

หน่วยที่ 1

พื้นฐานสารกึ่งตัวนำและรอยต่อพี-เอ็น (Semiconductor Basics and P-N Junction)

หัวข้อเนื้อหา

- อะตอม (Atoms)
- สารกึ่งตัวนำ (Semiconductors)
- วงโคจรของอิเล็กตรอน และ ระดับพลังงาน (Electron Orbits And Energy Levels)
- แถบพลังงาน (Energy Bands)
- สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ ชนิดพี (N-Type and P-Type Semiconductors)
- รอยต่อ P-N (P-N Junction)
- การไบอัส (Bias) รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction)

จุดประสงค์การเรียนรู้

จุดประสงค์ทั่วไป

เพื่อให้มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างอะตอม หลักการคำนวณจำนวนอิเล็กตรอน คุณสมบัติแถบพลังงานของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และ ตัวนำ ความแตกต่างระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รอยต่อพี-เอ็น และ การให้ไบอัสกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (พุทธิพิสัย)

- บอกโครงสร้างของอะตอม และ ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในอะตอมได้อย่างถูกต้อง
- คำนวณจำนวนของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรของอะตอมได้อย่างถูกต้อง
- เปรียบเทียบคุณสมบัติแถบพลังงานของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และ ตัวนำได้อย่างถูกต้อง
- บอกความแตกต่างระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้อย่างถูกต้อง
- บอกวิธีการให้ไบอัสกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้อย่างถูกต้อง

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (ทักษะพิสัย)

- ติดตั้งและทดลองใช้โปรแกรม Proteus ได้อย่างถูกต้อง
- ต่อวงจรตัวอย่างเพื่อทดลองการวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรม Proteus ได้อย่างถูกต้อง
- ใช้เครื่องมือวัดและทดสอบค่ากระแสและแรงดันด้วยโปรแกรม Proteus ได้อย่างถูกต้อง
- วิเคราะห์วงจรเพื่อหาค่ากระแสและแรงดันด้วยโปรแกรม Proteus ได้อย่างถูกต้อง

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (จิตพิสัย) ที่มีการบูรณาการตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง

1. ความรับผิดชอบ
2. ความมีวินัย
3. การตรงต่อเวลา
4. ความมีมนุษยสัมพันธ์
5. ความรู้และทักษะวิชาชีพ
6. ความสนใจใฝ่หาความรู้
7. ศึกษาข้อมูลอย่างเป็นระบบ
8. ซื่อสัตย์ สุจริต จริงใจต่อกัน
9. การพึ่งตัวเอง
10. การมีส่วนร่วม

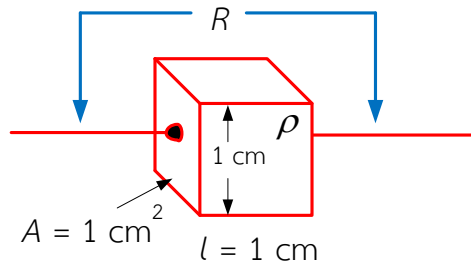
เนื้อหาสาระ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้นำวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำมาใช้ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แทนการใช้อุปกรณ์ที่ใช้หลักการของหลอดสุญญากาศ ทำให้อุปกรณ์ที่ได้มีขนาดเล็กลง และมีน้ำหนักเบา ไม่ต้องใช้ความร้อนในการอุ่นไส้หลอด มีความทนทานมากขึ้น ประหยัดพลังงานมากขึ้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปจะใช้หลักการควบคุมการไหลของอิเล็กตรอน ดังนั้นรายละเอียดการทำงานของอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ประเภทสารกึ่งตัวนำ จึงมีความจำเป็นต้องเรียนรู้ส่วนประกอบของอะตอม การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน พลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และโครงสร้างของรอยต่อพี-เอ็น การให้ไบอัสตรงและการให้ไบอัสกลับเพื่อให้ทราบถึงการไหลของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการให้ไบอัส

1.1 อะตอม (Atoms)

สารกึ่งตัวนำเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้า (Conductor) และฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ซึ่งเราสามารถแบ่งแยกได้โดยใช้ค่า ความนำจำเพาะ (Resistivity; ρ) ซึ่งหาได้จากการวัดค่าความต้านทาน (R) ของวัสดุที่มีขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 1.1

$$\begin{aligned} \text{เนื่องจาก} \quad \rho &= \frac{RA}{l} \quad , \Omega \text{- cm} \quad (1.1) \\ \text{ดังนั้นจะได้ว่า} \quad R &= \rho \frac{l}{A} \\ &= \rho \frac{(1\text{cm})}{(1\text{cm}^2)} \\ &= \rho \quad , \Omega \end{aligned}$$

รูปที่ 1.1 แสดงวัสดุที่มีขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

ที่มา : Robert Boylestad and Louis Nashelsky. **Electronic Devices And Circuit Theory**, Seventh Edition: New Jersey. Prentice Hall.

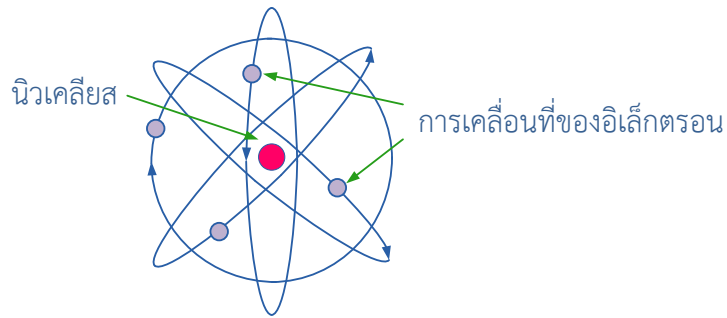
จากตารางที่ 1.1 เป็นการเปรียบเทียบความต้านทานจำเพาะของตัวนำที่ด้อย่างทองแดง กับสารกึ่งตัวนำ และ ฉนวนที่ด้อย่างไมกา ซึ่งทำให้ทราบว่า ฉนวนมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่าสารกึ่งตัวนำ และ สารกึ่งตัวนำก็มีค่าความต้านทานสูงกว่าตัวนำ

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบความต้านทานจำเพาะ

ตัวนำ	สารกึ่งตัวนำ	ฉนวน
$\rho \cong 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ทองแดง (Copper)	$\rho \cong 50 \Omega \cdot \text{cm}$ (Ge) $\rho \cong 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ (Si)	$\rho \cong 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ ไมกา (Mica)

ที่มา : Robert Boylestad and Louis Nashelsky. **Electronic Devices And Circuit Theory**, Seventh Edition: New Jersey. Prentice Hall.

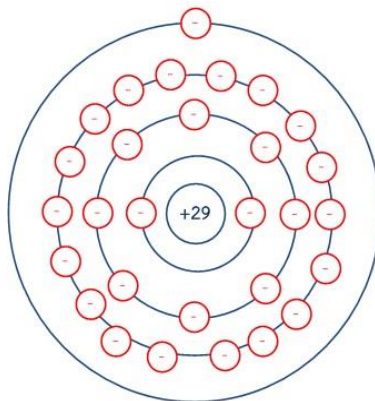
สสารทุกชนิดประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กที่สุดเรียกว่า อะตอม ซึ่งเราไม่สามารถทำการสร้างขึ้นใหม่แบ่งออกหรือทำลายให้สูญหายไปได้ โดยอะตอมแต่ละชนิดประกอบด้วยอนุภาคมูลฐานสำคัญ 3 ชนิด คือ 1. โปรตอน (Proton) 2. นิวตรอน (Neutron) 3. อิเล็กตรอน (Electron) โดยมีโปรตอนกับนิวตรอนอยู่ในนิวเคลียส (Nucleus) ซึ่งโปรตอนจะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกเท่ากับ 1.60×10^{-19} คูโลมป์ ส่วนอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นลบเท่ากับ -1.60×10^{-19} คูโลมป์ เราจะเห็นว่าจำนวนประจุไฟฟ้าของโปรตอนและอิเล็กตรอนจะเท่ากันแต่มีทิศตรงข้ามกัน ส่วนนิวตรอนจะไม่มีค่าประจุไฟฟ้า หรือเรียกได้ว่าเป็นกลางทางไฟฟ้านั่นเอง โครงสร้างของอะตอมดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 รูปแสดงโครงสร้างของอะตอม

ที่มา : สุคนธ์ พุ่มศรี. การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: ศูนย์ส่งเสริมอาชีพฯ, 2558.

ทองแดง นับได้ว่าเป็นตัวนำที่ดี ซึ่งเราเห็นได้ชัดเจน เมื่อเราพิจารณาไปที่ โครงสร้างอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยเราจะเห็นว่า นิวเคลียสของอะตอม จะประกอบไปด้วย โปรตอน 29 ตัว (ประจุบวก) เมื่ออะตอม ของทองแดงมีความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้าจะมี อิเล็กตรอน 29 ตัว (ประจุลบ) โคจรรอบ ๆ นิวเคลียส โดยจะมีจำนวน 2 ตัว ในวงโคจรแรก, 8 ตัว ในวงโคจรที่สอง, 18 ตัวในวงโคจรที่สาม และ 1 ตัวในวงโคจรนอกสุด ในด้านอิเล็กทรอนิกส์ วงโคจรวงนอกสุดของอะตอมมีชื่อเรียกว่า วงโคจรวาเลนซ์ (Valence Orbit) โดยวงโคจรวาเลนซ์นี้จะเป็นวงโคจรที่ควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของอะตอม ซึ่งถือได้ว่า เป็นวงโคจรที่มีความสำคัญในการนำมาประกอบการพิจารณาว่า สารชนิดนั้น มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็น ตัวนำ สารกึ่งตัวนำ หรือ ฉนวน



รูปที่ 1.3 แสดงโครงสร้างอะตอมของทองแดง

ที่มา : Albert Malvino and David J. Bates. Electronic Principles. Seventh Edition.

New York: McGraw-Hill, 2007.

เนื่องจาก แรงดึงดูดระหว่างแกนกลางของอะตอมหรือนิวเคลียส กับอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่ วงนอกสุดมีค่าน้อยมาก จึงทำให้ พลังงานจากภายนอกสามารถกระทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุด หลุดออกจากวงโคจรของอะตอม ได้อย่างง่ายดาย จึงเป็นเหตุผลที่บ่อยครั้ง เราเรียกอิเล็กตรอนในวงโคจรวงนอกสุดนี้ว่า อิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) นั้นแสดงให้เห็นว่า ทองแดง เป็นตัวนำที่ดี

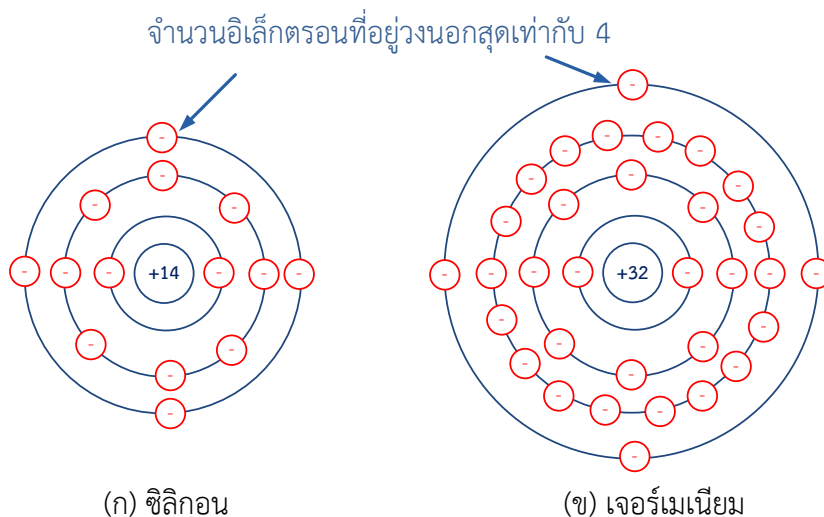
เพราะ เราใช้พลังงานกระทำเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่งที่อยู่ถัดไปได้

1.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductors)

อะตอมของตัวนำที่ตี เช่น เงิน, ทองแดง และทอง จะมีจำนวนอิเล็กตรอนเพียง 1 ตัว ในวงโคจรวงนอกสุด ในขณะที่อะตอมของฉนวนที่ตี จะมีจำนวนอิเล็กตรอน 8 ตัว ในวงโคจรวงนอกสุด สำหรับ สารกึ่งตัวนำ จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า อยู่ระหว่างตัวนำกับฉนวน ซึ่งเราพบว่า อะตอมของสารกึ่งตัวนำที่ตี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนในวงโคจรวงนอกสุด เท่ากับ 4 ตัว

สารเยอรมันเนียม (Germanium) เป็นตัวอย่างหนึ่งของสารกึ่งตัวนำที่มีจำนวนอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุด 4 ตัว ในอดีต สารเยอรมันเนียม เป็นเพียงสารชนิดเดียวที่เหมาะสมสำหรับการนำมาทำเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัว แต่ด้วยอุปกรณ์ที่ทำจากสารเยอรมันเนียม ยังมีข้อเสียในเรื่องการไหลของกระแสไหลย้อนกลับ (Reverse Leakage Current) ที่มากเกินไป โดยทางด้านวิศวกรรมยังไม่สามารถแก้ปัญหาได้ ซึ่งในที่สุดก็มีการพัฒนาสร้างสารกึ่งตัวนำที่มีชื่อว่าซิลิกอน (Silicon) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ กันอย่างแพร่หลาย จึงทำให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำจากสารเยอรมันเนียมไม่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานในยุคปัจจุบัน

สารซิลิกอนเป็นสารที่มีองค์ประกอบที่เหมาะสมมากที่สุดในการนำมาทำเป็นสารกึ่งตัวนำ แต่ก็มีปัญหาอยู่บ้างในการผลิต จึงทำให้ไม่สามารถใช้สารซิลิกอนทำเป็นสารกึ่งตัวนำในช่วงแรก ๆ แต่ในที่สุดปัญหานี้ก็ถูกแก้ไขได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้สารซิลิกอนถูกเลือกมาทำเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพื่อใช้งานในวงการอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ ทั้งทางด้านการสื่อสาร และคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1.4 แสดงโครงสร้างอะตอมของซิลิกอน และเจอร์เมเนียม

ที่มา : นภัทร วัจนเทพพิณฑ์. *อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์*. ปทุมธานี: สกายบุ๊กส์, 2538.

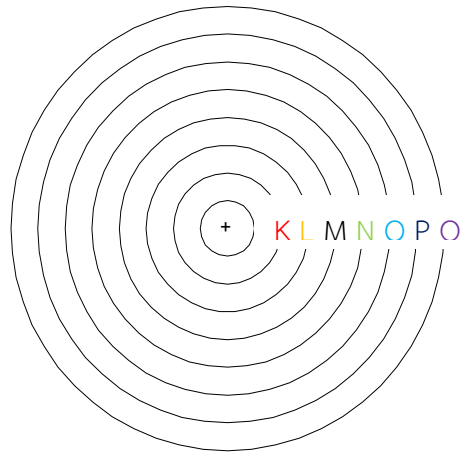
1.3 วงโคจรของอิเล็กตรอน และระดับพลังงาน (Electron Orbits And Energy Levels)

ภายในอะตอมของวัตถุหรือสารจะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียส โดยอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่ในแต่ละวงตามระดับพลังงาน โดยอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานน้อยที่สุดจะอยู่ใกล้

นิวเคลียส วงโคจรวงนอกสุดของสารซิลิกอนและเจอร์มันเนียมจะมีอิเล็กตรอน 4 ตัว และมีจำนวนโฮล (Hole) 4 ตัว ในข้อกำหนดในการบรรจุอิเล็กตรอนลงในวงโคจรนี้ “อิเล็กตรอนที่โคจรในวงนอกสุดจะมีจำนวนอิเล็กตรอนได้มากที่สุดไม่เกิน 8 ตัว”

ภายในอะตอมของสารที่มีอิเล็กตรอนวิ่งเคลื่อนที่อยู่โดยรอบอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะมีระดับพลังงานขึ้นอยู่กับค่า n ซึ่งค่า n เป็นเลขจำนวนเต็ม เช่น 1, 2 ระดับพลังงานต่ำสุดคือ $n = 1$ ระดับพลังงานสูงขึ้นไปคือ $n = 2, 3$ ขึ้นไปตามลำดับ ระดับพลังงานนี้แบ่งเป็นวง (Shell) ซึ่งให้ชื่อเป็นตัวอักษรเรียงกันดังนี้ K L M N O P Q ดังแสดงในรูปที่ 1.5

ระดับพลังงานถ้ามีค่า n น้อยสุดหมายถึงวงอยู่ใกล้นิวเคลียสมากที่สุด ดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานจากภายนอกมากขึ้นเพื่อที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างนิวเคลียสกับอิเล็กตรอนนี้ได้ ค่าแรงดึงดูดจะแปรตามกำลังของระยะห่างระหว่างวงนั้นกับนิวเคลียส



รูปที่ 1.5 วงโคจรอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส

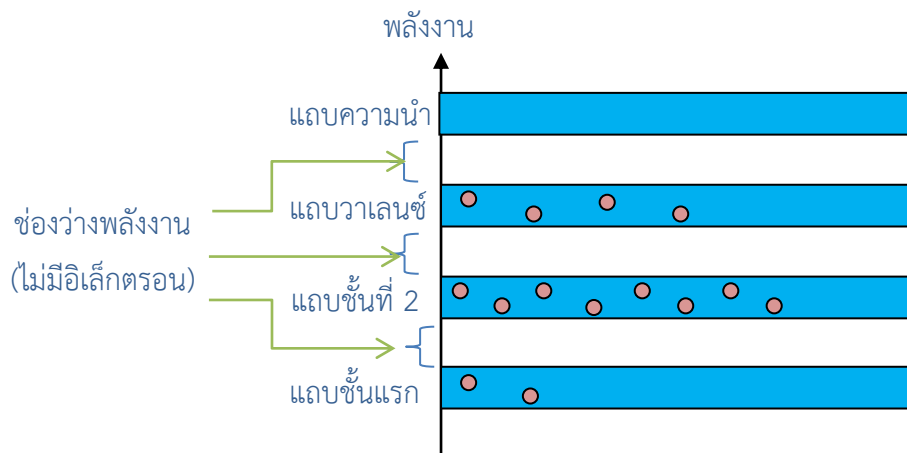
ที่มา : สุนทร พุ่มศรี. การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ, 2558.

การหาจำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละวง (Shell) หาได้จากสูตรจำนวนอิเล็กตรอน ในแต่ละวง $= 2n^2$
 วงโคจร K ค่าของ $n = 1$ จึงมีอิเล็กตรอนได้สูงสุดเท่ากับ $2 \times (1^2) = 2$ ตัว โดยมีชั้นย่อยเพียง 1 ชั้น
 วงโคจร L ค่าของ $n = 2$ จึงมีอิเล็กตรอนได้สูงสุดเท่ากับ $2 \times (2^2) = 8$ ตัว โดยมีชั้นย่อยเพียง 2 ชั้น
 วงโคจร M ค่าของ $n = 3$ จึงมีอิเล็กตรอนได้สูงสุดเท่ากับ $2 \times (3^2) = 18$ ตัว โดยมีชั้นย่อยเพียง 3 ชั้น
 วงโคจร N ค่าของ $n = 4$ จึงมีอิเล็กตรอนได้สูงสุดเท่ากับ $2 \times (4^2) = 32$ ตัว โดยมีชั้นย่อยเพียง 4 ชั้น
 วงโคจร O ค่าของ $n = 5$ จึงมีอิเล็กตรอนได้สูงสุดเท่ากับ $2 \times (5^2) = 50$ ตัว โดยมีชั้นย่อยเพียง 5 ชั้น
 วงโคจร P ค่าของ $n = 6$ จึงมีอิเล็กตรอนได้สูงสุดเท่ากับ $2 \times (6^2) = 72$ ตัว โดยมีชั้นย่อยเพียง 6 ชั้น
 วงโคจร Q ค่าของ $n = 7$ จึงมีอิเล็กตรอนได้สูงสุดเท่ากับ $2 \times (7^2) = 98$ ตัว โดยมีชั้นย่อยเพียง 7 ชั้น

ในอะตอมของสารซิลิกอน จะประกอบด้วยโปรตอนจำนวน 14 ตัว และอิเล็กตรอนจำนวน 14 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยที่วงโคจรแรกประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว วงโคจรที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอน 8 ตัว และที่สำคัญคือ วงโคจรวงนอกสุดมีจำนวนอิเล็กตรอน 4 ตัว นั้นแสดงให้เห็นว่า สารซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำ

1.4 แถบพลังงาน (Energy Bands)

จากโครงสร้างอะตอมของสารซิลิกอนจะเห็นว่า มีวงโคจรที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ชั้น ได้แก่ วงโคจรที่ 1 (1st Band) หรือชั้น K จะมีอิเล็กตรอน 2 ตัว วงโคจรที่ 2 (2nd Band) หรือชั้น L จะมีอิเล็กตรอน 8 ตัว วงโคจรที่ 3 เป็นวงโคจรวงนอกสุด (Valence Band) จะมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด (Valence Electron) 4 ตัว แต่ละชั้นของวงโคจรจะถูกกันด้วยช่องว่างพลังงาน (Energy Gaps) ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนโคจรตามรูปที่ 1.6

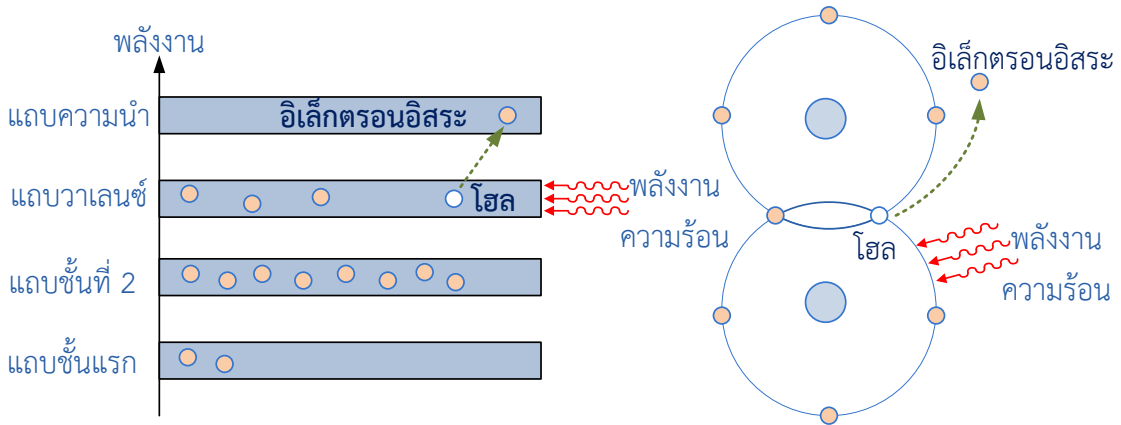


รูปที่ 1.6 แสดงไดอะแกรมของแถบพลังงานของอะตอมซิลิกอนในสถานะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
ที่มา : นภัทร วัจนเทพพิรินทร์. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. สกายบุ๊กส์, 2538. หน้า 14.

จากรูปที่ 1.6 ด้านบนของวงโคจรชั้นนอกสุดคือ แถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) ในวัสดุใด ๆ ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ หมายความว่า จะเกิดมีอิเล็กตรอนหลุดออกจากชั้นต่าง ๆ เข้าสู่วงโคจรแถบการนำไฟฟ้านี้ได้ก็ต่อเมื่อมีพลังงานมากกระทำต่ออะตอมของสารซิลิกอน

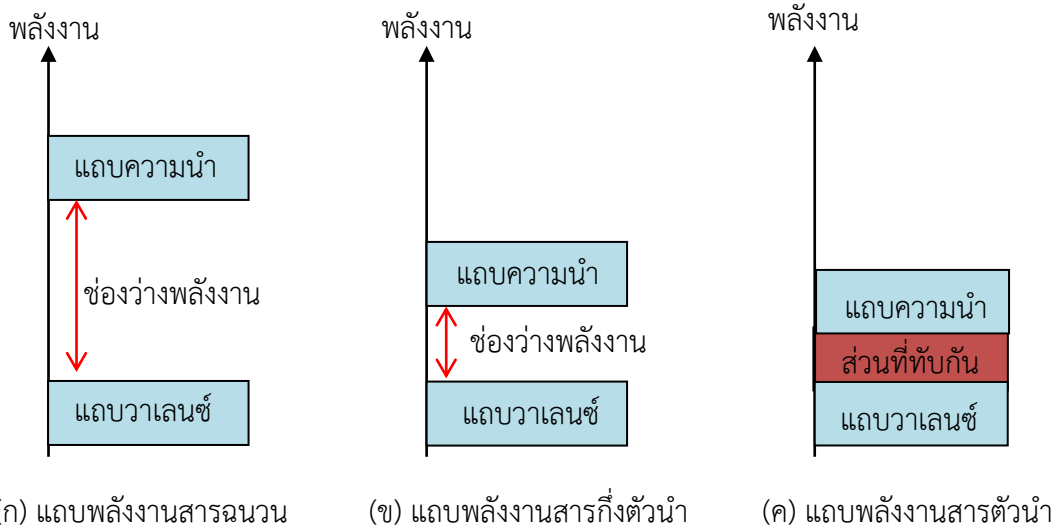
ตัวอย่างเช่น เมื่อให้พลังงานความร้อนกระทำต่ออะตอมของสารซิลิกอน ถ้าพลังงานความร้อนมากและสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนวงนอกสุด จะสามารถทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดหลุดออกจากวงโคจรกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) วิ่งเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้ากลายเป็นกระแสไฟฟ้า และตำแหน่งที่อิเล็กตรอนหลุดออกมาจะเกิดช่องว่างเรียกว่า โฮล ตามรูปที่ 1.7

สารกึ่งตัวนำซิลิกอน และเจอร์เมเนียม เนื่องจาก โครงสร้างอะตอมของเจอร์เมเนียมมีจำนวนอิเล็กตรอน 32 ตัว มีวงโคจรถึง 4 ชั้น มากกว่าซิลิกอนซึ่งมีจำนวนอิเล็กตรอน 14 ตัว จึงทำให้เมื่อเจอร์เมเนียมได้รับพลังงานจากภายนอก จะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมของเจอร์เมเนียมหลุดออกจากโคจรเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ง่ายกว่าอะตอมของซิลิกอน จึงเป็นผลให้ในการสร้างอุปกรณ์ที่นำไปใช้งานในที่อุณหภูมิสูง ๆ จึงนิยมใช้ซิลิกอนมากกว่าเจอร์เมเนียม



รูปที่ 1.7 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลในอะตอมของซิลิกอน
ที่มา : นภัทร วัจนเทพพินท์. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. ปทุมธานี: สกายบุ๊กส์, 2538.

ความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติทั้ง 3 อย่างของสาร พิจารณาได้จากช่องว่างของพลังงาน (Energy Gap) ระหว่างแถบความนำไฟฟ้า (Conduction Band) และชั้นนอกสุดของวงโคจรอะตอม (Valance Band) วัสดุที่เป็นฉนวนจะมีช่องว่างของพลังงานมากที่สุดแสดงว่า การเกิดอิเล็กตรอนอิสระ ยากมากจึงไม่มีกระแสไหลได้ในวัสดุที่เป็นฉนวน สำหรับสารกึ่งตัวนำช่องว่างของพลังงานจะแคบกว่า ฉนวนแสดงว่า อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นในแถบความนำได้เมื่อได้รับพลังงานจากภายนอก และตัวนำจะ ไม่มีช่องว่างของพลังงาน แต่แถบความนำจะซ้อนอยู่กับแถบของวงโคจรนอกสุดของอะตอม ดังแสดงใน รูปที่ 1.8

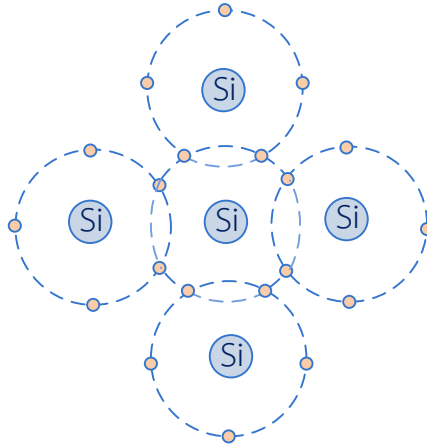


รูปที่ 1.8 แสดงแถบพลังงานในสาร ทั้ง 3 ชนิด

ที่มา : นภัทร วัจนเทพพินท์. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. ปทุมธานี: สกายบุ๊กส์, 2538.

1.5 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี (N-Type and P-Type Semiconductors)

ผลึกซิลิกอน(Silicon Crystals)



รูปที่ 1.9 แสดงโครงสร้างอะตอมของผลึกซิลิกอน (Silicon Crystals)

ที่มา : Albert Malvino and David J. Bates. **Electronic Principles**. Seventh Edition.
New York: McGraw-Hill, 2007.

เมื่ออะตอมของซิลิกอนรวมกัน จะอยู่ในรูปแบบของของแข็ง โดยจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ มีลักษณะที่เรียกว่า ผลึก ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรวงนอกสุดของอะตอม จะเกิดการรวมตัวกันกับอิเล็กตรอน ที่อยู่ในวงโคจรวงนอกสุดของอะตอมที่อยู่ข้างเคียง เรียกว่า อิเล็กตรอนร่วม (Share Electrons) เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น ให้พิจารณาได้จากรูปที่ 1.9 แสดงให้เห็นว่าอะตอมที่อยู่ตรงกลางจะมีอะตอมข้างเคียงที่มีอิเล็กตรอนร่วมกันอยู่ 4 อะตอม ซึ่งเดิมอะตอมที่อยู่ตรงกลาง จะมีจำนวนอิเล็กตรอนในวงโคจร วงนอกสุดเท่ากับ 4 ตัว แต่เมื่อมีการรวมตัวกันของอะตอม จึงทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตัว ทำให้ในวงโคจรวงนอกสุดมีอิเล็กตรอนรวมทั้งหมด 8 ตัว

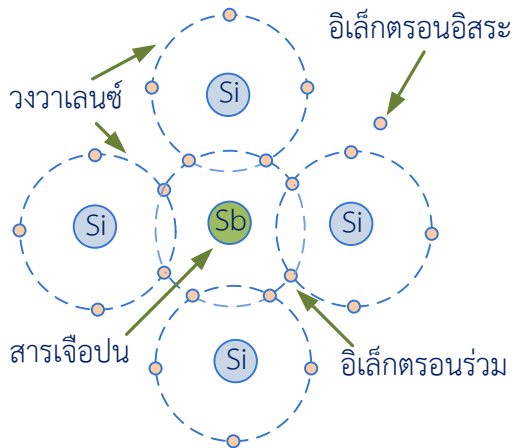
การโด๊ปสารกึ่งตัวนำ (Doping a Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่สามารถนำกระแสได้ดีเพราะว่า จำนวนของอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำ และ จำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์มีน้อย แต่เมื่อนำสารกึ่งตัวนำเช่นซิลิกอนและเจอร์เมเนียม มาปรับปรุงให้มีสถานะการนำไฟฟ้าให้ดีขึ้นโดยกระบวนการที่เรียกว่า การเติมสารเจือปน (Adding Impurities) ลงไปในผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เพื่อให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระหรือโฮลมากขึ้น

การโด๊ป หมายถึง การเติมอะตอมของสารเจือ ลงในผลึกสารเยอรมันเนียมหรือสารซิลิกอนที่บริสุทธิ์ สารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปแล้วเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์” (Extrinsic Semiconductor) ส่วนสารกึ่งตัวนำที่ยังไม่ถูกโด๊ปเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์” (Intrinsic Semiconductor)

การโด๊ปทำได้โดยการหลอมสารเยอรมันเนียม หรือสารซิลิกอนบริสุทธิ์ให้ละลายแล้ว จึงเติมสารเจือปนให้ผสมลงในเนื้อเดียวกัน สารเจือปนที่เติมลงไปนี้จะต้องมีจำนวนอิเล็กตรอนในวงโคจรวงนอกสุด 3 ตัว หรือ 5 ตัว ถ้าเติมสารเจือปนที่มีจำนวนอิเล็กตรอนในวงโคจรวงนอกสุดจำนวน 5 ตัว อะตอมของสาร เจือปนจะใช้วงโคจรร่วมกับอะตอมของเยอรมันเนียมหรือซิลิกอนจำนวน 4 อะตอม

ซึ่งจะมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกับอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกัน (Covalent) ทำให้อิเล็กตรอนเกินไปหนึ่งตัว ในกรณีนี้จะทำให้อิเล็กตรอนที่เกินอยู่ตัวหนึ่งไม่สามารถที่จะเข้าร่วมกันได้ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า “อิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron)” อะตอมของสารเจือปนที่เติมลงไปเรียกว่า “สารเจือปนผู้ให้” (Donor Impurity)



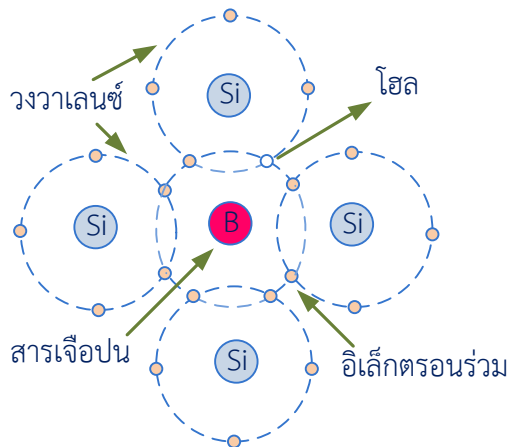
รูปที่ 1.10 แสดงการเติมพลังงานให้กับซิลิกอนบริสุทธิ์ทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยที่ Sb คือ ฟลวง และ Si คือ ซิลิกอน

ที่มา : http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_1.html

การสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ทำได้โดยการนำสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มาเติมอะตอมของสารอื่นๆ เข้าไปเจือปน ซึ่งจะทำให้จำนวนอะตอมและโหนดเปลี่ยนแปลงไป การสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ทำได้โดยเติมสารเจือปนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 5 ตัว เช่น สารหนู ฟอสฟอรัส หรือฟลวงดังแสดงในรูปที่ 1.10

จากรูปที่ 1.10 เป็นการเติมสารเจือปนฟลวง (Sb) เข้าไปในซิลิกอนบริสุทธิ์จะเห็นว่า อะตอมของซิลิกอนจำนวน 4 อะตอม จับวงโคจรของอิเล็กตรอนวงนอกสุดของพวกจำนวน 4 ตัว รวมกันเป็น 8 ตัว (ซึ่งคุณสมบัติของอิเล็กตรอนวงนอกสุดจะมีได้เพียง 8 ตัวเท่านั้น) ทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของพวกเหลือเป็นอิเล็กตรอนอิสระ 1 ตัว เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น (N-Type) ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากกว่าโหนด อิเล็กตรอนเหล่านี้เรียกว่า “พาหะข้างมาก” ส่วนโหนดที่มีจำนวนเล็กน้อยในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเรียกว่า “พาหะข้างน้อย”

ในกรณี ถ้าเติมถ้าเติมสารเจือปนที่มีจำนวนอิเล็กตรอนในวงโคจรวงนอกสุดจำนวน 3 ตัว อะตอมของสารเจือปนจะใช้วงโคจรร่วมกับ อะตอมของเยอรมันเนียมหรือซิลิกอนจำนวน 4 ตัว โดยการใช้อิเล็กตรอนร่วมกับ อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกัน (Covalent) จึงทำให้ขาดอิเล็กตรอนไปตัวหนึ่งโดยเกิดเป็นที่ว่างเรียกว่า โหนด ลักษณะของสารกึ่งตัวนำแบบนี้จะสามารถรับอิเล็กตรอนจากภายนอกได้อีก เพื่อให้จำนวนอิเล็กตรอนมีครบจำนวน 8 ตัว “สารเจือปนนี้เรียกว่า สารเจือปนผู้รับ” (Acceptor Impurity)



รูปที่ 1.11 แสดงการได้ปโบรอนเข้าไปในอะตอมของซิลิกอนบริสุทธิ์ทำให้เกิด

สารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยที่ B คือ โบรอน และ Si คือ ซิลิกอน

ที่มา : http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_1.html

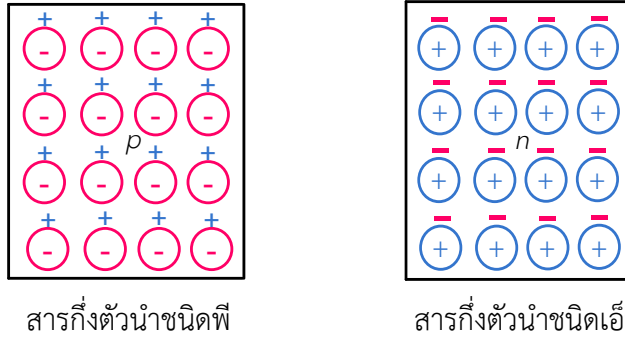
ตามรูปที่ 1.11 แสดงให้เห็นว่า ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type) ทำได้โดยการเติมสารเจือปนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดเท่ากับ 3 ตัว เช่น อะลูมิเนียม โบรอน แกลเลียม ลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวของอะตอมใหม่จับกันที่อิเล็กตรอนวงนอกสุดได้เพียง 3 ตัว เท่านั้น จึงเกิดโฮลขึ้น 1 ตัว เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี (P-Type) ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจึงมีโฮลเป็น “พาหะข้างมาก” และมีอิเล็กตรอนเป็น “พาหะข้างน้อย”

1.6 รอยต่อ พี-เอ็น (P-N Junction)

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี มาวางต่อกัน บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง เรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junctions) ซึ่งมีการนำกระแสในสภาวะต่าง ๆ มาพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด และทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

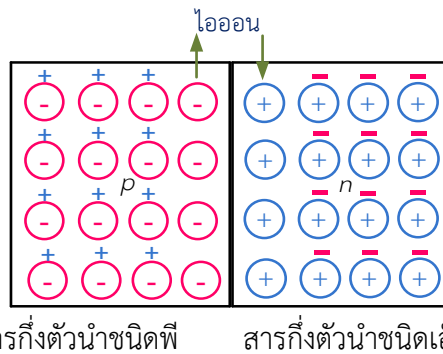
สารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีจำนวนพาหะข้างมากที่ต่างกัน ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีพาหะข้างมากคือ โฮล ส่วนสารชนิดเอ็นมีพาหะข้างมากคือ อิเล็กตรอนอิสระ ที่บริเวณรอยต่อเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮลผ่านรอยต่อเข้าหากัน ซึ่งโดยธรรมชาติแล้ว อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาโฮล การรวมตัวกันจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ พี-เอ็นเท่านั้น และเมื่อเกิดการรวมตัวดังกล่าว จะทำให้เกิดไอออนซึ่งแสดงสภาพประจุไฟฟ้าบวก และลบขึ้นบริเวณรอยต่อพี - เอ็น ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่รอยต่อพี - เอ็น ศักย์ไฟฟ้านี้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระรวมตัวกับโฮลหยุดลง และบริเวณที่มีไอออนบวกและไอออนลบดังกล่าวจะไม่มีประจุที่เป็นพาหะ (อิเล็กตรอนอิสระและโฮล) เหลืออยู่จึงเรียกบริเวณดังกล่าวว่า บริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ดังแสดงในรูปที่ 1.14

การเกิดไอออนบวกและไอออนลบที่บริเวณรอยต่อพาหะเป็นผลทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น เรียกว่า Barrier Potential ความต่างศักย์นี้ที่อุณหภูมิ 25°C จะมีค่าประมาณ 0.7 V สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และ 0.3 V สำหรับสารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมและถ้าอุณหภูมิของรอยต่อสูงขึ้น ค่าความต่างศักย์นี้ จะมีค่าลดลง



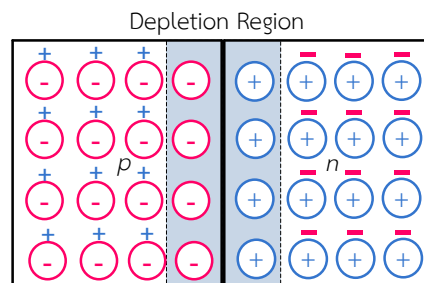
รูปที่ 1.12 แสดงสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ที่มา : Albert Malvino and David J. Bates. Electronic Principles. Seventh Edition.
New York: McGraw-Hill, 2007.



รูปที่ 1.13 แสดงการเกิดไอออนบริเวณรอยต่อพี-เอ็น

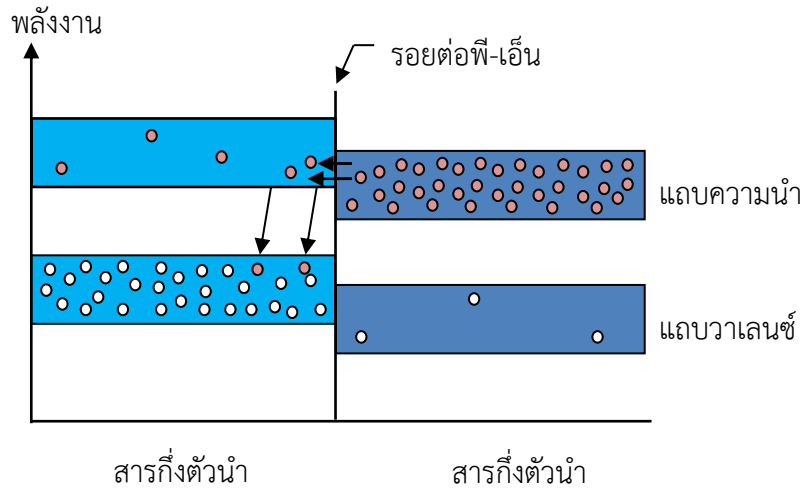
ที่มา : Albert Malvino and David J. Bates. Electronic Principles. Seventh Edition.
New York: McGraw-Hill, 2007.



รูปที่ 1.14 การเกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ที่รอยต่อพี-เอ็น

ที่มา : Albert Malvino and David J. Bates. Electronic Principles. Seventh Edition.
New York: McGraw-Hill, 2007.

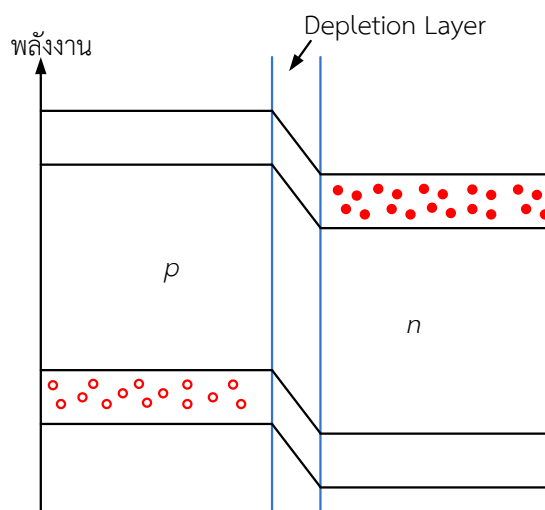
ไดอะแกรมพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นมาวางต่อกัน ในสภาวะเริ่มต้นอิเล็กตรอนอิสระจะข้ามรอยต่อพี-เอ็น วิ่งไปสู่สารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนอิสระบางส่วนที่วิ่งอยู่ในแถบความนำไฟฟ้าจะถูกโฮลดึงดูดเข้ารวมตัวกันและเกิดไอออนบวก และลบขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 1.15



รูปที่ 1.15 ไดอะแกรมพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ในสภาวะเริ่มต้น

ที่มา : Albert Malvino and David J. Bates. *Electronic Principles*. Seventh Edition. New York: McGraw-Hill, 2007.

เมื่อเวลาผ่านไปการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนอิสระกับโฮลบริเวณรอยต่อพี-เอ็นมากขึ้น จนเกิดความต่างศักย์ขึ้นที่รอยต่อ และเมื่อปฏิกิริยาการรวมตัวหยุดลงในสภาวะสมดุลบริเวณรอยต่อพี-เอ็นจะเกิดเป็นบริเวณปลอดพาหะขึ้น ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความต่างศักย์กันในแถบความนำไฟฟ้างดังรูปที่ 1.16



รูปที่ 1.16 ไดอะแกรมพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ในสภาวะหลังเกิด Depletion layer

ที่มา : Albert Malvino and David J. Bates. *Electronic Principles*. Seventh Edition. New York: McGraw-Hill, 2007.

1.7 การไบอัส (Bias) รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction)

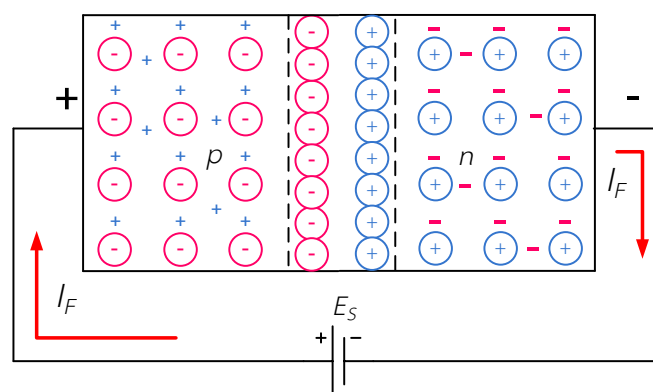
การไบอัสคือ การจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายภายนอกให้กับรอยต่อพี-เอ็น เพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น โดยลักษณะการไบอัสให้รอยต่อพี-เอ็น มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ การจ่ายไบอัสตรง (Forward Bias) และการจ่ายไบอัสกลับ (Reverse Bias)

ลักษณะการจ่ายไบอัสแต่ละแบบสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1.7.1 การจ่ายไบอัสตรง (Forward Bias)

ลักษณะการจ่ายไบอัสตรงคือ การจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยให้ขั้วบวกจ่ายให้สารกึ่งตัวนำชนิดพี และจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบให้กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การให้ไบอัสแบบนี้จะทำให้ความต้านทานบริเวณรอยต่อพี-เอ็น มีค่าต่ำเกิดการไหลของกระแสไหลผ่าน

จากรูปที่ 1.17 จะเห็นว่าเมื่อจ่ายแรงดันไบอัสตรงให้กับรอยต่อพี-เอ็น พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ไปผลักอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ จากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อพี-เอ็น เข้าไปรวมกับโฮล ที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในขณะที่ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงก็จะดึงอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้ามา เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้ามา จะทำให้ตำแหน่งที่มีอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นว่างลง เมื่อให้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงต่อไปให้อิเล็กตรอนอิสระของอะตอมถัดไปเคลื่อนที่เข้ามาแทนในตำแหน่งที่ว่างของอิเล็กตรอนอิสระ จึงเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระขึ้น ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า กระแสนี้จะถูกเรียกว่า กระแสอิเล็กตรอน ส่วนกระแสไฟฟ้าจะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกไปหาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบดังแสดงในรูปที่ 1.17

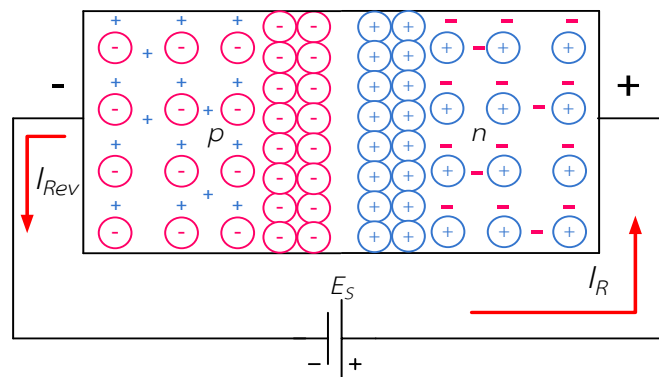


รูปที่ 1.17 แสดงการให้ไบอัสตรงแก่รอยต่อ พี -เอ็น

ที่มา : Albert Malvino and David J. Bates. Electronic Principles. Seventh Edition.
New York: McGraw-Hill, 2007.

1.7.2 การจ่ายไบอัสกลับ (Reverse Bias)

ลักษณะการจ่ายไบอัสกลับ คือขั้วของแรงดันที่จ่ายให้รอยต่อพี-เอ็น จะตรงข้ามกับการจ่ายไบอัสตรง มีลักษณะดังนี้คือ ขั้วบวกต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและขั้วลบต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังแสดงในรูปที่ 1.18 ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นลบ และความต่างศักย์ที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นบวก ซึ่งจะมีผลทำให้ โวล ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี เกิดการเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ขั้วที่มีความต่างศักย์ลบ และจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเกิดการเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ขั้วที่มีความต่างศักย์บวก ส่งผลให้ช่วงของรอยต่อพี-เอ็นกว้างขึ้น เปรียบเสมือนบริเวณรอยต่อพี-เอ็นมีค่าความต้านทานสูง จึงทำให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นได้ และถ้าหากเพิ่มพลังงานจากแหล่งจ่ายมากขึ้นจะทำให้เกิดกระแสรั่วไหลดังในรูปที่ 1.18 ค่ากระแสรั่วไหล (Leakege Current) หรือ I_R นี้จะมีค่าเป็นไมโครแอมป์ซึ่งมีค่าน้อยมาก ลักษณะการให้ไบอัสแบบนี้เรียกว่า “การจ่ายไบอัสกลับ”



รูปที่ 1.18 แสดงการให้ไบอัสกลับกับรอยต่อพี-เอ็น

ที่มา : Albert Malvino and David J. Bates. Electronic Principles. Seventh Edition.
New York: McGraw-Hill, 2007.