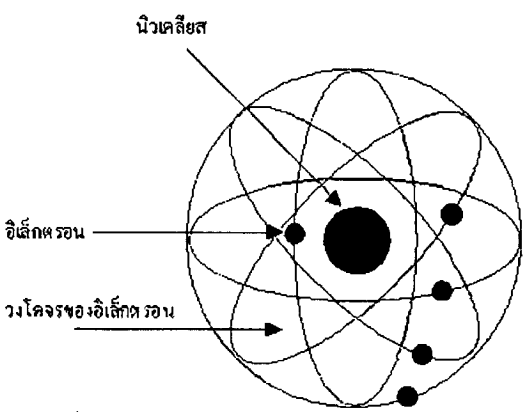
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์พึ่งพาวัสดุสารกึ่งตัวนำในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แทนการใช้อุปกรณ์ที่ใช้หลักการของหลอดสุญญากาศ ทำให้อุปกรณ์ที่ได้มีขนาดเล็กลงและมีน้ำหนักเบา ไม่ต้องใช้ความร้อนในการอุ่นไส้หลอด มีความทนทานทางกล ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของสารกึ่งตัวนำเบื้องต้นรวมถึงไดโอดซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน

1 โครงสร้างพื้นฐานของอะตอม

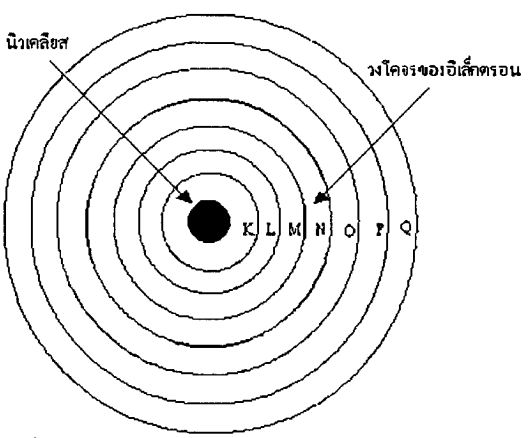
สสารต่างๆ ที่เราพบอยู่ทั่วไปนั้น ถ้าพิจารณาลงไปถึงส่วนประกอบขนาดเล็กที่ประกอบกันเป็นสสารนั้นแล้ว จะพบว่าประกอบด้วยโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลเป็นส่วนประกอบที่เล็กที่สุดของสารและยังแสดงสมบัติของธาตุนั้น อยู่ได้ ในแต่โมเลกุลจะประกอบด้วยส่วนที่เล็กลงไปอีกเรียกว่าอะตอม จากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์ทำให้ทราบว่าอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสที่อยู่ เป็นแกนกลางของอะตอม และมีอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียสนั้น ภายในนิวเคลียสยังประกอบไปด้วยอนุภาคของโปรตรอนและนิวตรอนอยู่รวมกัน อิเล็กตรอนที่โคจรอยู่รอบนิวเคลียสนั้นเป็นลบ ส่วนโปรตรอนมีประจุเป็นบวก นิวตรอนที่อยู่ในนิวเคลียสมีประจุเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติแล้วอะตอมของธาตุต่างๆ จะเป็นกลางทางไฟฟ้า ในธาตุเดียวกันอะตอมของธาตุนั้นจะมีจำนวนโปรตรอนและอิเล็กตรอนเท่ากัน



รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองโครงสร้างอะตอม

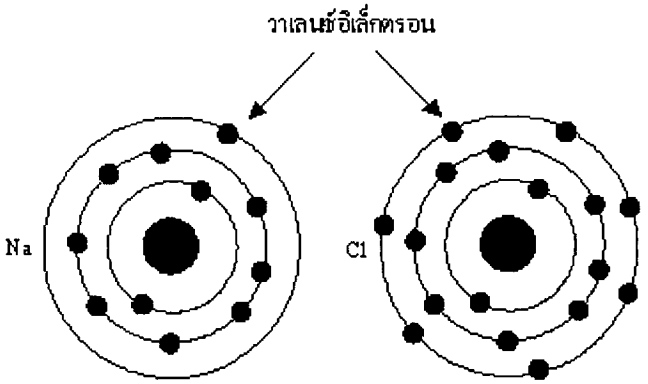
2. วงโคจรของอิเล็กตรอน

จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งรอบนิวเคลียสจะวิ่งเป็นวงๆ โดยแต่ละวงโคจรจะมีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ไม่เท่ากัน เรียงลำดับจากน้อยไปหามาก แต่ละวงจะสามารถบรรจุอิเล็กตรอนได้จำนวนเท่าใดนั้น คำนวณได้จากสูตร 2N2 โดย N คือลำดับวงโคจรที่ห่างจากนิวเคลียส วงโคจรอิเล็กตรอนที่อยู่ห่างจากนิวเคลียสจะบอกกำกับไว้เป็นตัวอักษร ซึ่งในวงในสุดที่ติดกับนิวเคลียสจะนับเป็นวงแรกคือวง K และวงที่อยู่ออกห่างไปเรื่อยๆ ก็จะเป็น L,M,N,O,P,Q ตามลำดับ แต่ละวงจะมีอิเล็กตรอนได้สูงสุดตามสูตร 2N2 ดังนั้นวง K ซึ่งเป็นวงที่ 1 จะมีอิเล็กตรอนสูงสุดเท่ากับ 2N2 = 2(1)2 = 2 ตัว,วงที่ 2 L = 8 ตัว , วงที่ 3 M = 18 ตัว ,วงที่ 4 N = 32 ตัว ,วงที่ 5 O = 50 ตัว โดยตั้งแต่วง O เป็นต้นไป จำนวนอิเล็กตรอนที่บรรจุลงไปจะไม่เต็มจำนวนตามสูตรที่ คำนวณได้



รูปที่ 2 แสดงวงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส

อะตอมของธาตุแต่ละชนิดมีจำนวนอิเล็กตรอนมากน้อยแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้การบรรจุอิเล็กตรอนลงในแต่ละวงโคจรไม่เต็มจำนวน และมีข้อจำกัดในการบรรจุอิเล็กตรอนลงวงโคจรอย่างหนึ่งคือ อิเล็กตรอนที่โคจรอยู่วงนอกสุดจะมีอิเล็กตรอนได้มากสุดไม่เกิน 8 ตัว อิเล็กตรอนวงนอกสุดจะอยู่ที่วงใดก็ได้ไม่จำเป็นจะอยู่วง Q เท่านั้น วงที่ถูกบรรจุอิเล็กตรอนเป็นวงสุดท้ายของธาตุเรียกอิเล็กตรอนวงนอกสุดนี้ว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electron) วาเลนซ์อิเล็กตรอนในธาตุแต่ละชนิดจะมีจำนวนไม่เท่ากัน



รูปที่ 3 แสดงการจัดอิเล็กตรอนของอะตอมโซเดียมและคลอรีน

จากรูปที่ 3 เป็นการจัดเรียงอิเล็กตรอนของโซเดียม (Na) ซึ่งมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 11 ตัว อิเล็กตรอนจะถูกบรรจุอยู่ชั้นที่ 1 จำนวน 2 ตัว ชั้นที่ 2 จำนวน 8 ตัว ชั้นที่ 3 จำนวน 1 ตัว ส่วนคลอรีนมีอิเล็กตรอนทั้งหมด 17 ตัว การเรียงตัวของอิเล็กตรอนเป็น 2, 8, 7 ตามลำดับวาเลนซ์อิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนวงนอกสุดจะเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสสารหรือธาตุต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ตัวนำไฟฟ้า , สารกึ่งตัวนำ และฉนวนไฟฟ้า โดยจะกำหนดจากสสารหรือธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนดังนี้

ตัวนำไฟฟ้า จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 1 - 3 ตัว
สารกึ่งตัวนำ จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 4 ตัว
ฉนวนไฟฟ้าจะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 5 - 8 ตัว

3. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้า(Conductor) และฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ซึ่งเราสามารถแบ่งแยกได้โดยใช้ค่า ความนำจำเพาะ (Resistivity; ρ) ซึ่งหาได้จากการวัดค่าความต้านทาน Rของวัสดุที่มีขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบความต้านทานจำเพาะของสารกึ่งตัวกับตัวนำและฉนวนที่ดีเยี่ยมอย่างทองแดงและไมก้าตามลำดับ

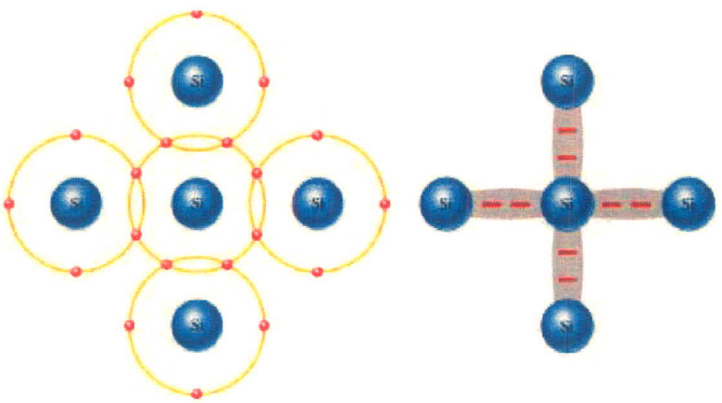
ตัวนำ	สารกึ่งตัวนำ	ฉนวน
$\rho \cong 10^{-6}\ \Omega$-cm (Cu)	$\rho \cong 50\ \Omega$-cm (Ge) $\rho \cong 50\times10^{3}\ \Omega$-cm (Si)	$\rho \cong 10^{12}\ \Omega$-cm (Mica)

สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ได้แก่ธาตุ เยอร์มันเนียม (Germanium; Ge) และซิลิกอน (Silicon; Si) การนำธาตุ Ge และ Si มาสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีเหตุผลสำคัญสองประการ

1. สามารถนำไปผ่านกระบวนการให้มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งควรมีความบริสุทธิ์ขั้นต่ำ 99.9999999 เปอร์เซ็นต์ (9N) ซึ่งปัจจุบันสามารถทำ Si ได้บริสุทธิ์ถึง 10N

2. สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยความร้อนหรือแสงสว่าง จึงเหมาะที่นำไปสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไวต่อความร้อนและแสงสว่าง

ภาพจำลองอะตอมอย่างง่ายของ Si และ Cu ซึ่งจะเห็นได้ว่าอะตอมของ Si มีอิเล็กตรอนที่วงนอกสุดหรือ วาเลนต์อิเล็กตรอนจำนวน 4 ตัว การที่อะตอมจะเสถียรได้อะตอมจะใช้อิเล็กตรอนร่วมกับอะตอม Si ที่อยู่ข้างเคียงซึ่งเรียกว่าพันธะโควาเลนต์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ภาพจำลองพันธะโควาเลนต์ของอะตอม Si หนึ่งอะตอม

3.1 สารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductors)

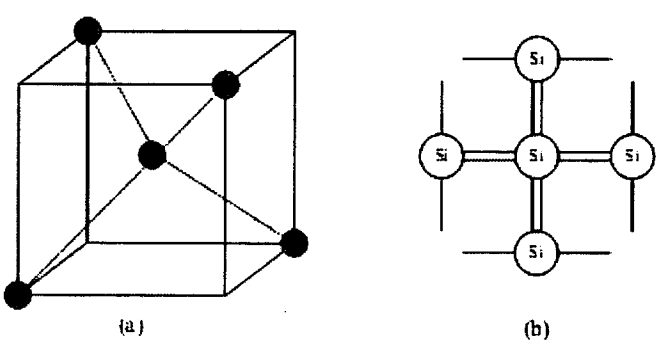
อะตอมจะประกอบไปด้วย นิวเคลียส ซึ่งภายในประกอบไปด้วยประจุบวกเรียกว่า protons มีประจุลบที่เรียกว่า electrons และประจุที่เป็นกลางเรียกว่า neutrons และในนิวเคลียสนี้ อิเล็กตรอนในแต่ละตัวก็จะมีพลังงานที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกระจายอยู่ในรูปของ shell ที่มีวงโคจรที่ต่างกันเป็นชั้นๆ แบบวงแหวน โดยพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามรัศมีของเชลล์ โดยอิเล็กตรอนที่อยู่วงจรนอกสุดเรียกว่า valance electron ธาตุทางเคมีที่อยู่ในตารางธาตุก็มีการแบ่งกลุ่มตามค่า valance electron ดังตารางที่ 2 แสดงตำแหน่งของธาตุที่จะสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำได้ พบว่าธาตุ Silicon และ Germanium อยู่ในหมู่ IV เรียกว่า elemental semiconductor และธาตุ gallium กับ arsenide ก็อยู่ในกลุ่ม III-V compound emiconductor

ตารางที่ 2 แสดงตำแหน่งในตารางธาตุ

III	IV	V
B	C	
Al	Si	P
Ga	Ge	AS

ในรูปที่ 5 แสดงถึงโครงสร้างของอะตอม 5 ตัวที่หยุดนิ่ง โดยมี valance electron 4 ตัว กระจายอยู่รอบๆ ซึ่งโครงสร้างแบบนี้เราเรียกว่า tetrahedal ซึ่งรูปที่ 5(a) โดยที่ซิลิกอนแต่ละอะตอมจะมีอะตอมซิลิกอนข้างเคียงล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม โดย valance electron ก็จะถูกใช้ร่วมกันระหว่างแต่ละอะตอม ซึ่งเราเรียกว่า covalent bond ส่วนในรูปที่ 5(b) เป็นโครงสร้างของอะตอมซิลิกอนในแบบ 2 มิติ (เรียกว่า lattice) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของโครงสร้างแบบนี้ก็คือ วาเลนซ์อิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณขอบนอกสุดของอะตอมสามารถที่จะต่อจับยึดกับอะตอมซิลิกอนอื่นๆ ได้อีก ทำให้ได้ผลึกซิลิกอนแบบผลึกรูปเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

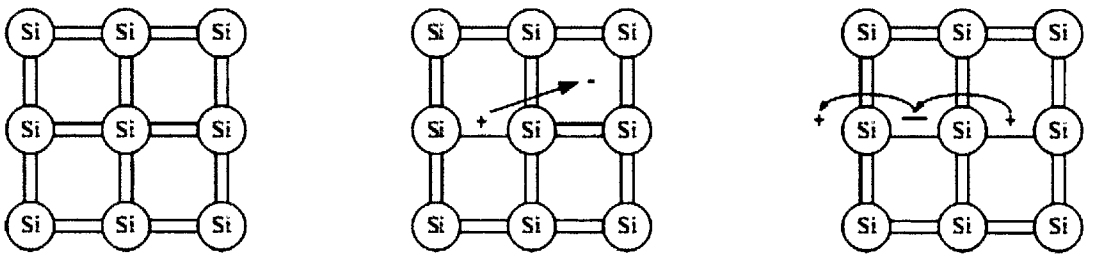
จากรูปที่ 5(a) ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิที่อะตอม , T = 0° K ก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่เกาะอยู่ในแต่ละพันธะมีค่าพลังงานที่ต่ำที่สุด ถ้ามีพลังงานสนามไฟฟ้าภายนอกถูกปล่อยเข้าไปในผลึกเหล่านี้ อิเล็กตรอนก็จะไม่เคลื่อนที่ ดังนั้นในสภาวะ ผลึกซิลิกอนจึงมีลักษณะเป็นฉนวน (insulator) จึงไม่มีกระแสไหลผ่านได้เลย



รูปที่ 5 (a) แสดงโครงสร้างของอะตอมซิลิกอนที่เป็นแบบ tetrahedral (b) แสดงแบบสองมิติที่เป็น covalent bonding

เมื่ออุณหภูมิในผลึกสูงขึ้น วาเลนซ์อิเล็กตรอนก็จะเริ่มมีพลังงานความร้อนสะสม ทำให้อิเล็กตรอนขยายพลังงานนี้ไปสลายพันธะโควาเลนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากพันธะได้ ทำให้ตำแหน่งเดิมของอิเล็กตรอนมีสภาพเป็นประจุบวก ดังรูปที่ 6(b) บางทีก็เรียกว่า empty state และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอีก ก็จะทำให้พันธะโควาเลนซ์ถูกสลายออกมามากขึ้น ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากยิ่งขึ้นเพื่อที่จะสลายพันธะโควาเลนซ์ วาเลนซ์อิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานอย่างน้อยที่สุดจำนวนหนึ่ง ที่เรียกว่า Bandgap Energy, Eg . สำหรับสสารทั่วไปค่า Eg นี้จะมีค่

าประมาณ 3-6 eV. ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน (insulator) เพราะว่าที่อุณหภูมิห้อง สสารเหล่านี้จะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ อยู่ในสสารเลย ในขณะที่สสารบางอย่างเช่นโลหะกลับมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่จำนวนมากที่อุณหภูมิห้อง จึงจัดสารเหล่านี้เป็นตัวนำ (conductor)



รปที่ 6 (a) แสดงโครงสร้างของผลึกซิลิกอน 2 มิติที่อุณหภูมิ = 0K, (b) แสดงถึงการสลายของพันธะโควาเลนต์ที่อุณหภูมิมากกว่า 0 Kม(c) แสดงถึงการเคลื่อนที่ของประจุบวกหรือ โฮล ในผลึกซิลิกอน

สำหรับสารกึ่งตัวนำจะมีค่า Eg อยู่ประมาณ 1 eV. ซึ่งอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำนี้เอง ที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า เมื่อดูจากรูปที่ 2.6 (c) พบว่าอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากพลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา โดยอิเล็กตรอนอิสระนี้ถ้าเคลื่อนที่ออกมาจากตำแหน่งใด ก็จะทำให้ตำแหน่งนั้นมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นประจุบวกซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) โดยทั้งอิเล็กตรอนและโฮลก็สามารถทำให้เกิดกระแสได้เหมือนกัน เพราะทั้งโฮลและอิเล็กตรอนต่างก็เคลื่อนที่ได้เหมือนกัน ในทางฟิสิกส์ ค่าความเข้มข้นหรือค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล (หน่วยเป็น อนุภาคต่อ cm^3) คือตัวแปรสำคัญที่จะบอกถึงคุณภาพของสารกึ่งตัวนำได้ โดยในสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์ ค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลจะเท่ากันเสมอ

ถ้ากำหนดให้ n_i คือ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนหรือโฮลในสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์ จะหาค่า ได้จากสมการ

$$n_i = BT^{(3/2)}e^{(-\frac{E_g}{2kT})}$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ของสารกึ่งตัวนำใดๆ

E_g คือ bandgap energy (eV.)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

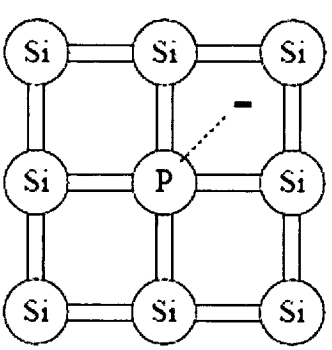
k คือ Boltzmanm s constant = 86 ×10-6 eV/K

ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ของสารกึ่งตัวนำ

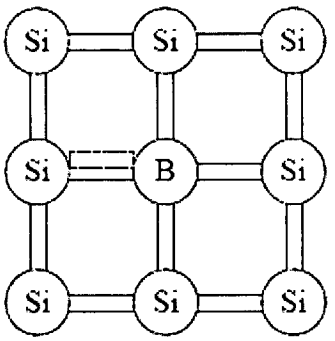
Material	Eg (eV.)	B(cm-3°K-3/2)
Silicon (Si)	1.1	5.23×10^{15}
Gallium aesenide (GaAs)	1.4	2.10×10^{14}
Germanium (Ge)	0.66	1.66×10^{15}

3.2 สารกึ่งตัวนำแบบเอกทรินสิก (Extrinsic semiconductors)

สารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์ ค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮล มีค่าค่อนข้างน้อย จึงทำให้เกิดกระแสน้อยมาก ถ้าต้องการเพิ่มความเข้มข้นนี้ให้มีค่ามากขึ้น ก็ต้องเติมสารเจือบางอย่างลงไป สารเจือปนนี้จะกลายเป็นส่วนหนึ่งของผลึกซิลิกอน แต่สารเจือปนนี้จะต้องเป็นธาตุที่มีค่าวาเลนซ์อิเล็กตรอนไม่เท่ากับซิลิกอน ซึ่งก็คือธาตุในหมู่ 3 และ 5 นั่นเอง ในธาตุหมู่ 5 ที่นิยมนำมาทำ เป็นสารเจือได้แก่ phosphoros , P และ arsenic ในรูปที่ 7 แสดงถึงการนำธาตุฟอสฟอรัสมาแทนซิลิกอน ดังรูป 7 โดยวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัวของฟอสฟอรัสก็จะจับตัวกับอะตอมของซิลิกอนกลายเป็นพันธะ แต่อิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของฟอสฟอรัส ก็จะกลายเป็นส่วนเกิน ซึ่งอิเล็กตรอนตัวนี้ก็จะเคลื่อนที่ไปตามโครงสร้างผลึก ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ไหลในผลึกซิลิกอนโดยไม่ต้องใช้พลังงานความร้อนมาสลายพันธะของซิลิกอนอีกอะตอมของฟอสฟอรัส เราเรียกว่า donor impurity (สารเจือผู้ให้) เนื่องจากเป็นอะตอมที่ให้อิเล็กตรอนอิสระกับผลึก และเรานิยมเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยธาตุหมู่ 5 นี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)



รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างของผลึกซิลิกอนที่ถูกโดปด้วยอะตอมฟอสฟอรัส



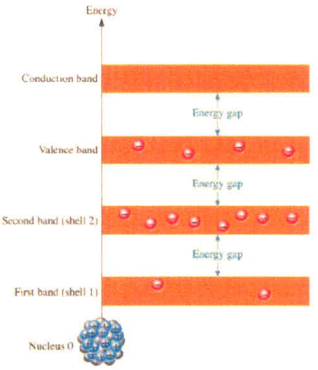
รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างของผลึกซิลิกอนที่ถูกโดปด้วยอะตอมโบรอน

สำหรับธาตุในหมู่ 3 ที่นิยมนำมาทำเป็นสารเจือ ได้แก่ boron ถ้านำธาตุนี้ไป ผสมกับธาตุซิลิกอนก็จะทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอน ทั้ง 3 ตัวของโบรอนจับยึดกับอะตอมของซิลิกอน ทำให้เกิดพันธะโควาเลนซ์ 3 ใน 4 ของอะตอมซิลิกอน ทำให้อะตอมของซิลิกอน ขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว บริเวณที่ขาดอิเล็กตรอนนั้นเรียกว่า hole (โฮล) ซึ่งโฮลนี้ก็จะดึงอิเล็กตรอนจากพันธะข้างเคียงมา ทำให้เกิดโฮลที่จุดอื่นๆแทน และโฮลก็จะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ เพราะเกิดการดึงอิเล็กตรอนต่อกันไปเรื่อยๆ ซึ่งก็ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านผลึกซิลิกอนได้เช่นกัน อะตอมของโบรอน เราเรียกว่า acceptor impurity (สารเจือผู้รับ) เนื่องจากเป็นอะตอมที่ต้องรับอิเล็กตรอนจากผลึกซิลิกอน และเราเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยธาตุหมู่ 3 นี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) สสารใดๆ ที่มีการเติมสารเจือ (n หรือ p) เราจะเรียกว่า extrinsic semiconductor หรือ doped semiconductor การ doping (การโดป) ซึ่งเป็นการควบคุมความเข้มข้นของอิเล็กตรอนอิสระและโฮล

4. ระดับพลังงาน (Energy Levels)

อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสของอะตอมจะแบ่งเป็นชั้นๆ โดยในแต่ละชั้นจะมีระดับพลังงานแตกต่างกัน โดยอิเล็กตรอนที่มีวงจรโคจรที่ห่างจากนิวเคลียสเท่าใด ก็ยิ่งมีระดับพลังงานสูงขึ้น รูปที่ 2 เป็นภาพจำลองแถบพลังงานของอิเล็กตรอนรอบๆนิวเคลียสของอะตอม ความแตกต่างของระดับพลังที่ทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนหลุดจากวงโคจร ซึ่งเรียกว่าแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) ที่ใช้ในการยึดเกาะติดกันระหว่างอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งเรียกว่า พลังงานนำกระแส (Conduction Energy) นี้เราเรียกว่า พลังงานช่องว่าง (Energy Gap; E_g) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) เมื่อวาเลนต์อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากความร้อนหรือแสงสว่างจะมีระดับพลังงานสูงกว่า E_g ก็จะเข้าสู่ระดับพลังงานนำกระแส

สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะมี E_g มากกว่า 5 eV ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำจะมีแถบพลังงานนำกระแสซ้อนทับกับแถบพลังงานวาเลนซ์



รูปที่.9 แถบพลังงานนำกระแสซ้อนทับกับแถบพลังงานวาเลนซ์

5. อินทรีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Organic Electronics)

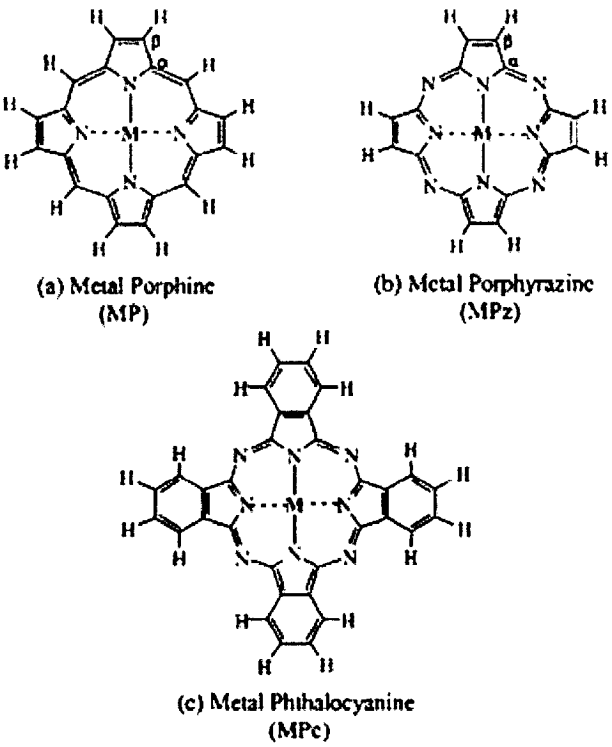
ทางเลือกใหม่ ที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก จากอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ ด้วยความที่มันมีข้อได้เปรียบ เหนือสารกึ่งตัวนำแบบเดิมหลายประการ ได้แก่ กระบวนการเตรียมอุปกรณ์สามารถทำได้หลากหลายวิธี ทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง ซึ่งสามารถกระทำได้ โดยไม่ต้องใช้โครงสร้างพื้นฐานที่มีราคาแพงนัก อีกทั้งยังสามารถประกอบอุปกรณ์ บนวัสดุแบบแผ่นบางหรือพับได้ เป็นต้น เนื่องจากวัสดุอินทรีย์ที่เป็นพื้นฐานของอุปกรณ์กึ่งตัวนำนั้น ทำมาจากโมเลกุล คุณสมบัติของมัน จึงสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการทำวิศวกรรมที่โมเลกุลโดยตรง เช่น เพิ่มกิ่งก้านสาขาที่โครงสร้างหลักเพื่อให้มีคุณสมบัติทางแสง หรือ การนำไฟฟ้าได้ตามต้องการ ซึ่งอาจเรียกว่าเป็นการทำการโด้ปภายใน (Internal Doping) แตกต่างจากสารกึ่งตัวนำแบบเดิมที่อาศัย External Doping เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติของอุปกรณ์

อินทรีย์อิเล็กทรอนิกส์ มีพื้นฐานบนโมเลกุลสารอินทรีย์ ซึ่งอาจเป็นโมเลกุลเล็กหรือ อาจเป็นสายโซ่ยาวที่เป็นโพลิเมอร์ก็ได้ โมเลกุลเหล่านั้น ต่างต้องมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ อันเกิดจากพันธะคอนจูเกต (Conjugated Bonds) ซึ่งอนุญาตให้อิเล็กตรอน มีการเคลื่อนที่ได้ ไกลขึ้นกว่าปกติ จึงทำให้มีแถบการนำไฟฟ้า เช่นเดียวกับโลหะหรือสารกึ่งตัวนำทั้งหลาย เราสามารถ ปรับแต่งคุณสมบัติเชิงแสง หรือไฟฟ้าของโมเลกุลของสารอินทรีย์ประเภทนี้ได้โดยการแปรค่ากิ่งก้าน ที่มาต่อกับโครงสร้างหลักของโมเลกุล งานประยุกต์ของอินทรีย์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันนั้น พุ่งความสนใจไปที่ วงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบอินทรีย์ อุปกรณ์อินทรีย์เปล่งแสง เซลล์สุริยะอินทรีย์ และ เซ็นเซอร์อินทรีย์

การใช้งานวัสดุอินทรีย์เพื่อเป็นอุปกรณ์ทั้ง 4 แบบดังกล่าวข้างต้น ก็หนีไม่พ้นการทำให้เป็นแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งอาจทำได้ โดยการเคลือบปั่น (Spin Coating) การระเหยไอในสุญญากาศ (Vacuum Deposition) การประกอบโมเลกุลที่พื้นผิวของน้ำ (Langmuir-Blodgett Self Assembly) เป็นต้น

ซึ่งสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้ก็จะแตกต่างกันไป โครงสร้างการจัดเรียงตัวก็ไม่เหมือนกัน แล้วมีผลสืบเนื่อง ทำให้สมบัติที่จะนำไปใช้งานนั้น มีความแตกต่างไปด้วย นอกจากนั้นแม้แต่ในกรณีที่ใช้เทคนิคเดียวกัน แต่ค่าพารามิเตอร์ในการประกอบฟิล์ม มีความแตกต่างกัน ก็มีผล ทำให้สมบัติของฟิล์มแตกต่างกันด้วย ในการวิเคราะห์พื้นผิวซึ่งปกติจะใช้วิธีทางไมโครสโคปี เช่น SEM หรือ AFM นั้น จะทราบได้ แต่เพียงภูมิลักษณะของพื้นผิว รูปร่างของเกรนหรืออนุภาคที่เกิด แต่ไม่สามารถทราบถึงโครงสร้างจุลภาคในระดับโมเลกุลได้ ดังนั้น จึงต้องมีการนำเทคนิคอื่นๆ มาร่วมด้วย เช่น X-Rays เทคนิค Photoemission และเทคนิค Molecular Simulation ซึ่งจะมีประโยชน์ ทำให้ทราบถึง การจัดเรียงโมเลกุลในแผ่นฟิล์ม รวมทั้งโครงสร้างเชิงอิเล็กตรอนด้วย

Orgatronics สามารถทำโดย screen print ได้ (Picture from Ed van den Kieboom) porphyrin และ phthalocyanine เป็นโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นวง (Macrocyclic Molecule) แต่มีความพิเศษตรงที่มี conjugated bonds เชื่อมต่อกันครบวง ซึ่งทำให้มันมีความสามารถ ในการนำไฟฟ้าในโมเลกุล และเนื่องจาก อันตรกริยาแบบ pi-pi ระหว่างโมเลกุล จึงทำให้มันสามารถจัดเรียงตัวในลักษณะ stack มีผลทำให้เกิดการกระโดด ของอิเล็กตรอนข้ามไปมาได้ มันจึงเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ในระดับหนึ่ง นอกจากนั้น มันยังสามารถเกิด อันตรกริยากับ โมเลกุลอินทรีย์ได้หลากชนิด การที่มันมีโลหะทรานสิชัน (Transition Metal) เกาะยึดอย่างแน่นตรงกลางวง ทำให้การเกิดอันตรกริยากับโมเลกุลอื่น ยิ่งซับซ้อนมากขึ้น porphyrin และ phthalocyanine ที่มีโลหะตรงกลางแตกต่างกัน มีคุณสมบัติในการเกิดอันตรกริยา กับโมเลกุลอื่นๆ แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงหมู่แทนที่ด้านข้างของวง ก็ทำให้สมบัติของ porphyrin และ phthalocyanine เปลี่ยนไปได้ ทั้งอันตรกริยากับโมเลกุลอื่นๆ สมบัติเชิงอิเล็กตรอน สมบัติเชิงแสง รวมถึงสมบัติอื่นๆ ที่แสดงออกในมุมมองของการใช้เป็นวัสดุทำเซ็นเซอร์



รูปที่ 10 Metal porphine metal porphyrin และ metal phthalocyanine

ความพิเศษของ porphyrin และ phthalocyanine นี้เอง ได้ทำให้วงการเซ็นเซอร์โมเลกุลให้ความสนใจ ในความสามารถของวัสดุชนิดนี้ ในการนำมาใช้ประโยชน์ เป็นเซ็นเซอร์ตรวจสอบโมเลกุล โดยเฉพาะสำหรับการตรวจวัด พวกสารอินทรีย์ระเหยง่าย สำหรับงานเชิงวิศวกรรม ในการสร้างอุปกรณ์นั้นปัจจุบัน ก็มีความก้าวหน้าพอควร แต่ในแง่ขององค์ความรู้พื้นฐาน เกี่ยวกับลักษณะโครงสร้าง พลวัต และ อันตรกริยา ของ porphyrin และ phthalocyanine กับสารที่จะตรวจสอบนั้น ยังไม่ค่อยเป็นที่แน่ชัดว่า มีลักษณะอย่างไร สัณนิษฐานกันว่า สารอินทรีย์เกิดอันตรกริยา กับเมทัลโลพอร์ไพรินได้หลายแบบ เช่น เกิดพันธะ pi-pi กับวง เกิดพันธะการล้อมรอบ (Coordinated Bond) กับโลหะทรานสิชันที่อยู่ตรงกลาง เป็นต้น จากประสบการณ์ในการศึกษาโมเลกุล ที่มีลักษณะคล้ายๆ กันนี้คือ โมเลกุลคราวน์อีเธอร์ (Crown Ethers) พบว่า การเกิดอันตรกริยาระหว่างโมเลกุลที่เป็นวง กับโมเลกุลอื่นๆ มีความซับซ้อน พันธะในการเกาะยึดระหว่างโมเลกุลที่เป็นวง กับโมเลกุลอื่นก็มีพลวัตสูงอีกด้วย ดังนั้นการเข้าไปศึกษาในแง่พื้นฐาน น่าจะช่วยในด้านวิศวกรรมของการนำเซ็นเซอร์ ไปใช้งานด้วย

6. สมดุลย์ของระยะห่างอะตอม (Equilibrium Atomic Distance)

อะตอม เมื่อมาใกล้กันจะเกิดพันธะขึ้น พันธะที่ว่า ก็คือ การที่วาเลนต์อิเล็กตรอนวิ่งไปมาระหว่างอะตอมที่มาอยู่ใกล้กัน ธรรมชาติของพันธะนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอมที่มาอยู่ใกล้ ๆ กัน หากทำการทดลอง หรือ คำนวณดู จะสามารถทราบได้ว่า อะตอมใดจะเกิดพันธะกับอะตอมใดได้บ้าง และ พันธะนั้นจะเสถียรหรือไม่ นอกจากนี้ คุณสมบัติต่าง ๆ ของโมเลกุล ขึ้นอยู่กับ ลักษณะการเกิดพันธะ การทราบถึงคุณสมบัติของ โมเลกุลใด ๆ ก็คงต้องศึกษาให้ลึกซึ้ง ในวิชา กลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) และ ลงลึกทางด้าน เคมีควอนตัม (quantum chemistry)

ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับเรื่องนี้ก็คือ อะตอมแต่ละตัวเป็นกลาง (มีจำนวน โปรตอน กับ อิเล็กตรอน เท่ากัน) เมื่อนิวเคลียสของอะตอมทั้งสองมาใกล้กัน จะเกิดแรง

1. ดูดกันระหว่าง วาเลนซ์อิเล็กตรอน ของ อะตอมหนึ่ง กับ โปรตอน ของ อีกอะตอมหนึ่ง
2. ผลักกันระหว่าง โปรตอนในอะตอมหนึ่ง กับ โปรตอนในอีกอะตอมหนึ่ง
3. ผลักกันระหว่าง วาเลนซ์อิเล็กตรอน ของทั้งสองอะตอม

สมดุลย์ของแรงทั้งสามจะนำมาสู่ระยะห่างสมดุลย์ระหว่างอะตอมตัวอย่างการคำนวณที่นำเสนอ นี้ คือ การใช้ วิธี ab initio pseudo potential density functional theory ในการคำนวณ การเกิดพันธะ และ การเกิดสมดุลย์ ของ ไฮโดรเจนโมเลกุล โดยอ่านรายละเอียดวิธีการคำนวณได้ใน Rev. Mod. Phys. 64, 1045 (1992))