บทที่ 1
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำและหลอดสูญญากาศ

1.1 บทนำ

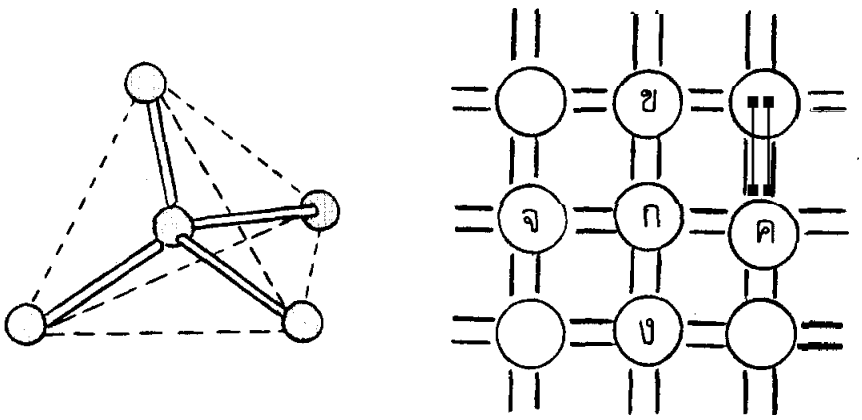
ในวงการที่อิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนับว่ามีบทบาทสำคัญมาก รายละเอียดของบทนี้เริ่มแต่ทฤษฎีพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ หลักการประดิษฐ์เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะต่อการใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กลไกของพาหะประจุภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ รอยต่อ pn ลักษณะสมบัติและการใช้ประโยชน์ของไดโอดแบบรอยต่อ pn และชนิดต่าง ๆ ของไดโอด เช่น ไดโอดแบบหลอดสูญญากาศ ไดโอดกำลัง เป็นต้น

ความรู้พื้นฐานในบทนี้ยังเชื่อมโยงกับบทที่สอง ซึ่งเป็นรายละเอียดเบื้องต้นเกี่ยวกับทรานซิสเตอร์อีกด้วย

1.2 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติก้ำกึ่งระหว่างตัวนำกับฉนวนไฟฟ้า เป็นธาตุอยู่ในแถวที่ 4 ของตารางธาตุ มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน (valence electron) คืออิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุด 4 ตัว ในสภาวะปกติจะเป็นผลึกรูปเทตตระฮีดรอน (tetrahedron) เช่น ซิลิคอน (silicon) เจอร์มาเนียม (germanium) แกลเลียม (gallium) เพชร เป็นต้น ในรูป 1.1 (ก) แสดงผลึกเดี่ยว และในการจับตัวเพื่อเป็นผลึกนั้น ย่อมต้องมีสารกึ่งตัวนำหลายอะตอมมาอยู่รวมกัน แต่ละอะตอมดังกล่าวนี้จะยึดเหนี่ยวกันแบบพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) ตัวอย่างโครงร่างแสดงในรูป 1.1 (ข) สมมติอะตอม ก ข ค ง และ จ ซึ่งคู่อะตอม ก และ ข ยึดเหนี่ยวกันโดยแบ่งวาเลนซ์ อิเล็กตรอนกัน อะตอมละ 1 ตัว เช่นเดียวกับลักษณะที่อะตอม ก ยึดกับอะตอม ค ง และ จ (ซึ่งเป็นอะตอมที่อยู่ติดกัน) เห็นได้ว่า อะตอม ก มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้งสิ้น 8 ตัว การจัดตัวลักษณะเช่นนี้ถือว่าอะตอมอยู่ในภาวะเสถียร ตามหลักทฤษฎีควอนตัม (Quantum Theory) นั่นคือ ในสถานะปกติ (ณ 0° K) สารกึ่งตัวนำจะทำหน้าที่นำไฟฟ้าได้เลว อาจถือเสมือนเป็นฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากวาเลนซ์อิเล็กตรอนยึดแน่นกับอะตอมแม่ ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระซึ่งทำหน้าที่เป็นพาหะประจุเกิดขึ้น

ที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปถือค่าประมาณ 25°C เปรียบเสมือนเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับผลึกสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนในผลึกจะดูดกลืนพลังงานดังกล่าว และเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ (kinetic energy) สะสมในตัวมันเอง ผลจะเป็นอย่างไร?



(ก) (ข)

รูป 1.1 (ก) โครงสร้างผลึกเดี่ยวของซิลิคอนและเจอร์มาเนียม
(ข) แผนภาพแสดงการยึดเหนี่ยวอะตอมข้างเคียงของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ตัวอย่างคืออะตอม ก ยึดเหนี่ยวอะตอม ข ค ง และ จ โดยแบ่งวาเลนซ์อิเล็กตรอน 1 ตัว ให้กับแต่ละอะตอมดังกล่าว เรียกการยึดเหนี่ยวลักษณะเช่นนี้ว่า "พันธะโควาเลนท์"

คำตอบคือ อิเล็กตรอนจะสั่นมากขึ้นเรื่อย ๆ และพลังงานนี้จะถูกส่งต่อไปเรื่อย ๆ ภายในผลึก เนื่องจากเกิดการชนกันระหว่างอนุภาค อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจร (binding energy) จะหลุดออกจากวงโคจรได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งก็คือพาหะประจุที่เคลื่อนที่ได้นั่นเอง ดังนั้น ผลึกจะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า สำหรับซิลิคอนต้องใช้พลังงานประมาณ 1.1 eV ในการปล่อย 1 อิเล็กตรอน ณ อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนไปไหน? มันจะเคลื่อนที่ไปในระวาง (space) ของผลึก ซึ่งก่อให้เกิดกระแสไหลภายในผลึกนั่นเอง ขณะเดียวกันพันธะโควาเลนท์ของอะตอมย่อมแตกออก เนื่องจากมีอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ฉีกพันธะยึดเหนี่ยว 1 แขน และหนีออกไปได้ ในอะตอมแม่จึงเกิดช่องว่างขึ้น เรียกชื่อเป็น "โฮล" (hole) ช่องว่างนี้จะถูกแทนที่โดยอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงที่อยู่ติดกัน เมื่อนึกภาพการเกิดแทนที่ดังกล่าวนี้ขึ้นหลาย ๆ อะตอมต่อเนื่องกัน จะดูเสมือนว่ามีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่องภายในผลึก ในทำนองเดียวกับโฮล แต่ทิศทางการเคลื่อนที่ตรง-

กันข้าม ดังนั้น ถือได้ว่าโฮลเป็นพาหะประจุอิสระ เคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนอิสระ และนำประจุบวก (อิเล็กตรอนนำประจุลบ) สรุปได้ว่า เมื่อเกิดการแตกตัวของหนึ่งพันธะโควาเลนท์ จะเกิดพาหะประจุ 2 ตัว คืออิเล็กตรอน และโฮล

ในสภาวะสมดุลย์ทางพลวัต (dynamics) การแตกหักของพันธะโควาเลนท์ย่อมเท่ากับการสร้างพันธะโควาเลนท์ขึ้นใหม่ ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนอิสระรวมตัวใหม่อีกครั้งหนึ่งกับโฮล (recombination) ถ้าพลังงานที่เกิดมีเพิ่มขึ้นในผลึกเป็นพลังงานความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการแตกตัวของพันธะโควาเลนท์เพิ่มขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นตาม และอัตราการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ย่อมเท่ากับอัตราการแตกตัวของพันธะโควาเลนท์ จำนวนประจุอิสระของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดไม่เท่ากัน เช่น เจอร์มาเนียม 1 ลบ.ซม. ประกอบด้วย 4.5×10^{22} อะตอม จะเกิดโฮลหรืออิเล็กตรอนอิสระจำนวน 2.4×10^{13} ตัว ส่วนซิลิคอนปริมาตรเท่ากันนี้ ประกอบด้วย 5.0×10^{22} อะตอม และเกิดโฮลหรืออิเล็กตรอนอิสระจำนวน 1.5×10^{10} ตัว

จากการยึดเหนี่ยวอะตอมด้วยพันธะโควาเลนท์ของสารกึ่งตัวนำ ก่อให้เกิดผลึกขึ้น ซิลิคอนชิ้นหนึ่งอาจประกอบด้วยผลึกเดี่ยว หรือหลาย ๆ ผลึกแยกกันอยู่ในลักษณะระเกะระกะ (random) และเชื่อมกันแบบไม่สม่ำเสมอตรงบริเวณแนวรอยต่อ ถ้าเป็นกรณีหลัง เรียกว่าซิลิคอนมีรูปหลายผลึก (polycrytalline form) ในปัจจุบัน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ดีที่สุดนั้นทำจากผลึกเดี่ยว แต่ยังคงมีการใช้สารที่มีรูปหลายผลึกเช่นกัน ผลึกเดี่ยวซึ่งมีโครงสร้างผลึกสม่ำเสมออย่างสมบูรณ์ จัดเป็นผลึกอุดมคติ ผลึกแท้จริงย่อมไม่มีความสมบูรณ์ (ซึ่งก่อให้เกิดผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึก) ได้แก่ การจัดเรียงตัวไม่ดี หรือมีสารเจือ (impurities) การจัดเรียงตัวไม่ดีเกิดจาก เมื่อมีหนึ่งอะตอม (หรือมากกว่าหนึ่งขึ้นไป) หายไปจากตำแหน่งที่ควรจะอยู่ในโครงสร้างของผลึก อะตอมของสารเจืออาจแทนที่ตำแหน่งว่างดังกล่าว หรืออาจอยู่ในระวาง (space) ระหว่างผลึกก็ได้

ย้อนกลับพิจารณาถึงความเร็วของโฮลและอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้น อิเล็กตรอนดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปในระวางของผลึก แต่โฮลเคลื่อนไปตามวงโคจรวาเลนซ์ ซึ่งมีลักษณะเหมือนหลุมที่อยู่นิ่ง ๆ มีระยะห่างคงที่ ดังนั้น อิเล็กตรอนจึงมีความเร็วมากกว่าโฮล

1.3 ทฤษฎีการโด๊ปสารกึ่งตัวนำ

ตามที่ได้กล่าวแล้วในตอน 1.2 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากจำนวนประจุบวกและลบอยู่ในสมดุลย์ เพื่อจะให้สารกึ่งตัวนำทำหน้าที่นำไฟฟ้าได้ดีตามต้องการ ต้องกระทำให้พันธะโควาเลนท์เกิดแตกตัวเพื่อจะได้พาหะประจุจำนวนมากเป็นตัวก่อให้เกิดกระแสไหล หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการลดค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ

การโด๊ป (doping) สารกึ่งตัวนำ เป็นการเติมสารเจือ (impurities) ให้กับผลึกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารเจือที่ใช้มี 2 พวกคือ (1) พวกมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ได้แก่ โบรอน (boron) อลูมิเนียม (aluminium) แกลเลียม (gallium) อินเดียม (indium) และ (2) พวกมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ได้แก่ ฟอสฟอรัส (phosphorous) อาร์เซนิค (arsenic) แอนติโมนี (antimony) เป็นต้น เหตุผลที่ใช้ธาตุมีวาเลนซี (valency) 3 หรือ 5 เป็นสารเจือ ทำหน้าที่เพิ่มจำนวนพาหะประจุของสารกึ่งตัวนำเป็นดังนี้

(1) การโด๊ปด้วยธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 อิเล็กตรอนของสารเจือ 4 ตัวจะยึดเหนี่ยวกับ 4 อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำด้วยพันธะโควาเลนท์ สารเจือยังเหลืออิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ซึ่งยึดเหนี่ยวกับอะตอมแม่อย่างหลวม ๆ ถ้าผลึกได้รับพลังงานเพิ่มเพียงเล็กน้อย อิเล็กตรอนดังกล่าวสามารถหลุดหนีออกจากวงโคจร กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ นำประจุลบ ลักษณะดังกล่าวนี้ อะตอมของสารเจือเป็น **อะตอมให้** (donor atom) อิเล็กตรอน ผลต่อมาคือ **อะตอมให้** กลายเป็นอะตอมที่ถูกทำให้แตกตัว หรือเรียกทับศัพท์ว่าเป็นอะตอมไอออนไนซด์ (ionized atom) ซึ่งมีประจุบวก ถูกขังไว้ในผลึก และไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ จะเรียกอะตอมนี้เป็นโฮลได้หรือไม่? คำตอบคือไม่ เนื่องจากอิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของสารเจือ ไม่ได้เคลื่อนไปแทนที่ช่องว่างซึ่งเกิดขึ้นภายในวงโคจรของอะตอมข้างเคียง

เรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกโด๊ปด้วย**อะตอมให้** เป็นสารกึ่งตัวนำ **ชนิด** n ซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะประจุไฟฟ้าส่วนใหญ่ และมีโฮลเป็นพาหะประจุส่วนน้อย

(2) การโด๊ปด้วยธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 การยึดเหนี่ยวของอะตอมสารเจือกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำ เป็นเช่นเดียวกับกรณีของการโด๊ปด้วยธาตุที่มีวาเลนซ์ 5 แต่อะตอมของสารกึ่งตัวนำยังขาดอิเล็กตรอนอีก 1 ตัว สำหรับจะแบ่งใช้ในพันธะโควาเลนท์ ถ้าอะตอมของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ติดกัน ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น ก็อาจปล่อยอิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรนอกสุด และอาจเข้าแทนที่ช่องว่างอิเล็กตรอนดังกล่าว เหตุการณ์เช่นนี้ คล้ายกับว่าอิเล็กตรอนเริ่มต้น ได้ปล่อยโฮลออกไปจากพันธะโควาเลนท์นั่นเอง ดังนั้น อะตอมนี้จึงมีสภาพเป็นไอออน (ion) ลบที่ถูกขังอยู่ในผลึก ไม่ใช่เป็นอิเล็กตรอนอิสระ

เรียกอะตอมเริ่มต้นดังกล่าวว่า **อะตอมผู้รับ** (acceptor atom) จัดเป็นสารกึ่งตัวนำ **ชนิด** p ซึ่งมีโฮลเป็นพาหะประจุส่วนใหญ่ มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะประจุส่วนน้อย

1.4 ลักษณการเคลื่อนที่ของพาหะประจุในสารกึ่งตัวนำ

การเคลื่อนที่ของพาหะประจุ ก่อให้เกิดกระแสไหลภายในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น จึง

สมควรศึกษาสาเหตุที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะประจุภายในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นไปได้เนื่องจากการที่ผลึกได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น การเพิ่มพลังงานนี้มี 2 แบบ

(1) เพิ่มอุณหภูมิให้กับผลึก

(2) ป้อนสนามไฟฟ้าอย่างแรงต่อผลึก

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับผลึก อิเล็กตรอนภายในผลึกถูกทำให้สั่นเรียกเป็น **การสั่นเนื่องจากความร้อน** (thermal agitation) ดังได้อธิบายรายละเอียดไปแล้วในหัวข้อ 1.3 ผลคือ โฮลและอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้น จะมีการเคลื่อนที่แบบตามยถากรรม (random) ตลอดผลึก เรียกว่าเกิดการแพร่กระจายของอิเล็กตรอนและโฮล ถ้าโฮลและอิเล็กตรอนอิสระใด ๆ เคลื่อนมาใกล้กัน ย่อมมีโอกาสเป็นไปได้ที่อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนเข้าแทนที่ว่างในพันธะโควาเลนท์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งถือ อิเล็กตรอนอิสระรวมตัวกับโฮล เรียกขบวนการนี้ว่า **การรวมตัวกันใหม่** (recombination) ของอิเล็กตรอนกับโฮล ซึ่งจะทำให้พาหะประจุหายไป ผลจากการศึกษาพบว่า โอกาสของการรวมตัวกันใหม่จะมีน้อยในบริเวณที่โครงสร้างของผลึกสมบูรณ์ แต่จะมีค่าสูงในบริเวณที่ผลึกมีลักษณะไม่สมบูรณ์ เช่น การจัดตัวผิดตำแหน่ง และการมีสารเจือ ดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ทองจัดเป็นสารเจือที่มีประสิทธิผลอย่างยิ่งต่อการเกิดรวมตัวกันใหม่ในผลึกซิลิคอน ดังนั้น มักใช้อะตอมของทองเจือเข้ากับซิลิคอน เพื่อเพิ่มอัตราการรวมตัวกันใหม่ ซึ่งจะมีอัตราการเกิดสูงที่บริเวณผิวหน้าของผลึก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีลักษณะไม่สมบูรณ์ เพราะอะตอมบริเวณผิวหน้าของผลึกจะมีช่องว่างในพันธะโควาเลนท์ ซึ่งปราศจากอะตอมภายนอกมายึดเกาะ ภายใต้ภาวะสมดุลย์ความร้อน (thermal equilibrium) อัตราการรวมตัวกันใหม่จะเท่ากับอัตราการแตกตัวของโฮลและอิเล็กตรอนอิสระ

ถ้าผลึกอยู่ภายใต้อำนาจสนามไฟฟ้า (electric field) ย่อมมีแรงไฟฟ้า (electric force) ทำให้อะตอมแตกตัว โดยเกิดการฉีกอิเล็กตรอนนอกจากพันธะโควาเลนท์ นอกจากนี้ สนามไฟฟ้ายังสามารถเร่งให้เกิดพาหะประจุที่มีพลังงานจลน์สูง เนื่องจากเกิดการสั่นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พาหะเหล่านี้จะชนอิเล็กตรอนให้หลุดจากพันธะโควาเลนท์ เรียกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุเนื่องจากผลึกได้รับสนามไฟฟ้าว่า การพัดพาไป (drift)

การเคลื่อนที่ของพาหะประจุทั่วผลึก ขึ้นกับแรงที่กระทำต่อมัน ซึ่งเกิดจากอนุภาคข้างเคียง พลวัต (dynamics) ของการเคลื่อนที่นั้นมีลักษณะซับซ้อนยุ่งยาก ต้องใช้ทฤษฎีควอนตัม (Quantum Theory) อธิบาย เช่น เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งผ่านผลึก จะมีค่ามวลยังผล (effective mass) แตกต่างไปจากเมื่ออยู่ในอวกาศภายนอก ส่วนโฮลจะประพฤติเสมือนอนุภาคที่มีมวลยังผลใกล้เคียงกับค่าของอิเล็กตรอน

ณ อุณหภูมิห้อง ค่าเฉลี่ยระยะทางระหว่างการชนกัน (mean free path) มีค่าประมาณ 0.1 ไมโครเมตร (μm) ใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 10^{7} ซม./วินาที (ประมาณ 200,000 mph) ดังนั้น เวลาเฉลี่ยในการชนกันคือ ประมาณ 10^{-12} วินาที นั่นคือ โดยเฉลี่ย อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก และอัตราการชนกันมีค่าสูง

ถ้าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ (หรือโฮล) มีลักษณะสม่ำเสมอทั่วผลึก จะไม่มีการไหลของอิเล็กตรอนอิสระในผลึก โอกาสของการพบว่าอิเล็กตรอนวิ่งไปทางซ้าย จะเท่ากับโอกาสของการพบว่าอิเล็กตรอนวิ่งไปทางขวา แต่ถ้าความหนาแน่นดังกล่าวมีค่าไม่สม่ำเสมอ ย่อมเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะประจุ (คืออิเล็กตรอนอิสระ หรือโฮล) อย่างแบบตามยถากรรม และจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของพาหะประจุสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ลักษณะเป็นเหมือนการกระจายของน้ำหมึกเมื่อถูกหยดลงในน้ำ กระแสนิยม (คือกระแสไฟฟ้านั่นเอง) มีทิศทาง **ตรงข้าม** กับทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนอิสระ แต่มีทิศทางเดียวกับโฮล

การที่ผลึกสารกึ่งตัวนำมีการแตกตัวตามอุณหภูมิดังกล่าว และก่อให้เกิดโฮลและอิเล็กตรอนในปริมาณเท่ากัน ดังนั้น จึงนำผลึกสารกึ่งตัวนำไปใช้ทำตัวต้านทานที่มีค่าแปรตามอุณหภูมิ ไดโอด และทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อ (คือนำสารกึ่งตัวนำสองชนิดมาต่อเชื่อมกัน) ซึ่งถ้าเป็นไดโอดหรือทรานซิสเตอร์อุดมคติสารกึ่งตัวนำแต่ละชิ้นควรมีพาหะประจุเพียงชนิดเดียว

1.5 รอยต่อ pn

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n มีความเข้มข้นของพาหะประจุไม่เท่ากัน เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดดังกล่าวมาเชื่อมต่อกัน ย่อมเกิด **การแพร่** ของพาหะประจุ (ทั้งอิเล็กตรอนและโฮล) แยกอธิบายได้ดังนี้

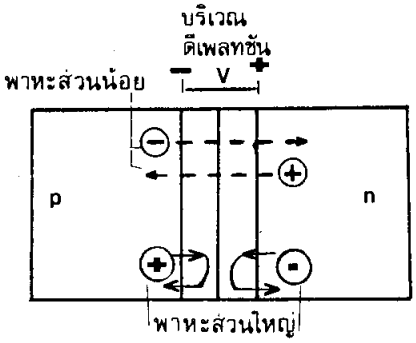
(1) อิเล็กตรอนอิสระซึ่งเป็นพาหะประจุส่วนมากในสารกึ่งตัวนำชนิด n จะเคลื่อนสู่สารกึ่งตัวนำชนิด p ซึ่งมีโฮลเป็นพาหะประจุส่วนมาก เมื่อได้เข้าไปอยู่ในสารชนิด p แล้ว มันอาจเคลื่อนเข้าไปแทนที่ว่างอิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนท์ที่ 4 ของอะตอม **ผู้รับ** ซึ่งย่อมจะต้องเป็นอะตอมที่อยู่ใกล้บริเวณตะเข็บ pn ลักษณะเช่นนี้คล้ายกับว่าอิเล็กตรอนอิสระจากสาร n เข้ารวมตัวกับโฮลในสาร p ดังนั้น อะตอมของสารชนิด n ย่อมขาดอิเล็กตรอน กลายสภาพเป็นไอออนบวก และถูกขังอยู่ในผลึกสารกึ่งตัวนำนั้นเอง

(2) ในทำนองเดียวกัน โฮลในสารกึ่งตัวนำชนิด p อาจรวมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระในข้อ (1) ดังอธิบายแล้ว จากนั้นทำให้อะตอมของสารชนิด p กลายเป็นไอออนลบ และถูกขังอยู่ในผลึก ณ บริเวณแนวตะเข็บ pn (หรืออาจพิจารณาเป็นว่า โฮลมีการแพร่กระจายจากสารชนิด p สู่สารชนิด n ซึ่งมีโฮลอยู่จำนวนน้อยกว่าก็ได้)

เหตุการณ์ทั้งสอง ย่อมเกิดขึ้นเสมอ ตราบเมื่อยังไม่เกิดความสมดุลย์ของปริมาณอิเล็กตรอนอิสระและโฮลในสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด (ลักษณะเช่นนี้ คล้ายกับคุณสมบัติการรักษาระดับของน้ำในภาชนะต่างชนิดกัน แต่มีท่อเชื่อมต่อกันนั่นเอง) ดังนั้น เกิดมีไอออนบวกและลบซึ่งถูกขังอยู่ภายในผลึกสารกึ่งตัวนำ และเคลื่อนที่ไม่ได้ แต่จะเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อย ๆ ผลคือเกิดสภาพคล้ายกำแพงหรือทำนบ ในที่นี้เรียกเป็น **ทำนบแรงดันไฟฟ้า** (voltage barrier) อยู่ ณ บริเวณแนวตะเข็บ pn ซึ่งจะมีทำนบของพวกไอออนบวกอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิด n และที่ทำนบของพวกไอออนลบอยู่ในสารชนิด p ดังแสดงในรูป 1.2 พิจารณาต่อไปว่า เมื่อทำนบไอออนลบอยู่ใกล้กับทำนบไอออนบวก ย่อมเกิดสนามไฟฟ้า มีทิศทางจากไอออนบวกไปยังไอออนลบ เห็นได้ว่า ลักษณะดังกล่าวนี้เป็นเช่นเดียวกับตัวจุ (capacitor) ที่ถูกป้อนประจุเข้าไว้ สรุปได้ว่า รอยต่อ pn มีคุณสมบัติของตัวจุ คือมีความสามารถในการเก็บประจุ และมีค่าความจุ (capacitance)

เรียกทำนบของไอออนดังกล่าวว่า ทำนบแรงดันไฟฟ้า (voltage barrier) หรือจะเรียกเป็นกำแพงศักย์ไฟฟ้าก็ได้

หน้าที่ของทำนบแรงดันไฟฟ้า คือ รักษาสภาวะสมดุลย์ทางพลวัตของรอยต่อ pn กล่าวคือ ถ้าเกิดมีอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งเป็นพาหะประจุส่วนมากของสาร n



รูป 1.2 แสดงรอยต่อ pn อิเล็กตรอนอิสระ ⊖ ในสารกึ่งตัวนำชนิด n ซึ่งมีปริมาณมากกว่าในสารชนิด p จะแพร่กระจายเข้าสู่สารชนิด p และทิ้งไอออนบวกไว้ ณ บริเวณใกล้รอยต่อ pn ทำนองเดียวกับโฮล ⊕ ทิ้งไอออนลบไว้เช่นกัน

ได้รับพลังงาน ทำให้เคลื่อนไปยังรอยต่อ pn ทำนบแรงดันไฟฟ้าจะผลักอิเล็กตรอนตัวนี้ ให้คืนกลับสู่สาร n แต่ย่อมมีอิเล็กตรอนอิสระบางตัวที่ได้รับพลังงานสูง จนทำให้สามารถข้ามทำนบไปได้ ซึ่งมันจะกลายเป็นพาหะประจุส่วนน้อยของสาร p ลักษณะการกระทำดังกล่าวนี้ เป็น

เช่นเดียวกับโฮล ซึ่งเป็นพาหะประจุส่วนมากของสาร p และย่อมมีโฮลจำนวนหนึ่งที่สามารถข้ามทำนบนี้ไม่ได้ จากนั้น จะปะปนเป็นพาหะส่วนน้อยอยู่ในสาร n ปริมาณของโฮลและอิเล็กตรอนอิสระที่แพร่เข้าสู่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะเท่ากันหรือไม่? คำตอบคือ ตราบใดที่ยังไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้าจากวงจรภายนอก (เช่น จากแบตเตอรี่ (battery) เป็นต้น) ย่อมเกิดสภาวะสมดุลย์ทางพลวัตภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด แน่นอนว่าปริมาณโฮลและอิเล็กตรอนอิสระจากพาหะประจุส่วนมาก ที่เกิดมีการแลกเปลี่ยนระหว่างสารชนิด p และ n นั้น **ย่อมไม่เท่ากัน** แต่จะมีโฮลและอิเล็กตรอนอิสระอีกจำนวนหนึ่ง ซึ่งถูกจัดเป็นพาหะประจุส่วนน้อยในสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p ตามลำดับ พาหะประจุดังกล่าวมีการเคลื่อนที่ดังนี้ เลือกอธิบายกลไกของอิเล็กตรอนอิสระจากพาหะส่วนน้อยในสาร

เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มและเคลื่อนที่เข้าใกล้บริเวณตะเข็บ pn มันจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ข้ามทำนบแรงดันไฟฟ้าบริเวณตะเข็บ เนื่องจากบริเวณใกล้แนวตะเข็บในฝ่ายสารชนิด n จะมีไอออนบวกฝังอยู่ในผลึก ส่วนการเคลื่อนที่ของโฮลจากพาหะส่วนน้อยในสาร n ก็อธิบายในทำนองเดียวกัน แต่การถูกเร่งเกิดจากไอออนลบที่ฝังอยู่ในฝ่ายสาร p (ดูรูป 1.2) การแลกเปลี่ยนพาหะประจุเป็นไปแบบสุ่ม แต่ก่อให้เกิดสภาวะสมดุลย์ทางพลวัตภายในสารกึ่งตัวนำ pn

เรียกชื่อบริเวณทำนบแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวเป็น **บริเวณดีเพลทชัน** (depletion region)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะเป็นรอยต่อ pn ดังกล่าว ได้แก่ ไดโอดชนิดรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งพัฒนาจากแนวความคิดของไดโอดแบบหลอดสูญญากาศ ดังจะได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

1.6 การป้อนแรงดันไฟฟ้าแก่ไดโอดแบบรอยต่อ pn

การป้อนแรงดันไฟฟ้าให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น เรียกว่า **การไบแอส** (biasing) ในการไบแอสไดโอดทำได้ 2 วิธี ดังนี้

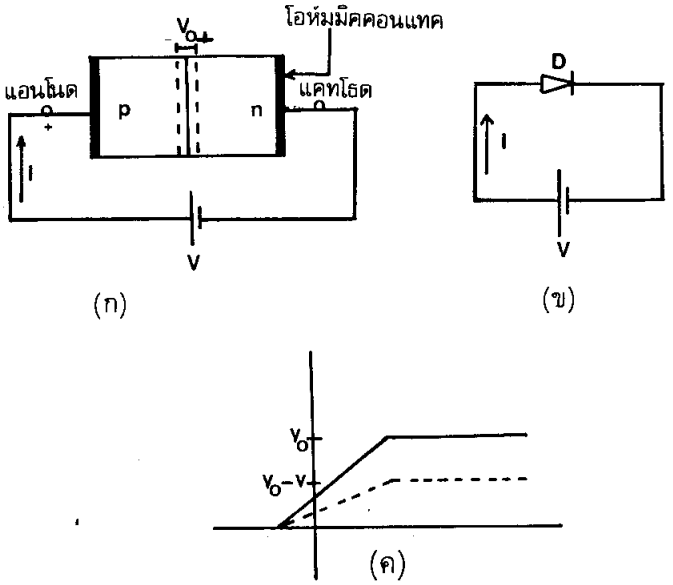
(1) ต่อขั้วบวกของแบตเตอรี กับด้าน p ของไดโอด เรียกว่า การไบแอสตรง (forward biasing)

(2) ต่อขั้วลบของแบตเตอรี กับด้าน p ของไดโอด เรียกว่า การไบแอสกลับ (reverse biasing)

พิจารณา**การไบแอสตรง** แรงเคลื่อนไฟฟ้าจากแบตเตอรี จะหักล้างกับศักย์ที่ทำนบแรงดันไฟฟ้า ผลคือ ทำนบแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำลง ดังนั้น พาหะประจุส่วนมากในสาร p (คือโฮล) สามารถข้ามผ่านไปยังสาร n ได้มาก ทั้งนี้ สารกึ่งตัวนำทั้งชนิด n และ p ถูกสร้าง

โดยการโด๊ปให้มีความต้านทานต่ำ นอกจากนี้ ที่ขาของไดโอดยังมีบริเวณสำหรับแตะกับธาตุวงจรภายนอกอีกบริเวณหนึ่ง เรียกชื่อเป็น โอห์มมิคคอนแท็ค (ohmic contact) ซึ่งมีความต้านทานต่ำมาก สัญญลักษณ์ของไดโอดแบบรอยต่อ pn จึงถูกกำหนดให้เป็นหัวลูกศรชี้ตามทิศทางการไหลของกระแสไฟ ดังแสดงในรูป 1.3 และกระแสดังกล่าวเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุส่วนมาก

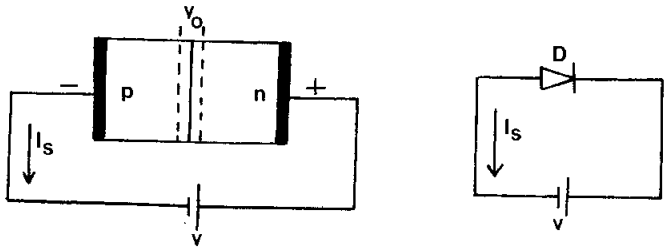
ต่อไปพิจารณาการไบแอสไดโอดแบบย้อนกลับ ซึ่งขั้วลบของแบตเตอรี V ต่อกับสาร p แรงดันไฟฟ้าจากวงจรภายนอก (คือ V) จะเพิ่มทำนบศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้น พาหะประจุส่วนมากสามารถข้ามทำนบนี้ไปได้เพียงจำนวนน้อย แต่พาหะประจุส่วนน้อย จะยิ่งถูกเร่งให้ผ่านไปยังอีกสารหนึ่งอย่างเร็ว (พาหะประจุส่วนน้อยของสาร p คืออิเล็กตรอนอิสระ และของสาร n คือโฮล) ดังนั้น กระแสที่เกิดขึ้นจึงเป็นกระแสเนื่องจากพาหะประจุส่วนน้อย ไหลสวนทิศกับกรณีการไบแอสตรง ปริมาณของกระแสนี้เป็นอย่างไร? คำตอบคือ กระแสเนื่องจากการไบแอสย้อนกลับ จะมีปริมาณน้อยกว่าการไบแอสตรง เนื่องจากพาหะประจุส่วนน้อยมีจำนวนน้อย (เพราะทำการโด๊ปให้มีค่าน้อย)



รูป 1.3 (ก) แผนภาพรอยต่อ pn *เมื่อต่อขั้วบวกของแบตเตอรี* V *กับด้าน* p
(ข) สัญญลักษณ์ของไดโอดแบบรอยต่อ pn *ที่ใช้ในวงจรไฟฟ้าทั่วไป*
(ค) แสดงกราฟของปริมาณแรงดันไฟฟ้า โดย V_o = *ทำนบศักย์ไฟฟ้า* V = *แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี*

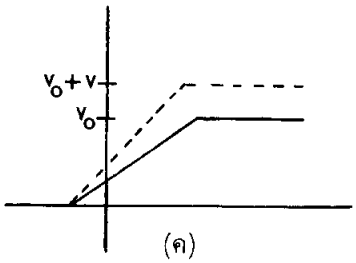
โดยทั่วไป ใช้สัญญลักษณ์ I_s แทนกระแสย้อนกลับนี้ แสดงในรูป 1.4 อักษร s ห้อยล่างนั้น หมายถึงการอิ่มตัว (saturation) กล่าวคือ เป็นจำนวนพาหะประจุส่วนน้อยทั้งหมดที่ก่อให้เกิดกระแสย้อนกลับ จึงเรียก I_s เป็นกระแสย้อนกลับอิ่มตัว (reverse saturation current) ปริมาณจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะประจุส่วนน้อย ไม่ขึ้นกับปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแบบย้อนกลับ เพราะพาหะประจุส่วนน้อยมีจำนวนขึ้นอยู่กับปริมาณการแตกตัวของพันธะโควาเลนท์ ซึ่งมากขึ้นตามอุณหภูมิ

จากที่กล่าวมาแล้ว สรุปได้ว่า ไดโอดมีหน้าที่การทำงานคล้ายเป็นสวิทซ์ไฟฟ้า ซึ่งปิดเมื่อได้รับไบแอสตรง และเปิดเมื่อได้รับการไบแอสกลับ ในตาราง 1.1 แสดงลักษณะสมบัติของไดโอด



(ก)

(ข)



(ค)

รูป 1.4 (ก) แผนภาพรอยต่อ ได้รับการไบแอสกลับ และทิศทางของกระแสไฟฟ้า
(ข) สัญญลักษณ์ไดโอดแบบรอยต่อ
(ค) ท้านบศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ pn *มีค่าสูงขึ้นเป็น* $V_o + V$

ตาราง 1.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดแบบรอยต่อสารกึ่งตัวนำ

ไดโอด	รับไบแอสตรง	รับไบแอสกลับ
ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม	ต่ำ	สูง
ปริมาณกระแสไฟในวงจร	มาก	น้อย (คือ I_s)
ความกว้างของบริเวณดีเพลทชัน	แคบลง	กว้างขึ้น

ในการนำไดโอดไปใช้ประโยชน์นั้น สิ่งที่น่าสนใจคือค่ากระแสในวงจรที่ต่อไดโอดกับแหล่งจ่ายไฟตรง เช่น แบตเตอรี เป็นต้น อาศัยคุณสมบัติที่ศึกษาจากฟิสิกส์ของแข็ง (solid-state physics) กระแสดังกล่าวนี้สามารถเขียนแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ ซึ่งขึ้นกับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ T_k (โดย K หมายถึงองศาเคลวิน) และแรงดันไบแอส V ดังนี้

$$I = I_s(e^{kV/\eta K} - 1) \qquad \text{.....(1.1)}$$

โดย I_s เป็นกระแสย้อนกลับอิ่มตัว

k เป็นค่าคงที่ ถูกกำหนดให้มีค่า $k = q/\eta K$

โดย q = ประจุของอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

K = ค่าคงที่โบลทซ์แมน (Boltzmann) = 1.38×10^{-23} จูลย์/°K

η = ค่าคงที่ สำหรับซิลิคอนมีค่าเป็น 2 แต่เจอร์มาเนียมมีค่าเป็น 1

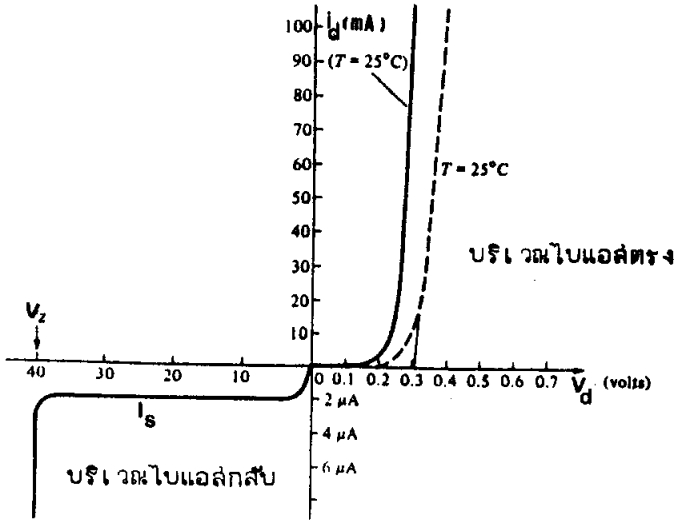
ดังนั้น k = 11600 สำหรับเจอร์มาเนียม

= 5800 สำหรับซิลิคอน

ตัวประกอบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) จะทำให้กระแส I เพิ่มสูงมาก ถ้า V มีค่าสูง ลักษณะสมบัติโดยทั่วไปของไดโอด แสดงอยู่ในรูป 1.5 ซึ่งเป็นเส้นกราฟพล็อตจากสมการ (1.1) และได้จากไดโอดเจอร์มาเนียมที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด สังเกตข้อแตกต่างเล็กน้อยของเส้นกราฟทั้งสองในบริเวณไบแอสตรง ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทาน 2 ชนิดคือ

(1) ความต้านทานของตัวสารกึ่งตัวนำ มักเรียกเป็นก้อนความต้านทาน (bulk resistance)

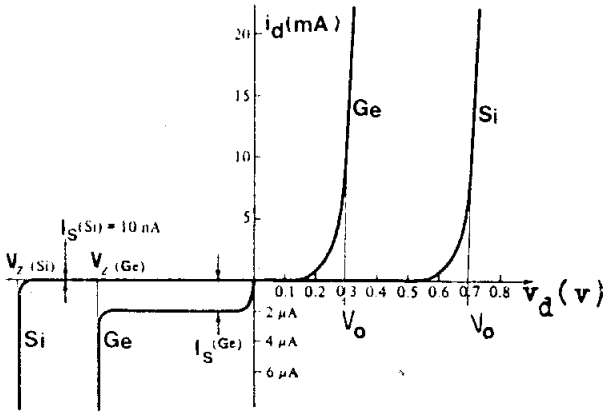
(2) ความต้านทานที่บริเวณตำแหน่งสัมผัส ซึ่งเป็นตำแหน่งเชื่อมต่อสารกึ่งตัวนำกับโลหะตัวนำภายนอกไดโอด



รูป 1.5 เส้นกราฟแสดงลักษณะสมบัติของไดโอด บริเวณไบแอสตรงและไบแอสกลับ

พิจารณาบริเวณที่มีการไบแอสย้อนกลับ จากการทดลองพบว่า กระแสย้อนกลับอิ่มตัว I_s ของไดโอดเจอร์มาเนียม เพิ่มค่าเกือบเป็นสองเท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C ดังนั้น กระแสย้อนกลับอิ่มตัวมีค่า 1-2μA ณ อุณหภูมิห้อง (25°C) ถ้าอุณหภูมิเพิ่มเป็น 100°C จะทำให้กระแสย้อนกลับอิ่มตัวมีค่าเป็น 100μA (= 0.1 mA) เห็นได้ว่า อุณหภูมิจัดเป็นตัวประกอบสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก แต่สำหรับไดโอดซิลิคอน I_s มีค่าน้อยมาก ประมาณ 0.01 μA ณ อุณหภูมิห้อง และประมาณ 1μA ณ 100°C น้อยกว่าค่าของไดโอดเจอร์-มาเนียมประมาณ $10^2 - 10^3$ เท่า ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของไดโอดซิลิคอน

ถ้าป้อนไบแอสกลับด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าสูง ๆ เช่น 200 โวลท์ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าแรงมาก สามารถเร่งพาหะประจุส่วนน้อยให้มีความเร็วสูง ซึ่งถ้าพาหะประจุส่วนน้อยดังกล่าวนี้เคลื่อนไปชนกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำ ผลที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือ ทำให้พันธะโควาเลนท์แตกตัว พาหะประจุ (อิเล็กตรอน หรือโฮล) ที่เกิดจากการแตกตัวของพันธะโควาเลนท์ จะตกอยู่ในสภาพถูกเร่งเนื่องจากแรงของสนามไฟฟ้าดังกล่าวข้างต้นด้วย ดังนั้น จะเกิดพาหะประจุอิสระมากมาย เปรียบเทียบลักษณะเช่นนี้เหมือนกับการถล่มของหิมะ (avalanching) นั่นคือ กระแสย้อนกลับอิ่มตัวจะเพิ่มค่าขึ้นอย่างรวดเร็ว จนในที่สุด ทำให้ไดโอดพังเสียหาย เรียกค่าแรงดันไฟฟ้านี้ว่า **แรงดันพัง** (breakdown voltage) ถ้าพล็อตกราฟค่ากระแสผ่านไดโอดกับค่าแรงดันไฟฟ้า แรงดันพังจะปรากฏเป็นเส้นตรง ไม่ว่ากระแสจะมีค่าอย่างไร นั่นคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดมีสภาพเป็นค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับกระแส ดังแสดงในรูป 1.6



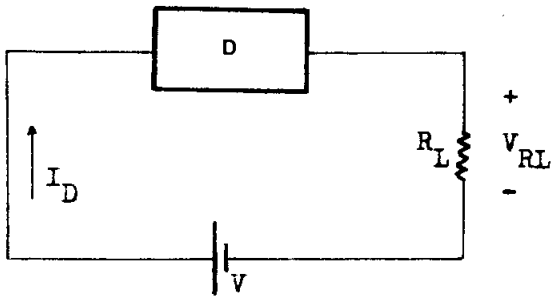
รูป 1.6 แสดงลักษณะสมบัติของไดโอดแบบรอยต่อ pn *ชนิดเจอร์มาเนียม* (Ge) *และซิลิคอน* (Si) *โดยแกนตั้งเป็นค่ากระแสผ่านไดโอด แกนนอนเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด*

เมื่อนำไดโอดไปใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อป้องกันการพังของไดโอด เนื่องจากแรงดันพังดังกล่าว จำต้องพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงเกินกำหนด แต่มีไดโอดอีกหลายชนิดซึ่งถูกโด๊ปให้มีสารเจือหนาแน่นต่าง ๆ กันไป เพื่อประโยชน์ในการใช้งานเฉพาะได้อย่างทนทาน เช่น ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) สามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันพังของไดโอดธรรมดา จะกล่าวรายละเอียดในตอน 1.9

1.7 ลักษณะสมบัติของไดโอดในวงจรไฟฟ้า

1.7.1 กระแสและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด

จากคุณสมบัติของไดโอดดังกล่าวข้างต้น เป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไดโอดไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้า นอกจากนี้ จำต้องมีรายละเอียดของลักษณะสมบัติอื่น ๆ ของไดโอดเมื่อถูกต่อในวงจรไฟฟ้า เช่น แรงดันตกคร่อมไดโอด ความต้านทานของไดโอด เป็นต้น ขั้นแรก เริ่มศึกษาจากสภาพการทำงานเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรูป 1.7 เป็นวงจรพื้นฐานของไดโอด ในกรอบที่เขียน D แสดงถึงการใช้ไดโอดชนิดใดก็ได้



รูป 1.7 วงจรพื้นฐานของไดโอด

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's law) สำหรับแรงดันไฟฟ้าครบรอบวงจร เขียนได้ดังนี้

$$V = V_D + V_R \qquad \text{.....(1.2)}$$

จัดรูปสมการใหม่ ให้อยู่ในรูปของ V_D ซึ่งต้องการทราบค่า และแทนค่า $V_R = I_D R$ ดังนั้น

$$V_D = V - I_D R \qquad \text{.....(1.3)}$$

ในสมการ (1.3) ตัวแปร V_D และ I_D เป็นตัวแปรไม่อิสระ ส่วน V และ R เป็นค่าคงที่ การหาคำตอบของสมการ (1.3) จำต้องอาศัยค่าอื่นที่เกี่ยวข้อง พิจาณาไดโอด กระแสของไดโอดเป็นฟังค์ชัน (function) ของแรงดันตกคร่อมไดโอด เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$I_D = f(V_D) \qquad \text{.....(1.4)}$$

ย้อนเขียนสมการ (1.3) ใหม่ ให้อยู่ในรูปของ I_D เช่นเดียวกัน

$$I_D = \frac{-1}{R} V_D + \frac{V}{R} \qquad \text{.....(1.5)}$$

สมการเส้นตรงทั่วไป $y = mx + c$ .....(1.6)

เปรียบเทียบสมการ (1.5) กับ (1.6) ดังนี้

$y \equiv I_D$ เป็นค่าตัวแปร y

$x \equiv V_D$ เป็นค่าตัวแปร x

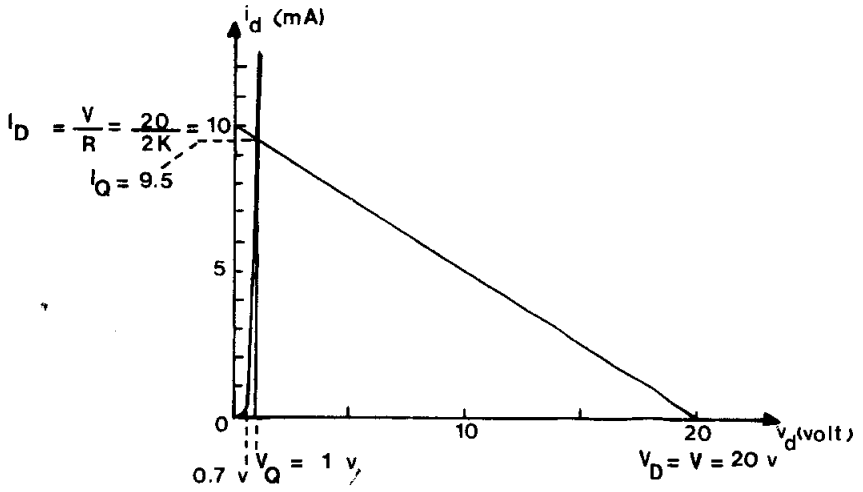
$m \equiv \frac{-1}{R}$ เป็นความชันของเส้นกราฟ หรือเรียกเป็นสโลป (slope) มีค่าเป็นลบ กล่าวคือ I_D มีค่าลดลงเมื่อ V_D เพิ่มขึ้น

การหาจุดตัดของเส้นกราฟบนแกนตั้งและแกนนอน ทำโดยตั้งเงื่อนไขดังนี้

(1) ถ้า $V_D = O$, $I_D = V/R$ .....(1.7)

(2) ถ้า $I_D = O$, $V_D = V$ .....(1.8)

เมื่อได้ตำแหน่งจุดตัด จากนั้นลากเส้นตรงต่อจุดทั้งสองนั้น เรียกเส้นกราฟนี้ว่า **"เส้นโหลด"** ซึ่งมีสมการเส้นโหลดเป็นไปตามสมการ (1.3) แสดงในรูป ๆ.๘ ที่มาของการเรียกชื่อเส้นกราฟดังกล่าว เนื่องจากเป็นเส้นกราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนในวงจร และค่าโหลด สังเกตุว่า สมการเส้นโหลดไม่แสดงลักษณะสมบัติของไดโอดเลย อย่างไรก็ตาม ในรูป 1.8 ได้พล็อตเส้นโหลดซ้อนลงบนกราฟลักษณะสมบัติของไดโอด จุดตัดของเส้นโหลดตัดกับเส้นกราฟลักษณะสมบัติ เป็นตำแหน่งจุดทำงานของไดโอด เนื่องจากจุดนี้ขึ้นกับสัญญาณกระแสตรงขาอินพุท บางครั้งจึงเรียกเป็นจุดควิเอสเซนต์ (quiescent) แทนด้วยสัญญลักษณ์ Q



รูป 1.8 แสดงเส้นโหลด และจุดทำงาน Q ของวงจรรูป 1.7 โดย V = 20v, R = 2K

1.7.2 ความต้านทานต่อกระแสตรงของไดโอด

ค่าความต้านทานนี้เรียกได้ว่าเป็นค่านิ่ง ณ จุดทำงานดังแสดงในรูป 1.8 เห็นได้ว่าไดโอดมีแรงดันและกระแสไฟฟ้าคงที่ จากกฎของโอห์ม (Ohm's law)

$$R_{dc} = \frac{V_D}{I_D} \qquad \text{.....(1.9)}$$

ถ้าใช้ค่า V_D = 1 volt, $I_D = 9.5 \times 10^{-3}$ Ampere

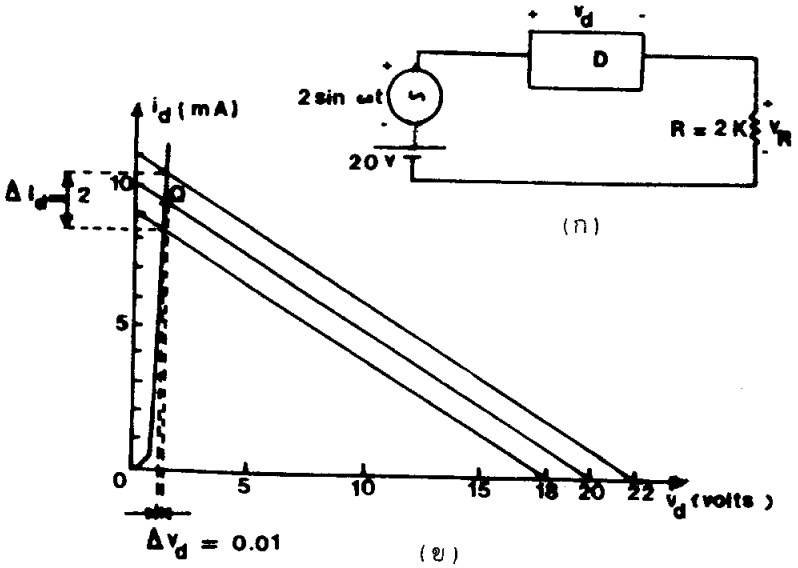
$$R_{dc} = 1/(9.5 \times 10^{-3}) = 105.2 \text{ Ohm}$$

แต่ถ้าเป็นบริเวณไบแอสกลับ สมมุติ $V_D = -20$v และกระแสย้อนกลับอิ่มตัว $I_s = 1\ \mu$A

$$R_{dc} = \frac{20}{1 \times 10^{-6}} = 20\ \text{M}\Omega$$ ซึ่งมากกว่า 105.2 โอห์ม มาก

1.7.3 ความต้านทานต่อกระแสสลับของไดโอด

เมื่อป้อนสัญญาณกระแสสลับในวงจรไดโอด ดังแสดงใน รูป 1.9 (ก) สัญญาณที่ป้อนเข้านั้นเป็นคลื่นซายน์ (sine wave) บนแนวกระแสตรง แรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ผ่านไดโอดมีค่าไม่คงที่ ผลคือ ทำให้เส้นโหลดเคลื่อนไปจากเดิม ในรูป 1.9 (ข) แสดงเส้นโหลดเมื่อสัญญาณอินพุท

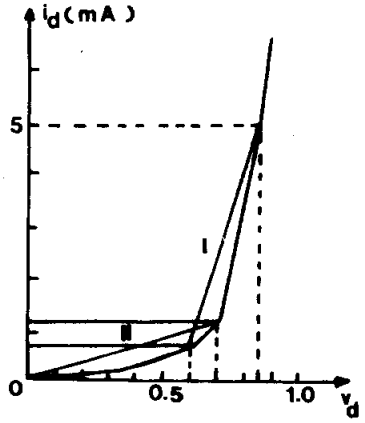


รูป 1.9 แสดงความต้านทานของไดโอดที่มีต่อกระแสสลับ (ก) เป็นแผนผังวงจร (ข) ผลลัพธ์ที่เกิดในบริเวณทำงาน

มีค่าเป็นค่ายอดด้านบวกและลบ ดังนั้น ความต้านทานของไดโอดย่อมแปรค่าไปแต่ละตำแหน่ง วิธีการหาค่าโดยทั่วไปทำโดยลากเส้นสัมผัสกับเส้นกราฟ ผ่านจุดทำงาน Q แสดงในรูป 1.10 ดังนี้

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}\Big|_{\text{เส้นสัมผัส}} \qquad \text{.....(1.10)}$$

และ $$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \sim \frac{0.01}{2 \times 10^{-3}} = 5 \text{ Ohm}$$



รูป 1.10 แสดงการแบ่งส่วนของเส้นกราฟลักษณะสมบัติของไดโอดเพื่อหาค่าความต้านทานไดนามิคส์ของไดโอด

จากหลักคณิตศาสตร์ ถ้าการแปรค่าดังกล่าวเป็นค่าน้อย ๆ สามารถแทนได้ด้วยค่าอนุพันธ์ (derivative) ดังนี้

$$r'_d = \frac{dV}{dI} \qquad \text{.....(1.11)}$$

นั่นคือ สามารถหาค่าความต้านทานไดนามิคส์ของไดโอดโดยใช้สมการ (1.1) จากนั้นหาอนุพันธ์เทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้า

$$\frac{dI}{dV} = \frac{k}{T_k}(I + I_s)$$

พิจารณากรณี $I \gg I_s$ ถือได้ว่า $I + I_s \sim I$ และดังกล่าวแล้วข้างต้นว่า

$$k = \frac{11600}{\eta} = 11600 \qquad (\text{เมื่อ } \eta = 1)$$

(ในแนวแกนตั้ง ถือว่า $\eta = 1$ ทั้ง Ge และ Si)

ถ้าคิด ณ อุณหภูมิห้อง $T_k = T_C + 273 = 25 + 273 = 298^{\circ}C$

นั่นคือ $$\frac{dI}{dV} = \frac{11600}{298} I \sim 38.93\, I$$

หรือ $$\frac{dV}{dI} = \frac{1}{3893\, I} \sim \frac{0.026}{I}$$

เขียนได้เป็น $$r'_d = \frac{dV}{dI} = \frac{0.026}{I_D} = \frac{26\ \text{mv}}{I_D} \qquad \text{.....(1.12)}$$

1.7.4 ความต้านทานเฉลี่ยต่อกระแสสลับของไดโอด

ถ้าสัญญาณป้อนเข้า มีขนาดมากพอสมควรที่จะก่อให้เกิดการแกว่งของสัญญาณจากคำจำกัดความ ค่าความต้านทานเฉลี่ยต่อกระแสสลับของไดโอดหาโดย

(1) ลากเส้นตรงต่อจุด 2 จุด ในช่วงที่ต้องการทราบค่า ในรูป 1.10 แบ่งเป็นบริเวณที่ I และ II

(2) หาค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่แปรไป (คือ ΔV และ ΔI นั่นเอง)

โดยอาศัยข้อมูลจากรูป 1.10 ในบริเวณที่ I

$$r_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}\Big|_{\text{จุดถึงจุด}} = \frac{0.85 - 0.6}{(5 - 0.75) \times 10^{-3}} = 58.8\ \Omega$$

ในบริเวณที่ II

$$r_{av} = \left.\frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}\right|_{\text{จุดถึงจุด}} = \frac{0.7-0}{(1.2-0)\times 10^{-3}} = 583\ \Omega$$

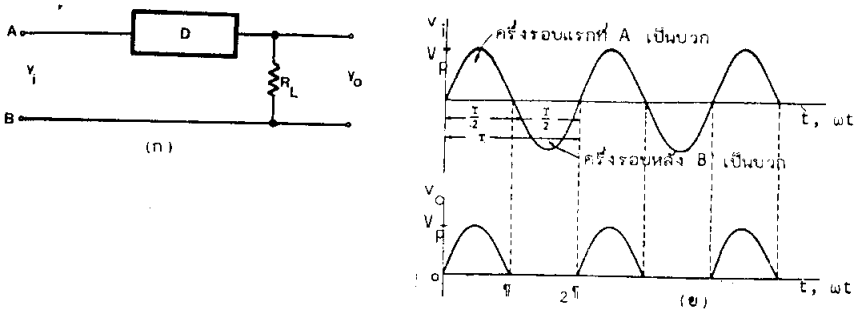
ข้อสังเกต คือ บริเวณที่กระแสเพิ่มอย่างรวดเร็วจนเกือบขนานกับแนวแกนตั้ง (แกน y) ค่าความต้านทานเฉลี่ยต่อกระแสสลับจะมีค่าน้อย เนื่องจากการแปรค่าของกระแสมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการแปรค่าของแรงดันไฟฟ้า ส่วนในบริเวณที่ II กระแสแปรค่าตามแรงดันไฟฟ้า เส้นกราฟเกือบเป็นเส้นตรงขนานกับแกนนอน (แกน x) ค่า r_{av} จะมีค่ามาก

1.8 การประยุกต์ไดโอดในวงจรไฟฟ้า

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ไดโอดเหมาะสมจะเป็นตัวเรียงกระแส (rectifier) เนื่องจากมีคุณสมบัติให้กระแสไหลทิศทางเดียว ดังนั้น จึงนิยมใช้เป็นวงจรจ่ายไฟ (power supply) ให้กับเครื่องขยาย (amplifier) คำว่า "เรียงกระแส" หมายถึงจัดเรียงกระแสสลับ (ac) ให้เป็นกระแสตรง (dc) ซึ่งแยกได้เป็นชนิด เรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น เต็มคลื่น และแบบบริดจ์ (bridge) ดังจะกล่าวรายละเอียดในตอนต่อไป นอกจากนี้ ยังต้องใช้วงจรกรองกระแส เพื่อจัดให้สัญญาณมีลักษณะราบเรียบดีขึ้นนั่นเอง หน้าที่อื่น เช่น เป็นวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า (voltage regulator) เป็นต้น ในหนังสือเล่มนี้ จะเลือกอธิบายวงจรของไดโอดที่เป็นพื้นฐานหรือใช้เป็นวงจรร่วมกับเครื่องขยายเท่านั้น

1.8.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier)

ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟสลับเป็นกระแสไฟตรงเพียงครึ่งคลื่นของไฟกระแสสลับ ลักษณะวงจรแสดงในรูป 1.11 (ก) โดย v_i เป็นต้นกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้า ณ จุด A และ B เปลี่ยนขั้วสลับกันไปทุก ๆ ครึ่งคาบ รายละเอียดการทำงานของวงจรมีดังนี้



รูป 1.11 (ก) โครงร่างวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (ข) ลักษณะของสัญญาณคลื่นอินพุทเปรียบเทียบกับของด้านเอาท์พุท ในช่วงเวลาเดียวกัน

(1) ในช่วงครึ่งคาบที่ A เป็นบวก B เป็นลบ คือจากช่วง 0 ถึง π ในรูป 1.11 (ข) ไดโอดอยู่ในสภาพถูกป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบตรง ซึ่งถือได้ว่าไดโอดมีความต้านทานน้อยมาก จนเกือบมีค่าเป็นศูนย์ จึงมีกระแสไหลผ่านไดโอดได้มาก จากนั้นไหลผ่าน R_L และกลับมาถึงจุด B เพื่อให้ครบวงจร แรงดันไฟฟ้าขาออก v_0 เป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานโหลด R_L ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าขาออก จะมีค่าใกล้เคียงค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าหรือไม่นั้น ขึ้นกับปริมาณความต้านทานของไดโอดเมื่อได้รับการไบแอสตรง

(2) ถ้าขั้ว B เป็นบวก และ A เป็นลบ ซึ่งเป็นช่วง π ถึง 2π ในรูป 1.11 (ข) ลักษณะเช่นนี้กล่าวได้ว่า ไดโอดได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบย้อนกลับ ซึ่งไดโอดจะมีความต้านทานสูงจนเกือบถึงอนันต์ ดังนั้น ถือเสมือนว่าไม่มีกระแสไฟในวงจร นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าขาออก v_0 มีค่าเป็นศูนย์

จากรูป 1.11 (ข) เห็นได้ชัดว่า แรงดันไฟฟ้าขาออก v_0 มีลักษณะเป็นไฟตรง เนื่องจากมีทิศทางเดียว แต่ขนาดไม่คงที่

$$V_{RL} = V_{dc} = V_{av} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} v \, d\omega t$$

แทนค่า v ของวงจรครึ่งคลื่น โดย $v = V_m \sin \omega t, \quad 0 < \omega t < \pi$

$$v = 0 \quad , \quad \pi < \omega t < 2\pi$$

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \, d\omega t + 0$$

$$= \frac{V_m}{2\pi} [\cos \omega t \, dwt]_0^{\pi}$$

$$= \frac{Vm}{\pi} = \frac{\sqrt{2}\, V_{rms}}{\pi} = 0.45\, V_{rms}$$

(สำหรับสัญญาณรูปไซน์ $V_m = \sqrt{2}\, V_{rms}$)

1.8.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

ถ้าต้องการให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก มีลักษณะเป็นไฟตรงแบบเต็มคลื่น ต้องใช้วงจรดังแสดงในรูป 1.12 (ก) ซึ่งประกอบด้วยไดโอด 2 ตัว ต่อขนานกัน แรงดันไฟฟ้าขาออก v_0 เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานโหลด R_L เพื่อสะดวกในการเข้าใจลักษณะการทำงานของวงจรนี้ เลือกพิจารณาเป็นช่วงเวลาที่มีผลให้ตำแหน่ง A และ B เป็นบวกหรือลบ ตามลำดับ

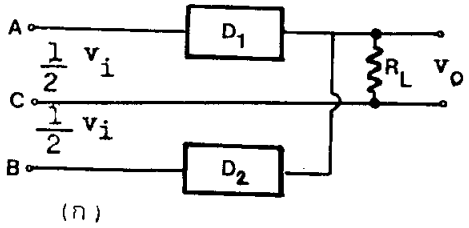
(1) เมื่อจุด A เป็นบวก ไดโอด D_1 ได้รับไบแอสตรง แต่ D_2 ได้รับไบแอสกลับ กระแสไฟมีทิศทางจากจุด A ไปยังไดโอด D_1 ผ่าน R_L และจุด C ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าขาออก v_o เป็นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานโหลด (แสดงในรูป 1.12 (ข)) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวนี้ เกิดในช่วงครึ่งคาบแรก (0 ถึง π)

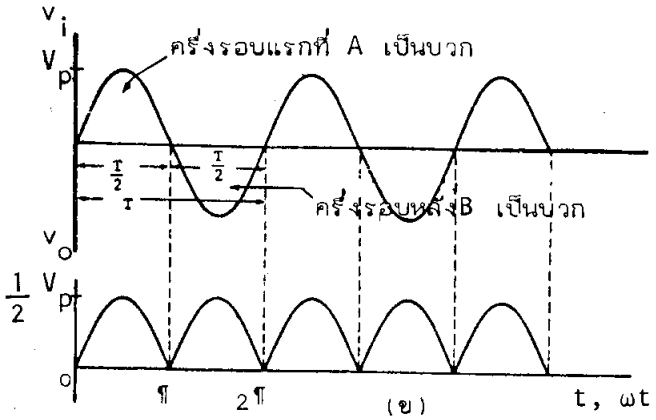
(2) ในช่วงครึ่งคาบหลัง (π ถึง 2π) จุด B มีสภาพเป็นบวก ไดโอด D_2 ได้รับไบแอสตรง ส่วน D_1 ได้รับไบแอสกลับ นั่นคือ กระแสไฟไหลจาก B ไปยังไดโอด D_2 ผ่าน R_L และจุด C ตามลำดับ ลักษณะของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก (วัดคร่อมตัวต้านทานโหลด R_L) เป็นดังแสดงในรูป 1.12 (ข)

สรุปได้ว่า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก เป็นไฟกระแสตรง V_p เป็นค่ายอดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ac ขาเข้า ถ้าไดโอดทั้งสองได้รับไบแอสตรง ให้ถือว่าความต้านทานของมันมีค่าน้อยมาก (เกือบเป็นศูนย์) ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าโดยประมาณเป็น $V_p/2$

เนื่องจากแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานโหลดของวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่น มีค่ามากกว่าชนิดครึ่งคลื่น 1 เท่า ดังนั้น

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{rms} = 0.9\,V_{rms}$$



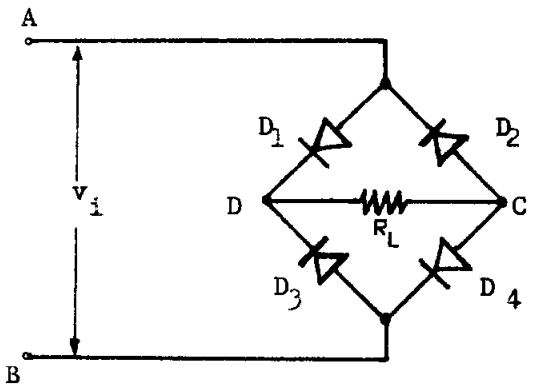


รูป 1.12 (ก) โครงร่างวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่น (ข) ลักษณะของสัญญาณคลื่นด้านเอาท์พุท เปรียบเทียบกับด้านอินพุท ในช่วงเวลาเดียวกัน

1.8.3 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟกระแสสลับ เป็นไฟกระแสตรงชนิดเต็มคลื่น ใช้ไดโอด 4 ตัว ต่อในวงจรดังแสดงในรูป 1.13 อธิบายลักษณะการทำงานดังนี้

(1) เมื่อสัญญาณขาเข้าอยู่ในช่วงบวก จุด A เป็นบวก ไดโอด D_1 และ D_4 ได้รับไบแอสตรง ส่วนไดโอด D_2 และ D_3 ได้รับไบแอสกลับ กระแสไฟไหลจากจุด A ผ่านไดโอด D_1 ผ่านตัวต้านทานโหลด R_L ไปยังจุด C ผ่านไดโอด D_4 ไปยังจุด B ถ้าเป็นกรณีไดโอดอุดมคติ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานโหลดเท่ากับขนาดสัญญาณที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง



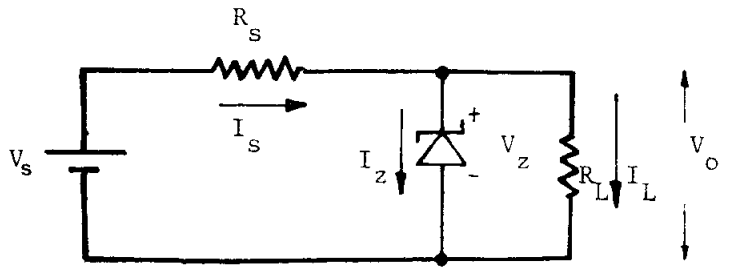
รูป 1.13 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ซึ่งประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว

(2) เมื่อสัญญาณขาเข้าอยู่ในช่วงลบ จุด A เป็นลบ จุด B เป็นบวก ไดโอด D_3 และ D_2 ได้รับไบแอสตรง แต่ D_1 และ D_4 ได้รับไบแอสกลับ กระแสไฟไหลจากจุด B ผ่าน D_3 และตัวต้านทานโหลด R_L ไปยังจุด C ผ่าน D_2 ไปยังจุด A แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานโหลด เท่ากับขนาดสัญญาณที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

$$PIV = V_m \quad \text{และ} \quad V_{dc} = \frac{2}{\pi} V_m = 0.9\, V_{rms}$$

1.8.4 วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า

หน้าที่ของวงจรนี้คือ ทำให้ไฟกระแสตรงมีขนาดคงที่ตลอดเวลา โดยทั่วไปนิยมใช้ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) แสดงผังวงจรในรูป 1.14



รูป 1.14 วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า ใช้ซีเนอร์ไดโอด แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคือ V_s

ลักษณะการทำงานของวงจร ถ้าแหล่งป้อนแรงดันไฟฟ้า V_s มีขนาดไม่คงที่ ย่อมมีผลให้ I_s ไม่คงที่ และเนื่องจาก $I_s = I_L + I_z$ ปริมาณ I_L และ I_z ย่อมแปรค่าได้เช่นกัน แต่จากคุณสมบัติของซีเนอร์ไดโอด แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมซีเนอร์ไดโอด V_z มีค่าคงที่ (หรือเกือบคงที่) เสมอ ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_L คงที่ นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีค่าคงที่ตลอดเวลา

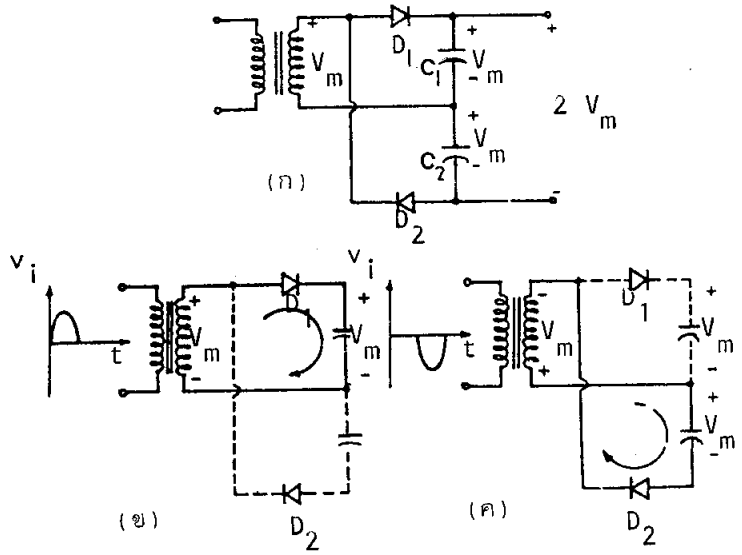
1.8.5 วงจรเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นสองเท่า (Voltage Doubler)

ในกรณีต้องการให้ไฟกระแสตรงมีศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ ทำโดยใช้ไดโอด 2 ตัว ต่อดังแสดงวงจรในรูป 1.15 (ก) และเนื่องจากในการใช้งานจริง ๆ นั้น นิยมใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ ดังนั้น เลือกอธิบายเฉพาะวงจรเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 2 เท่า แบบเต็มคลื่น ลักษณะการทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้

(1) เมื่อสัญญาณขาเข้าอยู่ในช่วงบวก ไดโอด D_1 ได้รับไบแอสตรง กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน D_1 และตัวจุ C_1 จนแรงดันตกคร่อม C_1 มีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดของสัญญาณกระแสสลับ V_m (แสดงในรูป 1.15 (ข))

(2) เมื่อสัญญาณขาเข้าอยู่ในช่วงลบ ไดโอด D_2 ได้รับไบแอสตรง (ส่วนไดโอด D_1 ได้รับไบแอสกลับ) กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน D_2 ผ่านตัวจุ C_2 จนแรงดันตกคร่อม C_2 เท่ากับ V_m (รูป 1.15 (ค)) แรงดันตกคร่อม $C_1 + C_2$ จึงมีค่าเป็น $2V_m$ แต่ถ้าต่อตัวต้านทานโหลด ตัวจุทั้งสองจะคายประจุให้แก่โหลด ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวจุทั้งสองรวมกัน มีค่าต่ำกว่า $2V_m$

ในทางปฏิบัติ ใช้โหลดที่มีความต้านทานสูง และเลือกตัวจุทั้งสองให้มีค่าความจุ (capacitance) มาก ๆ เพื่อให้สัญญาณขาออกมีค่าใกล้เคียง $2V_m$ มากที่สุด



รูป 1.15 (ก) วงจรเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น 2 เท่า ใช้ไดโอด 2 ตัว คือ D_1 และ D_2 (ข) ลักษณะการทำงานของวงจรเมื่อ D_1 ได้รับไบแอสตรง (ค) ลักษณะการทำงานของวงจรเมื่อ D_2 ได้รับไบแอสตรง

1.9 ไดโอดชนิดต่าง ๆ

ในยุคแรกเริ่มของอิเล็กทรอนิกส์ ไดโอดหลอดสูญญากาศได้ถูกประดิษฐ์ขึ้น แต่ในปัจจุบันไดโอดถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการต่างกันไปมากมาย จึงมีการกำหนดเรียกชื่อตามลักษณะที่ถูกสร้างขึ้นมา หรืออาจเรียกตามคุณสมบัติของไดโอด เช่น ซีเนอร์ไดโอด ธันเนลไดโอด (tunnel diode) แวแรคเตอร์ไดโอด (varactor diode) เป็นต้น

1.9.1 ไดโอดหลอดสูญญากาศ

ทฤษฎีพื้นฐานของไดโอดหลอดสูญญากาศคือ สำหรับโลหะใด ๆ เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นโดยวิธีต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น หรือได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็กจากภายนอก เป็นต้น อิเล็กตรอนจะกระโดดไปสู่ระดับพลังงานที่สูงจากเดิม และถ้าได้รับพลังงานมากเพียงพอ อิเล็กตรอนอาจหลุดออกนอกผิวโลหะได้ การหลุดดังกล่าวต้องใช้พลังงานต่าง ๆ กัน สำหรับโลหะต่างชนิดกัน ดังนั้น กำหนดค่าพลังงานปริมาณหนึ่งซึ่งพอดีทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะ เรียกชื่อเป็น "เวิร์คฟังก์ชัน" (work function) ซึ่งถือค่า ณ อุณหภูมิ 0°K ถ้าโลหะใดมีค่าเวิร์คฟังค์ชันต่ำ แสดงว่าอิเล็กตรอนหลุดออกได้ง่ายกว่าโลหะที่มีค่าเวิร์คฟังค์ชันสูงกว่า

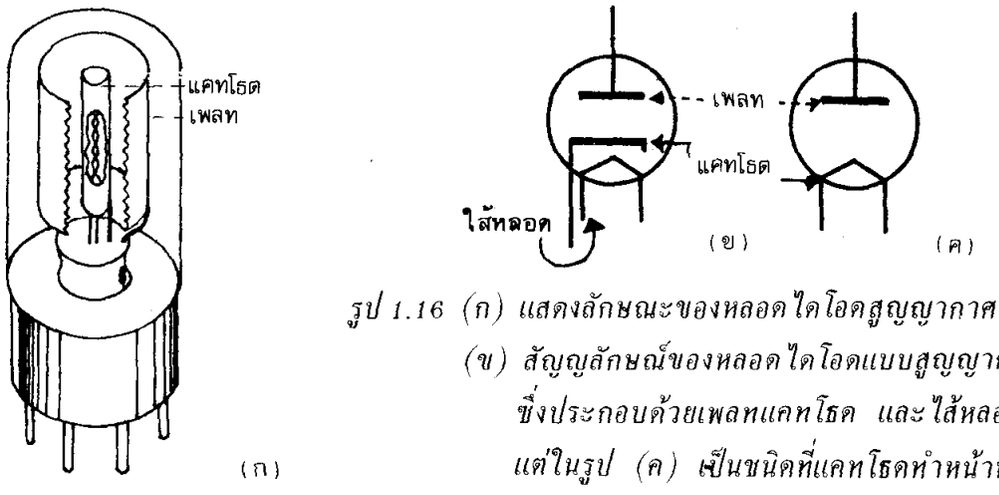
โดยทั่วไป พาหะประจุในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คืออิเล็กตรอนหลอดสูญญากาศ เป็นอุปกรณ์ที่มีสนามไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมปริมาณพาหะประจุที่ผ่านบริเวณสูญญากาศ บางหลอดอาจใช้โมเลกุลของแกสที่แตกตัวออกนั้นเป็นพาหะประจุ อย่างไรก็ตาม ในหนังสือเล่มนี้จะใช้เพียงอิเล็กตรอนเป็นพาหะประจุเท่านั้น และการเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ทำโดยเพิ่มอุณหภูมิให้กับโลหะ นั่นคือ หลอดสูญญากาศจะทำงานได้ จำต้องอาศัยความร้อนซึ่งป้อนจากภายนอก และโครงสร้างพื้นฐานของทุกหลอดสูญญากาศคือ

(1) เส้นลวดความต้านทาน เรียกชื่อเป็น ตัวก่อความร้อน (heater) หรือไส้หลอด (filament)

(2) ธาตุซึ่งทำหน้าที่เปล่งอิเล็กตรอน เรียกเป็น แคทโธด (cathode) ซึ่งจะถูกเคลือบด้วยออกไซด์ (oxides) เพื่อให้เปล่งอิเล็กตรอนได้จนถึง 1000°C เป็นอุณหภูมิสูงสุดสำหรับการได้รับความร้อนแบบทางอ้อม

พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากความร้อนที่เราให้แก่โลหะนั้น ส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในการกระโดดออกมานอกผิวโลหะ อีกส่วนหนึ่งจะกลายเป็นพลังงานของอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ต่อไปได้ และถ้าเราทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมานั้นเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันได้ ก็จะสามารถคำนวณปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ได้

ลักษณะของไดโอดหลอดสูญญากาศเป็นหลอดแก้ว ดังแสดงในรูป 1.16 ภายในหลอดแก้วเป็นสูญญากาศ มีสองขั้วไฟฟ้า คือ **แคทโธด** และ **แอนโนด** (anode) หรือบางทีเรียกว่าเพลท (plate) (ดูรูป 1.16) ใกล้กับแคทโธดมีเส้นลวดความต้านทานเรียกว่าไส้หลอด (filament) เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ไส้หลอด จะเกิดกระแสผ่านไส้หลอด ซึ่งก่อให้เกิดความร้อน และความร้อนนี้จะถูกส่งไปยังแคทโธด ผลคือเกิดมีอิเล็กตรอนหลุดออกจากแคทโธด ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่เพลท (หรือแอนโนด) เป็นศูนย์ (คือยังไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่เพลท) อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคทโธดจะมีการเคลื่อนที่ 2 ทางคือ



รูป 1.16 (ก) แสดงลักษณะของหลอดไดโอดสูญญากาศ
(ข) สัญญลักษณ์ของหลอดไดโอดแบบสูญญากาศ ซึ่งประกอบด้วยเพลทแคทโธด และไส้หลอด แต่ในรูป (ค) เป็นชนิดที่แคทโธดทำหน้าที่เป็นไส้หลอดด้วย

(1) เคลื่อนที่ออกจากแคทโธด

(2) เคลื่อนที่กลับสู่แคทโธด เนื่องจากแคทโธดมีสภาพเป็นขั้วบวก เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไป

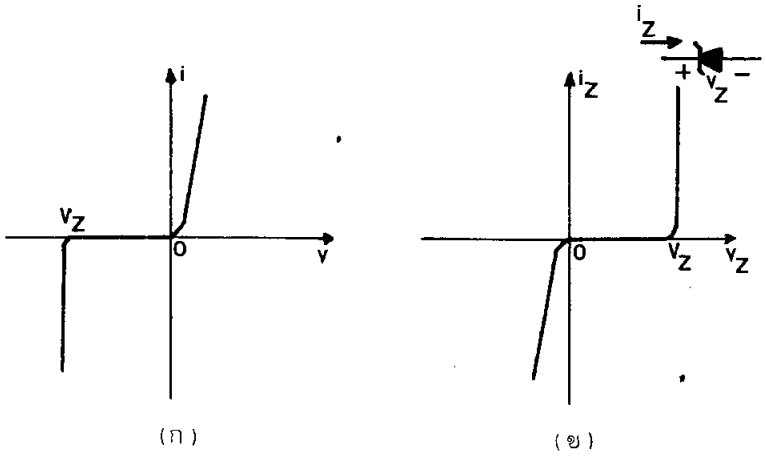
ในภาวะสมดุลย์ การเคลื่อนที่ทั้งสองแบบ จะมีปริมาณอิเล็กตรอนเท่ากัน นั่นคือ เกิดมีอิเล็กตรอนล้อมรอบแคทโธด เรียกว่ากลุ่มอิเล็กตรอนนี้ว่า **ประจุระวาง** (space charge)

ถ้ามีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้เพลท โดยทำให้เพลทเป็นบวก จะมีอิเล็กตรอนวิ่งมายังเพลท และปริมาณอิเล็กตรอนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพลทเป็นบวกมากขึ้นกล่าวคือ เกิดกระแสไหลผ่านหลอดสูญญากาศนี้ได้ ในทางตรงข้ามถ้าเพลทเป็นลบ (เมื่อเทียบกับแคทโธด) ย่อมจะผลักอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแคทโธด จึงไม่มีกระแสไหลผ่านหลอดสูญญากาศ นั่นคือ กระแสสามารถผ่านไดโอดหลอดสูญญากาศได้ทางเดียวเท่านั้น รูป 1.16 (ข) และ (ค) แสดงสัญญลักษณ์ที่ใช้ในวงจรไฟฟ้า

1.9.2 ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) มีลักษณะเช่นเดียวกับไดโอดแบบรอยต่อ pn แต่ซีเนอร์ไดโอดจะถูกโด๊ปให้มีปริมาณสารเจืออยู่หนาแน่นกว่า เพื่อสามารถใช้งานได้ในช่วงที่แรงดันไฟฟ้าป้อนกลับของไดโอดมีค่าเป็นลบมาก ๆ ซึ่งไดโอดธรรมดาอาจพังได้ ในรูป 1.6 แสดงเส้นกราฟลักษณะสมบัติของไดโอดทั่วไป V_z เป็นตำแหน่งซึ่งค่าไบแอสกลับมีผลให้เกิดการสร้างพาหะประจุอิสระขึ้นอย่างมากมายมหาศาล เปรียบเสมือนการถล่มของภูเขาหิมะ เรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณ "อะวาเลนซ์" (avalanche) หรือบริเวณซีเนอร์ ซึ่งไดโอดทั่วไปถ้าอยู่ในสภาวะดังกล่าวจะเกิดการพังเสียหายได้ ช่วงไบแอสย้อนกลับ 0 ถึง V_z ไดโอดอุดมคติจะประพฤติเป็นวงจรเปิดในรูป 1.17 (ก) ซึ่งค่าไบแอสกลับต่ำกว่าค่า 0 แต่สำหรับรูป 1.17 (ข) ซีเนอร์ไดโอดมีลักษณะสมบัติเกือบจะเป็นเงาสะท้อนของรูป (ก) ถ้าจะเขียนขั้วของซีเนอร์ไดโอดในบริเวณควอดแดรนท์ (quadrant) แรกของรูป (ข) **ซ้อนลงบนระนาบ XY ของมัน** จะแสดงดังในรูป (ข) ด้านบน

ข้อสังเกตคือ เส้นกราฟของรูป 1.17 (ก) และ (ข) กลับกัน ที่บริเวณ V_z ในรูป (ก) จะเกิดกระแสค่าเป็นลบปริมาณมาก แต่ในรูป (ข) เกิดกระแสค่าบวกในปริมาณมากเช่นเดียวกัน นั่นคือ ซีเนอร์ไดโอดถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้งานในช่วงบริเวณซีเนอร์

ค่าของ V_z กำหนดได้โดยอาศัยเทคนิคการโด๊ป ยิ่งเพิ่มสารเจือจะยิ่งลดศักย์ซีเนอร์ โดยทั่วไป ซีเนอร์ไดโอดมีค่า V_z จาก 2.4-200 โวลท์และค่ากำลังจาก 0.25-50 วัตต์ มักนิยมสร้างจากซิลิคอน การประยุกต์ใช้ซีเนอร์ไดโอดมักใช้ในวงจรปรับแรงดันไฟฟ้า (regulator) ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับวงจรขยาย



รูป 1.17 (ก) แสดงค่าแรงดันพังแบบซีเนอร์ V_z

(ข) รูปบนแสดงสัญญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอดในวงจรไฟฟ้า รูปล่างแสดงแรงดันไฟฟ้าของมันบนเส้นกราฟลักษณะสมบัติ

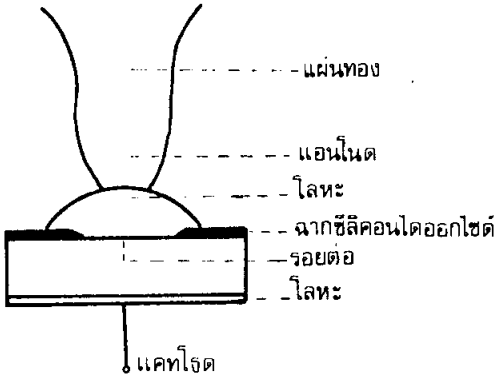
1.9.3 ไดโอดชอตกีแบริเออร์ (Schottky Barrier Diode)

ไดโอดชนิดนี้ เรียกได้หลายชื่อ ได้แก่ ไดโอดชอตกีแบริเออร์ เซอร์เฟซแบริเออร์ (surface barrier) หรือ ฮอตแคริเออร์ (hotcarrier) ใช้ในย่านสัญญาณมีช่วงความถี่สูงมาก (Very High Frequency) เนื่องจากมีความไวในการตอบสนองดีมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความถี่สูงและมีการรบกวนต่ำ ปัจจุบันใช้เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณ ac เป็น dc ซึ่งสัญญาณ ac นั้นมีแรงดันไฟฟ้าต่ำ แต่ค่ากระแสสูง นอกจากนี้ ได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เรดาร์ สำหรับคอมพิวเตอร์ (computers) ใช้ "ชอตกี ทีทีแอล ลอจิค" (Schottky TTL logic) เป็นส่วนของอุปกรณ์ในการสื่อสารโทรคมนาคม โดยทำหน้าที่ผสม และตรวจจับ (detectors) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอก (analog) เป็นดิจิตอล (digital)

การสร้างไดโอดชนิดนี้ต่างจากของรอยต่อ pn ดังได้เคยอธิบายมาแล้ว โดยที่ประกอบด้วยรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมักนิยมใช้ซิลิคอนชนิด n (ชนิด p ไม่นิยมใช้) ส่วนโลหะอาจเป็นโมลิบดีนัม (molybdenum) แพลตตินัม (platinum) โครม (chrome) หรือทังสเตน (tungsten) ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงเทคนิคการสร้าง ในรูป 1.18 แสดงส่วนต่าง ๆ ของไดโอดชอตกีแบริเออร์

ประโยชน์ใช้งานของไดโอดชอตกี เช่นเดียวกับไดโอดจุดสัมผัส (point contact diode) แต่ไดโอดชอตกีมีบริเวณรอยต่อที่ราบเรียบกว่า และทนทานกว่า พาหะประจุส่วนมากคืออิเล็กตรอน อาจมีโฮลบ้างเล็กน้อยในโลหะ แต่น้อยมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอน ทันทีที่มีการเชื่อมต่อโลหะ

เข้ากับสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่มีเป็นจำนวนมากในสารกึ่งตัวนำจะวิ่งไปยังโลหะ ก่อให้เกิดกระแสปริมาณมาก ที่มาของคำว่า "ฮอตแคริเออร์" เนื่องจากอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำมีพลังงานจลน์สูงมาก (เทียบกับของอิเล็กตรอนในโลหะ)



รูป 1.18 ไดโอดชอตกีแบริเออร์ แอนโนด (+) คือแผ่นทอง ส่วนแคทโธด (-) อยู่ด้านล่างของรูป และแสดงรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำด้วย

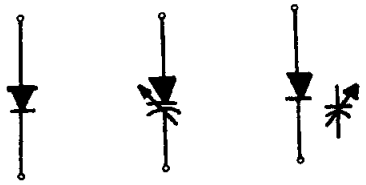
ไดโอดชอตกีมีเอกลักษณ์การไหลของกระแสมากกว่าไดโอดแบบรอยต่อ pn ทั่วไป เนื่องจากกระแสเกิดจากพาหะประจุส่วนมากเพียงอย่างเดียวนั่นเอง และย่อมมีบริเวณดีเพลทชันเช่นเดียวกัน ถ้ายิ่งเพิ่มพาหะประจุให้กับโลหะ จะยิ่งสร้างกำแพงของประจุลบในโลหะ ณ บริเวณรอยต่อของสารทั้งสอง ผลคือ เกิดกำแพงประจุที่บริเวณผิวหน้าของสารทั้งสอง จึงถูกเรียกชื่อเป็น "ไดโอดเซอร์เฟซแบริเออร์" ทำหน้าที่ป้องกันกระแสที่จะเกิดขึ้นภายหลังการก่อกำแพงอย่างสมบูรณ์แล้ว กล่าวคือ อิเล็กตรอนจากซิลิคอนจะเดินทางไปพบกับบริเวณปลอดพาหะประจุ จากนั้นจะพบกับกำแพงขั้วลบที่ผิวของโลหะ

ถ้าป้อนไบแอสตรง จะเป็นการลดความสูงของกำแพงขั้วลบ ผลคือเกิดกระแสไหลในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งแหล่งป้อนสัญญาณจะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแสดังกล่าวนี้ กำแพงขั้วลบในไดโอดชอตกี มีค่าต่ำกว่าในไดโอดรอยต่อ pn ไม่ว่าจะเป็นการป้อนไบแอสแบบตรงหรือแบบกลับ ดังนั้น ด้วยไบแอสปริมาณเดียวกัน ไดโอดชอตกีจะมีกระแสเกิดมากกว่า ผลตามมาคือ กระแสรั่วย่อมมีมากกว่าด้วย (ในช่วงไบแอสกลับ)

1.9.4 ไดโอดแวริแคป หรือแวแรคเตอร์ (Varicap or Varactor)

ไดโอดชนิดนี้มีหลายชื่อเช่นเดียวกัน ได้แก่ ไดโอดแวริแคป (varicap) -แวแรคเตอร์ (varactor) หรือ -วีวีซี (VVC ย่อมาจาก Voltage Variable Capacitance) หรือ -จูนนิง (Tuning diode) ซึ่งเป็นส่วนของสารกึ่งตัวนำที่มีแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าอิสระ แต่ความจุแปรค่าได้ การใช้งาน

ขึ้นกับค่าความจุที่รอยต่อ pn เมื่อสารได้รับไบแอสกลับ รูป 1.19 แสดงสัญญลักษณ์ของแวแรคเตอร์ โดยทั่วไปทำจากซิลิคอน มักใช้งานในช่วงความถี่สูง เช่น เอฟเอ็ม-โมดูเลเตอร์ (FM-modulator) อุปกรณ์ควบคุมความถี่โดยอัตโนมัติ (automatic-frequency-control device) ตัวกรองสัญญาณที่สามารถปรับแถบกว้าง (band) และเครื่องขยายแบบพาราเมตริค (parametic amplifier)



รูป 1.19 สัญญลักษณ์ของไดโอดแวแรคเตอร์

1.9.5 ไดโอดกำลัง (Power Diode)

เป็นไดโอดที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้กับวงจรที่มีกำลังสูง และที่อุณหภูมิสูง ที่นิยมใช้มากคือ ในขบวนการแปลงสัญญาณ ac เป็น dc มักทำด้วยซิลิคอน เนื่องจากสามารถทนค่ากระแส และอุณหภูมิสูง ค่า PIV (peak inverse voltage) มีช่วงกว้าง (เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าจากการไบแอสกลับสูงสุดที่ไดโอดสามารถทนได้) ไดโอดกำลังจะต้องมีความต้านทานน้อยต่อการไบแอสตรงเนื่องจากค่ากำลังงานสูญเสีย (dissipation power) คือ I^2R ถ้า R มีค่าสูงมาก ๆ ย่อมเกิดกำลังสูญเสียมาก ถ้าต้องการให้ไดโอดรับกระแสได้มากขึ้น มักต่อไดโอดตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปแบบขนาน แต่ถ้าต้องการได้ค่า PIV มีช่วงกว้าง ๆ ต้องทำโดยต่อไดโอดหลาย ๆ ตัวแบบอนุกรม

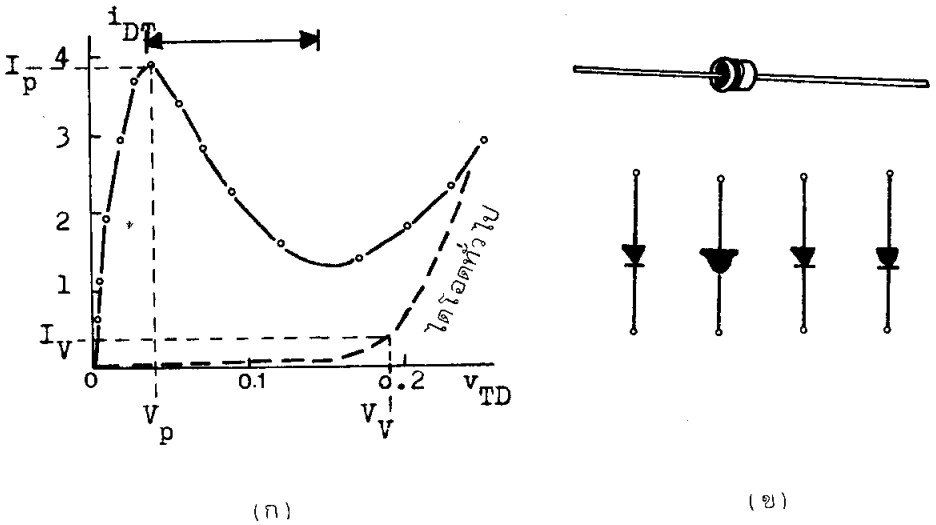
1.9.6 ไดโอดธันเนล (Tunnel Diode)

เป็นไดโอดสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อ pn เช่นกัน แต่มีระดับการโด๊ปสูงกว่าไดโอดธรรมดาถึง 10^2 - 10^3 เท่า ผลคือ ทำให้บริเวณดีเพลทชันลดความกว้างลงอย่างมาก (มีขนาดประมาณ 10^{-6} ซม.) แคบกว่าของไดโอดทั่วไปประมาณ 100 เท่า ถ้าเปรียบบริเวณดีเพลทชันที่รอยต่อ pn เหมือนกับท่อขนาดใหญ่แต่สั้น พาหะประจุจำนวนมากจึงพร้อมจะลอดผ่านท่อไป แทนที่จะล้อมหรือระเกะระกะอยู่บริเวณรอบ ๆ นี่คือที่มาของชื่อธันเนลไดโอด

เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไดโอดธรรมดากับไดโอดธันเนลในรูป 1.20 (ก) สิ่งที่แตกต่างคือบริเวณที่มีค่าความต้านทานเป็นลบ ซึ่งถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไดโอด จะทำให้

กระแสไดโอดลดลง ยอดของเส้นกราฟ (V_p) มีค่าประมาณ 0.05 โวลท์ แสดงว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการไบแอสตรงมีค่าน้อยกว่าไดโอดธรรมดาอื่น ๆ และที่ค่าแรงดันไฟฟ้านี้เองซึ่งเกิดการไหลของพาหะประจุลอดผ่านอุโมงค์หรือท่อขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็วเกินกว่าของไดโอดทั่วไป ดังนั้นนิยมใช้ธันเนลไดโอดในงานที่ต้องการความเร็วสูง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ ซึ่งมีช่วงเวลาปิดเปิด (switcning times) อยู่ในช่วง 10^{-9} - 10^{-12} วินาที

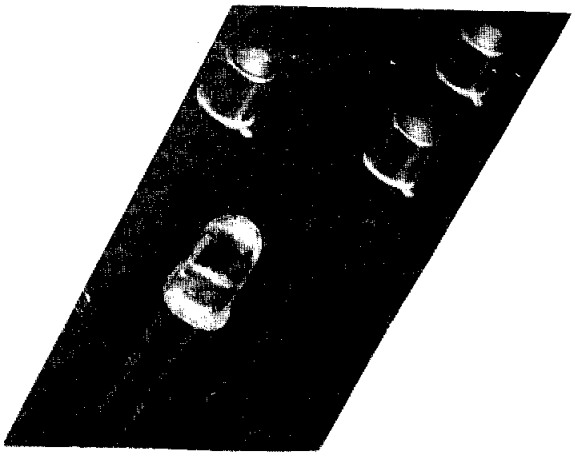
โดยทั่วไปทำจากเจอร์มาเนียมและแกลเลียมอาร์เซไนด์ (gallium arsenide) ตัวอย่างและสัญญลักษณ์ของไดโอดธันเนลแสดงในรูป 1.20 (ข)



รูป 1.20 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของธันเนลไดโอด ช่วงความต้านทาน = −R อยู่ระหว่างค่ายอดและช่วงลดค่าของกระแส
(ข) สัญญลักษณ์ของธันเนลไดโอด

1.9.7 โฟโตไดโอด (Photodiode)

เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อ pn ที่ไวต่อแสง การใช้งานขึ้นกับบริเวณไบแอสกลับ รูป 1.21 แสดงลักษณะของโฟโตไดโอด เมื่อรอยต่อของอุปกรณ์ชนิดนี้ได้รับแสงย่อมมีการส่งผ่านพลังงานจากคลื่นแสงที่ตกกระทบ สู่อะตอมของสารกึ่งตัวนำ ผลคือเกิดพาหะประจุส่วนน้อยขึ้นเพิ่มมากกว่าเดิม และย่อมเกิดกระแสย้อนกลับเพิ่มขึ้นจากการทดลองพบว่าถ้าเพิ่มความเข้มของแสงให้กับโฟโตไดโอด ย่อมเกิดกระแสย้อนกลับเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับขั้นพื้นฐานทั่ว ๆ ไป อาจสรุปได้ว่า ถ้าไม่มีแสงตกกระทบโฟโตไดโอด ถือว่ากระแสย้อนกลับมีค่าเป็นศูนย์ พารามิเตอร์ที่แสดงสถานะของไดโอดมีค่าน้อย ๆ (ในช่วง 10^{-9} วินาที) มักใช้ประโยชน์ในการนับปริมาณเร็ว ๆ หรือเป็นอุปกรณ์ปิดเปิด (switching)



รูป 1.21 โฟโต ไดโอดที่ใช้งาน

ความเข้มของแสง วัดในปริมาณฟลักซ์ส่องสว่าง (luminous flux) ที่ตกลงบนพื้นที่ผิว ซึ่งวัดเป็นหน่วยลูเมนส์ (lumen) หรือวัตต์ (watt) หน่วยทั้งสองมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$1\ \text{lm} = 1.496 \times 10^{-3} \quad \text{W}$$

โดยทั่วไป วัดความเข้มของแสงเป็น lm/ft^2 เรียกเป็นฟุต-แคนเดิล (foot-candle) เขียนย่อเป็น fc หรือ W/m^2 ซึ่ง

$$1\ \text{lm/ft}^2 = 1\ \text{fc} = 1.609 \times 10^{-12} \quad \text{W/m}^2$$

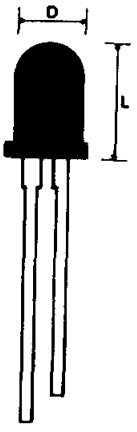
ภายในตัวอุปกรณ์ได้มีการติดเลนส์ที่บริเวณหัวของโฟโตไดโอด เพื่อช่วยเพิ่มความเข้มของแสง ถ้าเป็นแสงที่มีความยาวอยู่ในช่วงคลื่นของแสงใต้แดง (infrared) หรือเลเซอร์ มักนิยมใช้เจอร์มาเนียม

1.9.8 ไดโอดเปล่งแสง (Light-emitting Diode)

บางครั้งเรียกย่อตามชื่อภาษาอังกฤษเป็น LED ซึ่งที่มาของชื่อนี้ได้จากคุณสมบัติของไดโอดในการเปล่งแสงช่วงมองเห็นด้วยตาเปล่า (visible light) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นโดยทั่วไป เมื่อรอยต่อ pn ได้รับไบแอสตรง ย่อมเกิดการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล มักเกิดบริเวณใกล้แนวตะเข็บอิเล็กตรอนอิสระที่ไปรวมตัวใหม่กับโฮล จะปล่อยพลังงานออกไปในรูปของความร้อนหรือโฟตอน (คือแสง) ก็ได้ รอยต่อ pn ของสารกึ่งตัวนำย่อมปล่อยพลังงานนี้ออกไป แต่ซิลิคอนและเจอร์มาเนียมมักส่งออกในรูปของความร้อนมากกว่าในสารชนิดอื่น เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ (gallium arsenide phosphide) ซึ่งเขียนย่อเป็น GaAsP หรือแกลเลียมฟอสไฟด์ (gallium phosphide) เขียนย่อเป็น GaP จะเปล่งโฟตอนที่มี

พลังงานสูงพอจะเป็นต้นกำเนิดของแสงช่วงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เรียกขบวนการที่ก่อให้เกิดการเปล่งแสงโดยป้อนจากต้นกำเนิดกระแสไฟฟ้าว่า อีเลคโตรลูมิเนสเซนซ์ (electro-liminescence)

LED ในท้องตลาดมีหลายลักษณะ หลายขนาด การใช้งานโดยทั่วไปคือ แสดงตัวเลขในเครื่องคิดเลข LED ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.7 - 3.3 โวลท์ จึงง่ายต่อการใช้ร่วมในวงจรไฟฟ้า และต้องการกำลัง 10 - 150 mW อายุการใช้งานมากกว่า 100,000 ชั่วโมง รูป 1.22 แสดงลักษณะทั่วไป



1.22 ไดโอดเปล่งแสง

1.10 บทสรุป

สารกึ่งตัวนำจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ณ อุณหภูมิต่ำ (0°K) แต่เป็นตัวนำไฟฟ้า ณ อุณหภูมิสูงขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนหรือโฮลอิสระ ขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ และอุณหภูมิ ถ้าเจอร์มาเนียมและซิลิคอนมีปริมาตรเท่ากัน ณ อุณหภูมิเดียวกัน เจอร์มาเนียมมีประจุอิสระมากกว่า

พาหะประจุภายในสารกึ่งตัวนำมี 2 ชนิดคือ โฮล และอิเล็กตรอน การจะมีพาหะชนิดใดมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับการโด๊ปสารกึ่งตัวนำ ถ้ามีโฮลเป็นพาหะประจุส่วนมาก (คือมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะประจุส่วนน้อย) เรียกเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และในทางตรงข้าม สารกึ่งตัวนำชนิด n จะมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะประจุส่วนมาก (หรือกล่าวว่า มีโฮลเป็นพาหะประจุส่วนน้อย)

การเคลื่อนที่ของพาหะประจุภายในสารกึ่งตัวนำมี 2 ลักษณะ คือ

(1) แบบแพร่กระจาย (diffusion)

(2) แบบพัดพาไป (drift)

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อกัน ย่อมเกิดการถ่ายเทพาหะประจุ เพื่อให้เกิดความสมดุลย์ อุปกรณ์ที่เป็นรอยต่อ pn เรียกว่า ไดโอดสารกึ่งตัวนำ หรือไดโอดแบบรอยต่อ pn

บริเวณดีเพลทชัน (depletion) เกิดใกล้ตะเข็บ pn ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นทำนบหรือกำแพงแรงดันไฟฟ้า ทำหน้าที่รักษาสภาพสมดุลย์ทางพลวัต (หรือทางไดนามิคส์) ของสารกึ่งตัวนำ p และ n ดังนี้

(1) พาหะประจุส่วนมากจะถูกกันโดยทำนบแรงดันไฟฟ้าดังกล่าว แต่จะมีบางตัวที่ได้รับพลังงานสูงกว่าทำนบ จึงสามารถข้ามไปสู่สารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้ามได้ และจะกลายเป็นพาหะประจุส่วนน้อย ปะปนอยู่ในสารนี้

(2) พาหะประจุส่วนน้อยจะเกิดการแพร่ แลกเปลี่ยนภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด ซึ่งมีลักษณะชดเชยปริมาณพาหะประจุให้เกิดสมดุลย์ภายในสารกึ่งตัวนำนั่นเอง

การป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับไดโอดแบบรอยต่อ pn เรียกว่า การไบแอส ซึ่งทำได้ 2 แบบคือ ไบแอสตรง และไบแอสกลับ กระแสย้อนกลับอิ่มตัวขึ้นอยู่กับปริมาณพาหะประจุส่วนน้อย หรือกล่าวได้ว่า ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ) ไม่ขึ้นกับปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการไบแอสกลับ

เมื่อไดโอดได้รับไบแอสตรงจะมีกระแสไหลผ่านได้มาก แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวไดโอดมีปริมาณน้อย ๆ ดังนั้น จึงมีลักษณะการทำงานคล้ายกับสวิทซ์ไฟฟ้า ซึ่งเปิดวงจรเมื่อถูกไบแอสกลับ และปิดวงจรเมื่อถูกไบแอสตรง

นอกจากนี้ ไดโอดยังมีอีกหลายชนิด เรียกชื่อตามลักษณะสมบัติของมัน เช่น ธันเนลไดโอด โฟโตไดโอด และ LED เป็นต้น ทั้งนี้ ได้รับวิวัฒนาการจากไดโอดแบบหลอดสูญญากาศทั้งสิ้น

แบบฝึกหัดบทที่ 1

1.1 อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุไฟฟ้าในไดโอดแบบ 2 รอยต่อ ในกรณี
(ก) เมื่อไม่มีการไบแอส (ข) มีการไบแอสตรง

1.2 อธิบายลักษณะการทำงานของไดโอดเมื่อทำหน้าที่เป็นตัวเรียงกระแส

1.3 ไดโอดตัวหนึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเธรสโชลด์ (Threshold) 0.6 โวลท์ ขณะที่นำกระแสได้ 50 mA จะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวมัน 0.7 v
(ก) ไดโอดนี้ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอน หรือเจอร์มาเนียม?
(ข) จงแสดงขั้วของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด เมื่อมันนำกระแส 70 mA
(ค) ไดโอดถูกไบแอสตรง หรือไบแอสกลับ
(ง) จงคำนวณความต้านทานปริมาตรของไดโอด

1.4 ร่างวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ และอธิบายกลไกการทำงานของวงจรเมื่อมีการป้อนสัญญาณกระแสสลับ

1.5 ซีเนอร์ไดโอดต่างจากไดโอดแบบรอยต่ออย่างไร?

1.6 ธันเนลไดโอดมีคุณสมบัติแตกต่างจากไดโอดแบบรอยต่ออย่างไร?

1.7 ทำนบแรงดันไฟฟ้าในไดโอดแบบรอยต่อ pn เกิดขึ้นได้อย่างไร?
เมื่อมีการไบแอสรอยต่อดังกล่าว ลักษณะความต้านการไหลของพาหะประจุที่ทำนบแรงดันไฟฟ้าแปรไปอย่างไร?

1.8 อธิบายความหมายของคำต่อไปนี้ ตามความเข้าใจของท่านเอง
การรวมตัวใหม่ของโฮลและอีเลคตรอน
อะตอมให้
บริเวณดีเพลทชัน
กระแสย้อนกลับอิ่มตัว
แรงดันพัง
เส้นโหลด