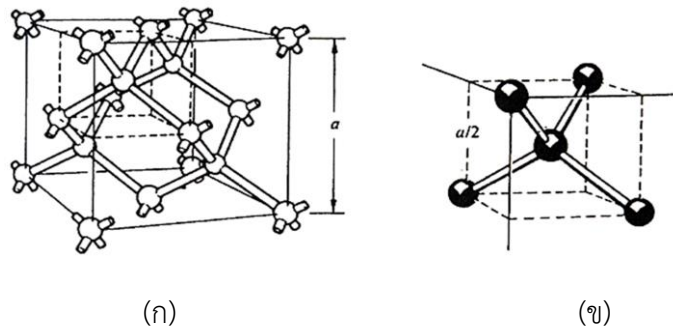
(ค) แบบ Body Centered Cubic (ง) แบบ Face Centered Cubic

ดังนั้น หนึ่งยูนิตเซลล์ ประกอบด้วยจำนวนอะตอมเท่ากับ $1/8 \times 8 = 1$ อะตอม และเมื่อนำ ยูนิตเซลล์เหล่านี้มาเรียงกันอย่างต่อเนื่อง และเป็นระเบียบ กระจายออกไปทุกทิศทุกทาง จะทำให้ได้ โครงสร้างของแลททิซ มีลักษณะเป็นผลึกแบบ เซลล์ลูกบาศก์พื้นฐาน ดังในรูปที่ 2.3(ก)

นอกจากนี้แล้วยังมีโครงสร้างของผลึกรูปแบบอื่นๆ อีกหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ค) และ 2.3(ง) คือ โครงสร้างแบบ Body Centered Cubic และแบบ Face Centered Cubic ตามลำดับ ซึ่ง โครงสร้างแบบ Body Centered Cubic หนึ่งยูนิตเซลล์ จะประกอบด้วยเนื้ออะตอม 2 อะตอมและกรณี แบบ Face Centered Cubic จะต้องใช้เนื้ออะตอมถึง 4 อะตอม เป็นต้น

2.1.3 โครงสร้างผลึกเพชร

ลักษณะโครงสร้างผลึก หรือแลททิซของวัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว เช่น ซิลิคอน หรือเยอรมาเนียม ในลักษณะ 3 มิติ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.4(ก) ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้ถูกเรียกว่า โครงสร้างผลึกเพชร (Diamond structure) ลักษณะของยูนิตเซลล์ จะพบว่า มีอะตอมอยู่ที่จุดมุมของกล่องลูกบาศก์ทุกมุม นอกจากนี้ตรงกลางของด้านทุกด้านก็จะมีอะตอมอยู่เช่นกัน และภายในกล่องลูกบาศก์นี้จะมีอะตอมอยู่ภายในอีก 4 อะตอม ดังในรูปที่ 2.4(ก) แต่ละอะตอมจะเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข) ซึ่งผลึกสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่จะประกอบด้วยยูนิตเซลล์เล็กๆ เหล่านี้จำนวนมากมายเรียงกันอย่างเป็นระเบียบออกไปในทุกๆ ด้าน



รูปที่ 2.4 (ก) หนึ่งยูนิตเซลล์ของโครงสร้างเพชร และ (ข) ภาพขยายส่วนมุมของยูนิตเซลล์ ซึ่งเป็นการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมหนึ่งกับ 4 อะตอมข้างเคียง

2.1.4 พันธะอะตอม

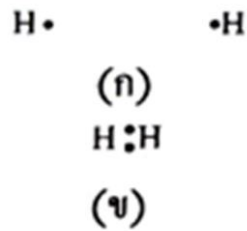
การก่อตัวเป็นของแข็ง เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอะตอมและใช้พลังงานรวมน้อยที่สุดจะขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอม ชนิดของพันธะ ถ้าพันธะระหว่างอะตอมไม่แข็งแรงพอ ก็ไม่สามารถรวมกันก่อตัวเป็นของแข็งขึ้นมาได้ ซึ่งอาจแบ่งรูปแบบพันธะอะตอมเป็น 4 แบบคือ

2.1.4.1 พันธะไอออนิก

ธาตุในหมู่ 1 ของตารางธาตุ มีแนวโน้มที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจึงกลายเป็นประจุบวก ขณะที่ธาตุหมู่ 4 มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนและตัวมันจะกลายเป็นประจุลบ ประจุที่ตรงกันข้ามจะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และทำให้เกิดพันธะที่เรียกว่า พันธะไอออนิก ถ้าไอออนมีความใกล้เคียงกันมาก จะเกิดแรงผลักกันและทำให้เกิดการจัดระยะที่สมดุลเกิดขึ้นระหว่างสองไอออนในผลึก ไอออนประจุลบมีแนวโน้มที่จะถูกล้อมรอบด้วยไอออนประจุบวก และไอออนประจุบวกมีแนวโน้มที่จะถูกล้อมรอบด้วยไอออนประจุลบ ดังนั้นโครงข่ายซ้ำๆ กันเป็นเครือข่ายของอะตอมเหล่านี้ จะสร้างเป็นแลตทิซขึ้นมา ตัวอย่างของพันธะไอออนิก ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

2.1.4.2 พันธะโควาเลนต์

แรงปฏิกิริยาระหว่างอะตอมมีแนวโน้มที่จะก่อตัวทำให้พลังงานวาเลนซ์ให้เข้ามาอยู่ใกล้กัน เรียกว่าพันธะโควาเลนต์ ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน ไฮโดรเจนมีอิเล็กตรอนหนึ่งตัวและต้องการอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัว เพื่อให้พลังงานวงนอกสุดเต็ม ในรูปที่ 2.5(ก) แสดงถึงอะตอมของไฮโดรเจนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาแก่กัน และรูปที่ 2.5(ข) แสดงโมเลกุลไฮโดรเจนภายหลังที่ยึดติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งพันธะโควาเลนต์เป็นพันธะที่ทำให้อิเล็กตรอนระหว่างอะตอมสามารถมีส่วนร่วมกันได้ เพื่อที่จะให้ระดับพลังงานวาเลนซ์ของอะตอมแต่ละอะตอมมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม



รูปที่ 2.5 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของไฮโดรเจน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลไฮโดรเจน

อะตอมของธาตุหมู่ 4 ของตารางธาตุ เช่น ซิลิคอน และเยอรมาเนียม มีแนวโน้มที่จะสร้างพันธะโควาเลนต์ขึ้น แต่ละธาตุเหล่านี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสี่ตัว และต้องการอิเล็กตรอนอีกสี่ตัว เพื่อให้พลังงานวาเลนซ์เต็ม ถ้าอะตอมซิลิคอนมีอะตอมใกล้เคียงสี่ตัว แต่ละอะตอมข้างเคียงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่เข้าร่วมกันอยู่อีกสี่ตัว ดังนั้นอะตอมจะมีผลเหมือนกับว่ามีอิเล็กตรอนอยู่แปดตัวที่ระดับพลังงานวงนอกสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) ซึ่งแสดงถึงอะตอมซิลิคอนพร้อมกับวาเลนซ์อิเล็กตรอนสี่ตัว ขณะที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาแก่กัน และรูปที่ 2.6(ข) แสดงถึงพันธะในซิลิคอนที่เกิดพันธะโควาเลนต์แล้ว ซึ่งอะตอมตรงกลางมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเข้าร่วมกันอยู่แปดตัว



รูปที่ 2.6 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิคอน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในผลึกซิลิคอน

2.1.4.3 พันธะโลหะ

ธาตุหมู่ 1 นั้นจะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนหนึ่งตัว ถ้าอะตอมโซเดียมสองอะตอมนำมาใกล้กัน วาเลนซ์อิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยาต่อกัน เพื่อจะสร้างพันธะขึ้นมา ของแข็งโซเดียมจะมีโครงสร้างแบบ body centered cubic โดยแต่ละอะตอมมีอะตอมข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแปดอะตอม ซึ่งแต่ละอะตอมใช้วาเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกันเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจจะมองเป็นว่าไอออนบวกของโลหะถูกล้อมรอบด้วยทะเลของประจุลบของอิเล็กตรอน และของแข็งก็จะถูกยึดกันไว้ด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต

2.1.4.4 พันธะ Van Der Waals

เป็นพันธะที่อ่อนที่สุด เช่น โมเลกุลของไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) ที่ยึดกันด้วยพันธะระหว่างอิออน ประจุรวมทั้งหมดของประจุบวกที่ศูนย์กลางของโมเลกุล จะไม่เท่ากับผลรวมของประจุลบที่ศูนย์กลางโมเลกุล จากการที่ไม่สมมาตรกันของการกระจายประจุนี้เองจะส่งผลให้เกิดไดโพล (dipole) เล็กๆ ขึ้น ซึ่งมีผลกระทบต่อดีโพลของโมเลกุล HF อื่นๆ ด้วย ปฏิกริยาอย่างอ่อนที่ยึดกันไว้ระหว่างไดโพล จะก่อตัวเป็นของแข็งด้วยพันธะ Van der Waals ซึ่งจะมีคุณสมบัติคือ มีจุดหลอมเหลวต่ำ ในความเป็นจริงแล้วสารชนิดนี้ส่วนมากจะมีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้องเสียส่วนใหญ่

2.1.5 ความไม่สมบูรณ์และสิ่งแปลกปลอมในของแข็ง

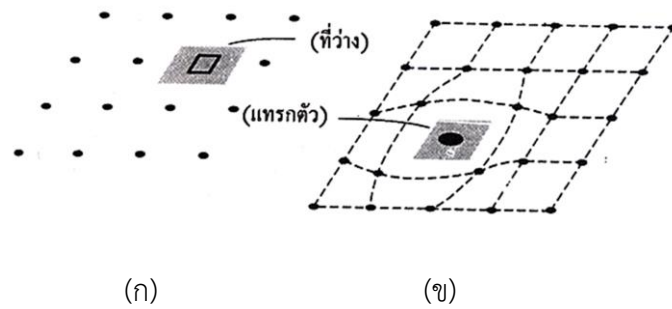
ในความเป็นจริง แลททิซจะไม่สมบูรณ์ทั้งหมด แต่จะมีความไม่สมบูรณ์หรือความบกพร่องอยู่ ความไม่สมบูรณ์มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร และในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความบกพร่องและสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้

2.1.5.1 ความไม่สมบูรณ์ในของแข็ง

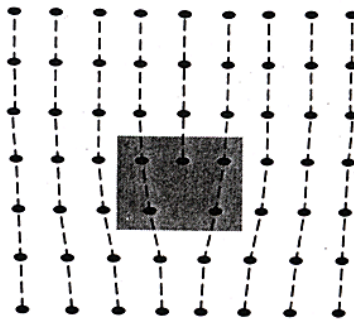
ความไม่สมบูรณ์ชนิดหนึ่งที่ผลึกทั้งหลายจะมีเหมือนกันคือ การสั่นของอะตอมเนื่องจากความร้อน โดยปกติผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ จะประกอบด้วยอะตอมอยู่ตรงตำแหน่งที่แน่นอนในแลททิซ อะตอมจะถูกแยกกันด้วยระยะระยะหนึ่ง ซึ่งสมมุติว่ามีค่าคงที่ค่าหนึ่ง อะตอมในผลึกจะมีพลังงานความร้อนค่าหนึ่ง ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ พลังงานความร้อนนี้เป็นสาเหตุทำให้อะตอมสั่นในลักษณะที่ไม่เป็นแบบแผนจากจุดบนแลททิซที่สภาวะสมดุล การเคลื่อนที่แบบไม่เป็นแบบแผนนี้เป็นสาเหตุให้ระยะห่างระหว่างอะตอมไม่คงที่ ทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวอย่างสมบูรณ์ที่จะเกิดขึ้นได้เล็กน้อย ความไม่สมบูรณ์แบบนี้เรียกว่า การสั่นของแลททิซ (lattice vibration) จะมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ความไม่สมบูรณ์อีกชนิดหนึ่งเรียกว่า ความบกพร่องแบบจุด (point defect) มีหลายรูปแบบที่ต้องพิจารณา ผลึกในความจริงนั้น อะตอมอาจจะหายไปจากตำแหน่งในแลททิซ ความบกพร่องนี้เรียกว่า ที่ว่าง (vacancy) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ก) อีกกรณีหนึ่งอะตอมอาจจะวางตัวที่ตำแหน่งระหว่างตำแหน่งความบกพร่องที่เรียกว่า การแทรกตัว (interstitial) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข) ในกรณีความบกพร่องแบบที่ว่าง และความบกพร่องแบบแทรกตัว ไม่เพียงแต่จะทำให้โครงสร้างเสียหาย พันธะเคมีจะถูกทำลายด้วย และมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร ช่องว่างและการแทรกตัวอาจแสดงปฏิกริยาต่อกันระหว่างความบกพร่องทั้งสอง และทำให้เกิดผลที่แตกต่างไปจากความบกพร่องแบบช่องว่างและความบกพร่องแบบแทรกตัว เป็นที่รู้จักกันว่าความบกพร่อง Frenkel

ความบกพร่องจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับอะตอมหรือตำแหน่งของอะตอม ในระหว่างการก่อตัวของผลึกรูปเดี่ยว จะทำให้เกิดความบกพร่องขึ้นจำนวนมาก ความบกพร่องตามแนวเส้นจะปรากฏเมื่อแถวของอะตอมเรียงตัวผิดพลาดจากตำแหน่งที่ควรอยู่ในแลททิซ ความบกพร่องนี้เรียกว่า ความบกพร่องแบบแนวเส้น (line defect) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เช่นเดียวกับความบกพร่องแบบจุด ความบกพร่องแบบแนวเส้นจะทำลายทั้งโครงสร้างปกติของแลททิซและพันธะอะตอมในผลึก ความบกพร่องนี้จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้



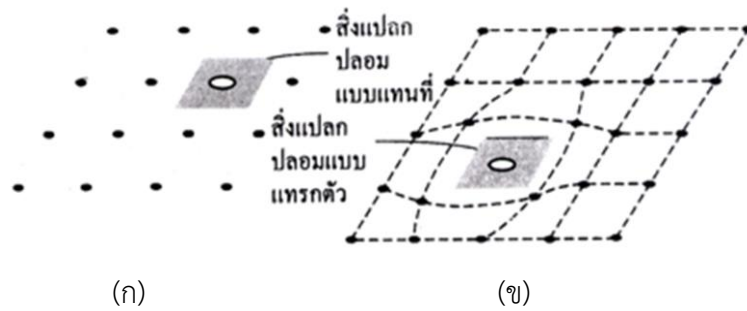
รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกรูปเดียว (ก) ความบกพร่องแบบช่องว่าง และ (ข) ความบกพร่องแบบแทรกตัว



รูปที่ 2.8 ความบกพร่องแบบแนวเส้นในสองมิติ

2.1.5.2 สิ่งแปลกปลอมในของแข็ง

อะตอมต่างชนิดหรืออะตอมแปลกปลอม อาจจะเข้ามาอยู่ในโครงสร้างผลึกได้ อะตอมแปลกปลอม อาจจะไปอยู่ตรงตำแหน่งในแลตทิซพอดี ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่า อะตอมแปลกปลอมแทนที่ (substitutional impurities) และอะตอมแปลกปลอมอาจจะอยู่ระหว่างตำแหน่งปกติของแลตทิซก็ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่า อะตอมแปลกปลอมแทรกตัว (interstitial impurities) ทั้งสองกรณีคือ ความบกพร่องของแลตทิซ แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 อะตอมแปลกปลอมบางอย่าง เช่น อะตอมออกซิเจนในซิลิคอนที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ แต่อะตอมทองหรือฟอสฟอรัสในซิลิคอน จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างรุนแรงแก่สารซิลิคอน

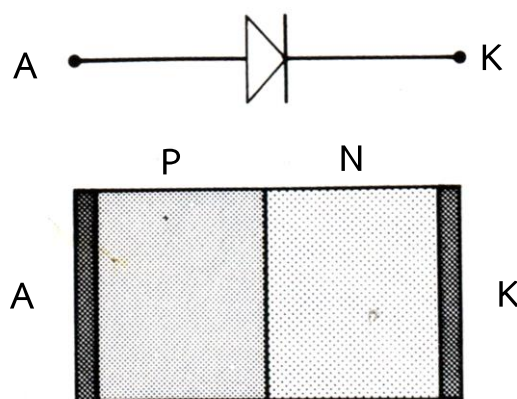


รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกรูปเดี่ยว (ก) สิ่งแปลกปลอมแบบแทนที่ และ (ข) สิ่งแปลกปลอมแบบแทรกตัว

การควบคุมปริมาณจำนวนอะตอมแปลกปลอมที่ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไปในทางที่ต้องการได้ เทคนิคที่จะนำอะตอมแปลกปลอมเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เพื่อเปลี่ยนความนำไฟฟ้าเรียกว่าการโด๊ป (doping) มีวิธีต่างๆไปของการโด๊ปอยู่สองวิธี คือ กระบวนการแพร่สารเจือ (diffusion) และกระบวนการฝังประจุไอออน (ion implantation)

2.2 รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction)

โครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็นถูกใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ และไดโอด ซึ่งในการสร้างโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น มักนิยมใช้วิธีการแพร่สารเจือชนิดเอ็นหรือชนิดพี เข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นชนิดตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และในส่วนนี้จะกล่าวคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้แก่ ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุลย์ ในสภาวะที่ได้รับการไบแอสตรง และในสภาวะที่ได้รับการไบแอสย้อนกลับ

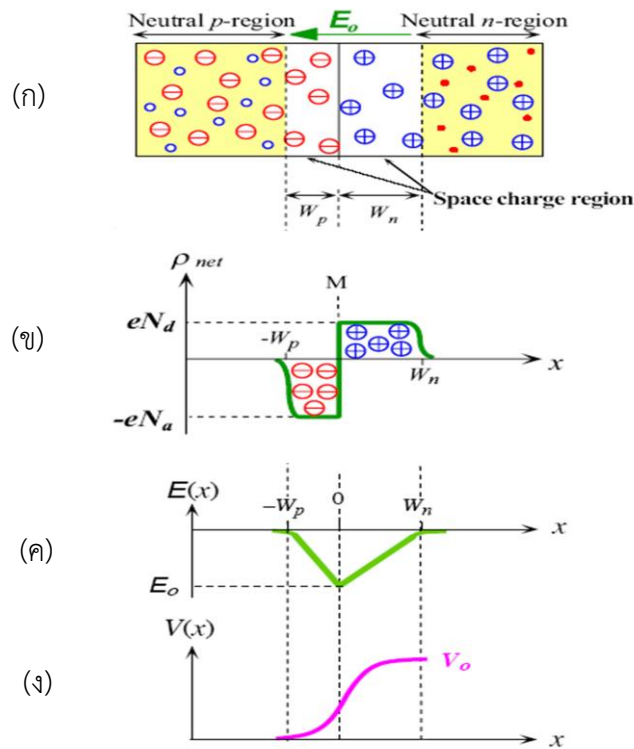


รูปที่ 2.10 โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด

2.2.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุล

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น เนื่องจากความหนาแน่นของประจุพาหะที่ต่างกัน จะทำให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะจากทางด้านที่มีความหนาแน่นของประจุพาหะมากกว่าไปยังด้านที่มีความหนาแน่นของประจุพาหะน้อยกว่า กล่าวคือ โฮลทางด้านพีในบริเวณใกล้เคียงต่อจะแพร่เข้าไปในด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นในบริเวณใกล้เคียงต่อจะแพร่เข้าไปทางด้านพี การแพร่นี้จะกระทำผ่านรอยต่อพี-เอ็น และสิ่งที่ได้ตามมาคือจะมีการรวมตัว (recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอน ผลจากการรวมตัวของประจุพาหะทั้งสอง จะทำให้อะตอมของสารเจือบริเวณใกล้เคียงกับรอยต่อพี-เอ็นกลายเป็นไอออน (ion) คืออะตอมของสารเจือชนิดเอ็นทางด้านเอ็น จะสูญเสียอิเล็กตรอน อะตอมนี้จึงแสดงตัวเป็นไอออนบวก และอะตอมของสารเจือชนิดพีทางด้านพี จะสูญเสียโฮลไป จึงทำให้อะตอมนี้แสดงตัวเป็นไอออนลบ เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าขึ้น ณ บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) สนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นอัตราการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะทั้งสองชนิดจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในมีปริมาณมากพอที่จะยับยั้งไม่ให้ประจุพาหะทั้งสองชนิดแพร่ข้ามรอยต่อได้ การแพร่จึงหยุดลง และอยู่ในสภาวะสงบนิ่ง ซึ่งเรียกว่ารอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุล (equilibrium)

นอกจากนี้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้บริเวณภายในรอยต่อนี้ไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิด คงมีแต่อะตอมของสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็น ซึ่งขณะนี้อยู่ในสภาพไอออนลบและไอออนบวก บริเวณดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” (depletion region) ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ข) การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น แสดงในรูปที่ 2.11(ค) ซึ่งค่า E_0 เป็นค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด และสนามไฟฟ้าที่มีอยู่บริเวณนี้จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นด้วย จึงคล้ายกับว่าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุลนี้มีแรงดันไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เองที่เป็นกำแพงศักย์ ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ แสดงในรูปที่ 2.11(ง)



รูปที่ 2.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อหรือที่เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) แสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$V_o = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.1)$$

- ซึ่ง V_o คือ แรงดันไฟฟ้าภายใน (โวลท์)
 K คือ ค่าคงที่โบลต์ซมาน (8.62×10^{-5} eV/K)
 T คือ อุณหภูมิองศาเซลเซียส (K)
 q คือ ประจุอิเล็กตรอน (1.62×10^{-19} คูลอมบ์)
 N_A คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (cm^{-3})
 N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (cm^{-3})
 n_i คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})

และในภาวะสมดุล ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

$$X_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon V_o (N_A N_D)}{q N_A N_D}} \quad (2.2)$$

โดยที่ X_0 คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุล

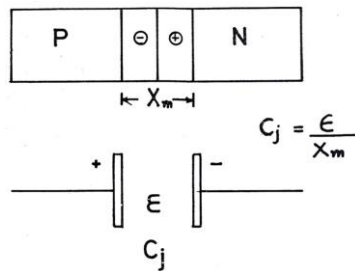
ϵ คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

V_o คือ แรงดันไฟฟ้าภายใน (โวลท์)

นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) ค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังสมการที่ (2.3)

$$C_j = \sqrt{\frac{\epsilon q N_A N_D}{2(N_A + N_D)V_o}} \quad (2.3)$$

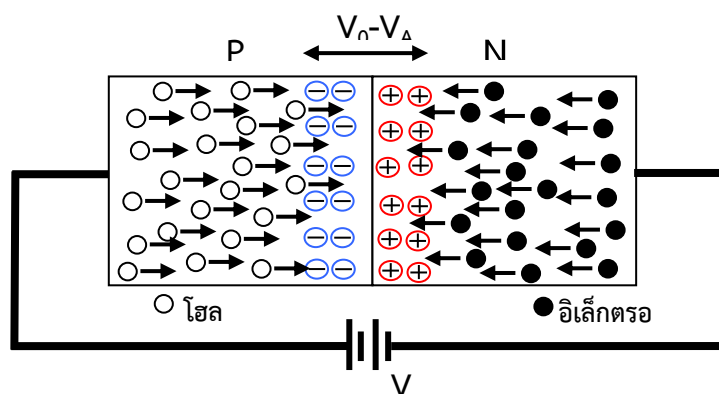
โดย C_j คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (F/cm^2)



รูปที่ 2.12 ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

2.2.2. รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward Bias)

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง ซึ่งหมายถึงทางด้านพีมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง

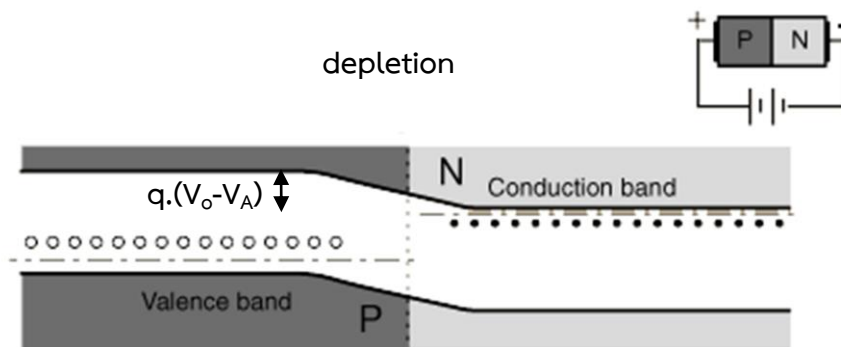
แรงดันไบอัสจากภายนอกค่า V_A จะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็น และอยู่ในลักษณะที่หักล้างกับ แรงดันไฟฟ้าภายในที่บริเวณรอยต่อ นั่นคือกำแพงศักย์ที่รอยต่อจะลดลงจึงมีผลทำให้โฮลจากด้านพี และ อิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็นถูกฉีด (injection) ข้ามรอยต่อพี-เอ็นได้ ปริมาณของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูก ฉีดข้ามรอยต่อนี้ จะเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสในลักษณะของเอ็กโปเนนเชียล (exponential function) จากการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อนี้เอง จะทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ ที่ (2.4) และสมการที่ (2.5)

$$I = I_o (e^{qV_A / KT} - 1) \quad (2.4)$$

$$\text{และ} \quad I_o = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (2.5)$$

- โดยที่
- I คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น (A)
 - I_o คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)
 - V_A คือ แรงดันไบอัสที่ใส่ภายนอก (V)
 - A คือ พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็น (cm^2)
 - D_e, D_h คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ (cm^2/s)
 - L_e, L_h คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ (cm)

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่ยอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของด้านพีและเอ็นจะไม่เท่ากัน และกำแพงศักย์ที่รอยต่อจะมีขนาดลดลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ และเป็นผลให้มีกระแสไหลในวงจรได้



รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

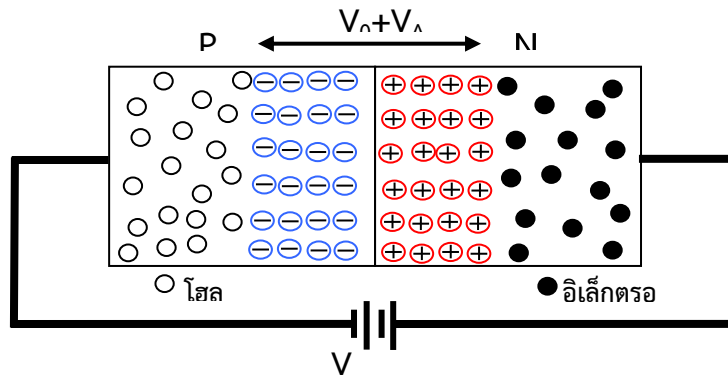
2.2.3. รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias)

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.15 กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อพี-เอ็น มีค่า V_A โวลท์แล้ว จะพบว่าแรงดันไบอัสดังกล่าวจะไปช่วยเสริมกับแรงดันภายใน ซึ่งปรากฏที่บริเวณรอยต่อ (V_o) ดังนั้นจะทำ

ให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และโฮลจากด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้ รอยต่อพี-เอ็นในภาวะนี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวน ไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ อย่างไรก็ตามพบว่าในขณะที่โฮลทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านพี ซึ่งมีจำนวนน้อยสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงปรากฏมีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับกระแสส่วนมากที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในขณะรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งอาจพิจารณาได้จากสมการที่ (2.4) เมื่อแทนค่าของ V_A ด้วย $-V_A$

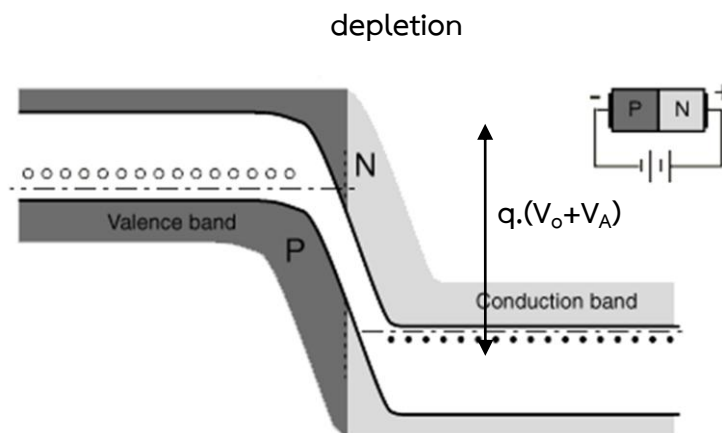
ดังนั้นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

$$I \approx -I_0 \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.15 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ลักษณะของแถบพลังงาน แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งพบว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะนี้จะมีการไหลตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งๆ



รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A