

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง [1]

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่น(wave) และ อนุภาค(particle) ปรากฏการณ์ที่เราเห็นอยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อน(reflection) การแทรกสอด(interference) และการหักเหแสง(refraction) แสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก(external photoelectric effect)

2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งถ้าให้ λ เป็นความยาวคลื่นแสง v คือความถี่ของคลื่นแสง และ c_0 คือความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ($c_0 = 2.99792458 \times 10^8$ m/s) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = \frac{c_0}{v} \quad (2.1)$$

ถ้าแสงเดินทางในวัตถุที่มีเนื้อเรียบตลอดและเป็นวัตถุไอโซโทรปีแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง ที่ขอบของวัตถุทั้งสองนั้นแสงจะหักเหหรือสะท้อนกลับได้ การเดินทางของแสงในวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ(n) จะทำให้ความเร็วของแสงช้ากว่าในสุญญากาศ กล่าวคือความเร็วแสง(c) ในวัตถุเท่ากับ

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2.2)$$

ค่าดัชนีหักเหแสงของวัตถุใดๆจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความถี่ของแสงด้วย และค่าดัชนีหักเหแสงนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ ของวัตถุ ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (2.3)$$

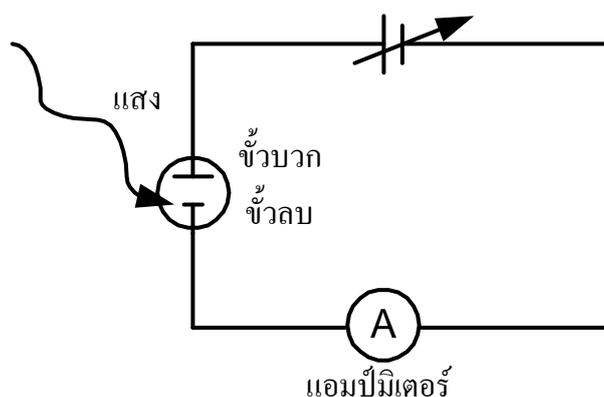
โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ $= 8.854182 \times 10^{-12}$ F/m

2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง

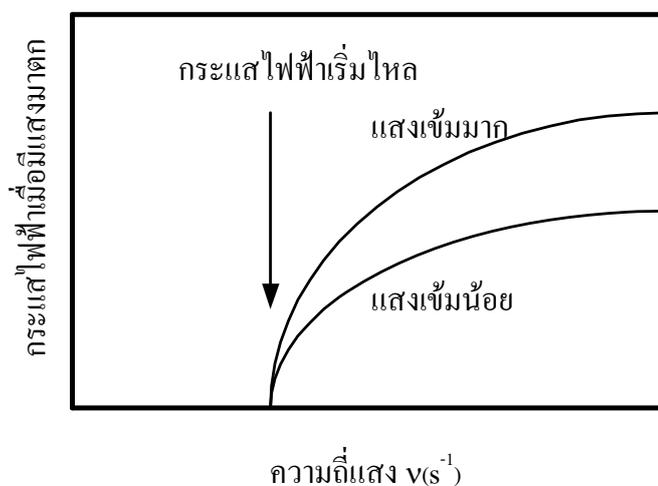
แสงนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคของแสงว่า โฟตอน(Photon) อนุภาคของแสงจะมีพลังงานอยู่ในตัวของมันและถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ ν อนุภาคของแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) $= 6.6261 \times 10^{-34}$ j.s และแสงที่มีความยาวคลื่น λ ใดๆ จะมีพลังงานโฟตอนเป็น

$$\text{พลังงานโฟตอน} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.4)$$

ตัวอย่างปรากฏการณ์หนึ่งที่แสดงว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวของโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศ แล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะกระเด็นออกจากโลหะ แสดงวิธีการทดลองดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์นี้ไอน์สไตน์ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อแสงที่มีความถี่ ν เดินทางไปในปริภูมิ(space) แสงนั้นไม่ได้มีพลังงานเป็นค่าต่อเนื่อง แต่แสงจะเป็นอนุภาคที่มีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ ที่วิ่งไปในปริภูมินั้นไอน์สไตน์ได้ตั้งชื่ออนุภาคแสงนี้ว่า light quantum ต่อมาเรารู้จักกันในชื่อ โฟตอน

จากนั้นไอน์สไตน์ยังได้อธิบายรายละเอียดของปรากฏการณ์ในรูปที่ 2.2 ไว้ว่า พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ E มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวโลหะ $h\nu$ ลบด้วยพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก $q\phi$ และเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$E = h\nu - q\phi \quad (2.5)$$

โดยที่ ϕ เรียกว่า เวิร์กฟังก์ชัน(Work function) และ $q\phi$ มีหน่วยเป็น eV

2.1.3 การเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง

คลื่นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ คลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง โดยที่แสงนั้นจัดเป็นคลื่นตามขวางและเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(electromagnetic wave) ที่กล่าวว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะแสงประกอบไปด้วยคลื่นแม่เหล็ก \vec{H} และสนามไฟฟ้า \vec{E} และทั้ง \vec{H} และ \vec{E} นี้มีค่าเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์(sine wave) ที่สั้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของการเดินทางของแสง

โดยสมการของ \vec{H} และ \vec{E} มีดังนี้

$$\vec{E} = \vec{E}_o \exp[-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta)] \quad (2.6)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_o \exp[-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta)] \quad (2.7)$$

โดยที่ \vec{E}_o คือ แอมพลิจูดของ \vec{E}

\vec{H}_o คือ แอมพลิจูดของ \vec{H}

ω คือ ความถี่เชิงมุมหมุน $= 2\pi f$

\vec{r} คือ เวกเตอร์ระยะทาง

\vec{k} คือ เวกเตอร์ของเลขคลื่น $= 2\pi/\lambda$

δ คือ เฟส (phase)

ถ้าแสงเดินทางเข้าสู่วัตถุ จะมีแรง F(Lorentz force) ที่เกิดอันตรกิริยา(interaction) ระหว่างแสงและประจุไฟฟ้า e ในวัตถุที่เป็นจุด และแรงมีค่าดังนี้

$$\vec{F} = e\vec{E} + \frac{e}{c}\vec{v} \times \vec{H} \quad (2.8)$$

โดยที่ \vec{v} คือความเร็วของประจุไฟฟ้าในวัตถุ

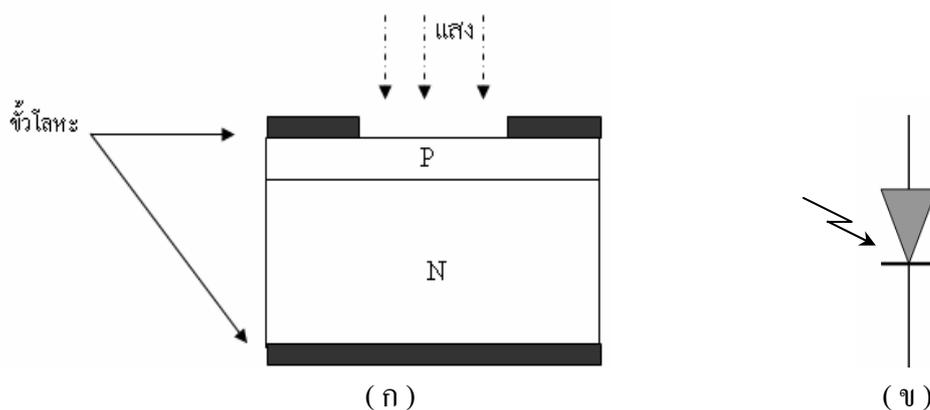
เนื่องจากโดยทั่วไป แอมพลิจูดของ $|\vec{E}|=|\vec{H}|$ ดังนั้นสมการนี้ทำให้เราทราบว่าแรงกระทำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กของแสงจึงมีค่าเพียงประมาณ v/c เท่าของแรงกระทำที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของแสง และนอกจากนี้ความเร็ว v ของประจุไฟฟ้าในวัตถุมีค่าประมาณ $1/100$ ของ c ดังนั้น v/c ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบของแสงนี้มีต่อวัตถุเราจึงพิจารณาเฉพาะสนามไฟฟ้าเป็นหลักก็ได้

2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดแสงและประเภทของตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสง(Photo detector) คือ อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในปัจจุบันมีอยู่หลายโครงสร้างด้วยกันคือ

2.2.1 โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n (PN photodiode)[2]

โฟโตไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น ก็คือ ไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นทั่วไป แต่เนื่องจากจะต้องทำงานเกี่ยวข้องกับแสง ดังนั้นจึงถูกออกแบบให้สามารถรับแสงได้ขณะใช้งาน ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดแบบนี้ แสดงดังในรูปที่ 2.3 ก โดยชั้นรับแสงจะมีขนาดบางมาก และสัญลักษณ์ของโฟโตไดโอดแสดงดังรูปที่ 2.3 ข



รูปที่ 2.3 ก) โครงสร้างภาคตัดขวาง และ ข) สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

ขณะที่ถูกใช้งานไดโอดจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และเมื่อยังไม่ได้รับแสงใดๆ จะมีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ(Saturation reverse current : I_S) ไหลผ่านไดโอด กระแสนี้มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจะได้ว่า ขณะที่โฟโตไดโอดไม่ได้รับแสง

$$I = I_{dark} = I_S \quad (2.9)$$

ต่อมาเมื่อได้รับแสง โฟตอนในลำแสงหรือรังสี($E_{\text{photon}}=h\nu$) ที่มาพลังงานสูงกว่า ขนาดช่องว่างพลังงาน(Energy gap : E_G) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $h\nu > E_G$ หรือ $\lambda < \lambda_{\text{max}}$ จะทำให้การดูดกลืนโฟตอนในสารกึ่งตัวนำ และเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งถูกเรียกว่า “อิเล็กตรอนแสง”(Photoelectron) และ “โฟตอนแสง”(Photo hole) แต่เนื่องจากที่ย่านส่วนเนื้อสาร(Bulk) ของสารกึ่งตัวนำเป็นบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นในย่านนี้จึงรวมตัวกันเอง (recombination) โดยไม่มีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าใดๆ แต่โฟตอนในแสงที่ตกกระทบและผ่านเข้าไปถึงบริเวณปลดพาหะของรอยต่อ จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น สนามไฟฟ้าที่บริเวณปลดพาหะจะผลักให้อิเล็กตรอนและโฮล เคลื่อนที่ออกไปจากบริเวณนี้อย่างรวดเร็ว โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น และโฮล เคลื่อนที่ไปยังด้านพี ดังนั้นจะทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าแสง (Photo current : I_L) ไหลในวงจรได้โดยกระแสแสง(I_L) จะมีทิศทางเดียวกับกระแส I_{dark} แต่จะมีทิศทางข้ามกับกระแสที่แรงดันไบอัสตรง ดังนั้นขณะ โฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ภายใต้ความเข้มแสง กระแสที่ไหลผ่านไดโอดคือ

$$I = I_{\text{dark}} + I_L \quad (2.10)$$

โดยที่ I_{dark} คือ กระแสมืด (ไม่ได้รับแสง)

I_L คือ กระแสแสง

สมการกระแสแสงของโฟโตไดโอด แสดงได้โดย

$$I_L = qA(L_n + w + L_p)G_L \quad (2.11)$$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของไดโอด

L_n และ L_p คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ

G_L คือ อัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง = $\frac{\delta n}{\tau} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$

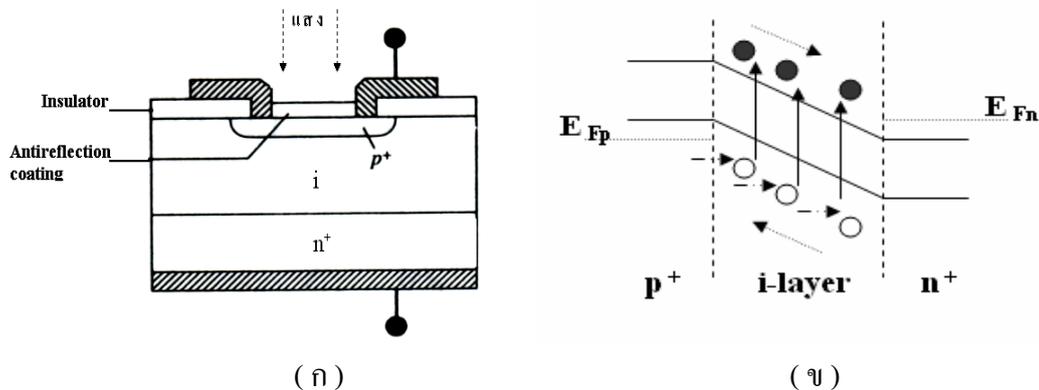
w คือ ความกว้างของบริเวณปลดพาหะ

จากสมการที่ (2.11) หากพิจารณาว่า $w \ll (L_n + L_p)$ จะได้ว่า กระแสแสง จะแปรกับแรงดันไบอัสเพราะว่า $w \propto V$

แต่หากพิจารณาว่า $w \gg (L_n + L_p)$ จะได้ว่ากระแสแสงไม่ขึ้นกับแรงดันไบอัส เพราะ w ในสมการ (2.11) มีค่าน้อยมาก ตัดทิ้งได้ ดังนั้นจะได้ว่า $I_L \propto G_L$ อัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง(G_L) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น กระแสแสงจึงมีค่าเพิ่มขึ้นกับความเข้มแสงและมีค่าคงที่ ที่ความเข้มแสงค่าหนึ่ง ๆ โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัส

2.2.2 พินโฟโตไดโอด (PIN photodiode)[3]

โฟโตไดโอดแบบ p-i-n เป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง และอัตราเร็วในการทำงาน สูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา มีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4 ก โดยประกอบด้วย ส่วน p^+ ส่วน i (Intrinsic) และส่วน n^+ แต่มีขั้วไฟฟ้าเพียง 2 ขั้วคือ ขั้ว p^+ เป็นแอโนด และขั้ว n^+ เป็นขั้วแคโทด ส่วน i หรืออินทรินซิก ในทางปฏิบัติมักเติมอะตอมสารเจืออย่างเจือจางเพื่อให้มีสภาพต้านทานสูง คล้ายกับเป็นสารอินทรินซิก ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ด้านบน และเป็นด้านที่รับแสง จะถูกสร้างขึ้นมาให้มีขนาดบางมากๆ เพื่อให้โฟตอนในแสงสามารถทะลุผ่านลงไปถึงชั้น i และที่ชั้น i นี้มีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้และ โฟตอนเหล่านี้มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ได้ นอกจากนี้ เนื่องจากชั้น i มีสภาพต้านทานสูงกว่า p^+ และชั้น n^+ ดังนั้นในขณะที่ทำงานซึ่งโฟโตไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ จะทำให้บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น ขยายลึกเข้าไปในส่วนของ i ทั้งสองข้าง และ เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมส่วน i จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น i ถ้าพิจารณาว่าสนามไฟฟ้าในส่วน i มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอโดยตลอด ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n แสดงดังรูปที่ 2.4 ข



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

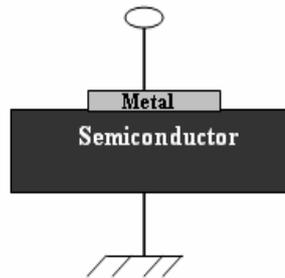
ก) ภาพตัดขวาง

ข) แถบพลังงานขณะเกิดพาหะเนื่องจากแสงในส่วน I ของไดโอด

เมื่อโฟตอนจากแสงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นที่ส่วน i สนามไฟฟ้าในส่วน i จะทำให้พาหะดริฟท์ ออกไปยังขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านอย่างรวดเร็ว และทำให้มีกระแสแสงไหลในวงจรซึ่งข้อดีของไดโอดแบบนี้ก็คือ เราสามารถออกแบบ เพื่อควบคุม หรือกำหนดขนาดความกว้างชั้น i ทำให้สะดวก และสามารถกำหนดคุณสมบัติผลตอบสนองต่อสเปกตรัม (Spectral response) ได้เป็นอย่างดี

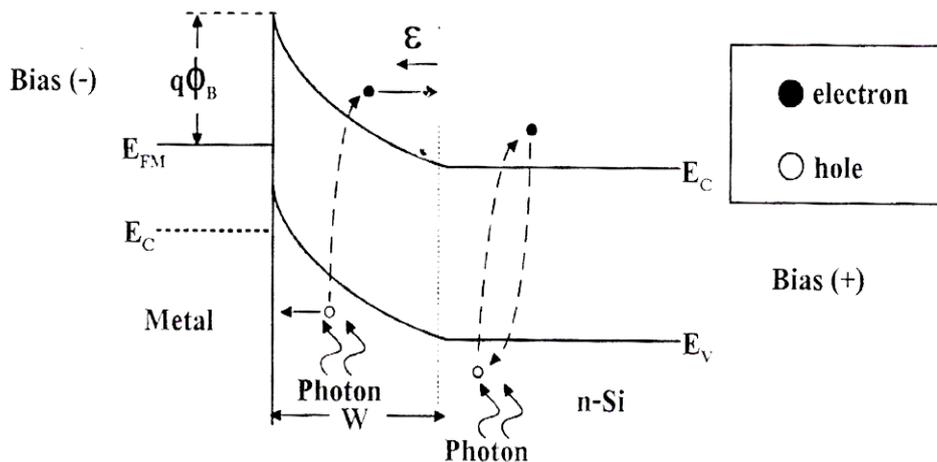
2.2.3 โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ[4]

คือ โฟโตไดโอดที่เกิดจากการนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตต์กี(Schottky junction) ซึ่งลักษณะของโฟโตไดโอดชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.5 โฟโตไดโอดชนิดนี้มีข้อดีคือ สร้างง่าย, มีความเร็วในการทำงานสูง และมีค่าความจุต่ำ แต่มีข้อเสีย คือ มีกระแสมีดสูง, แรงดันพังทลายต่ำ และยากต่อการควบคุมพารามิเตอร์



รูปที่ 2.5 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อช็อตต์กี

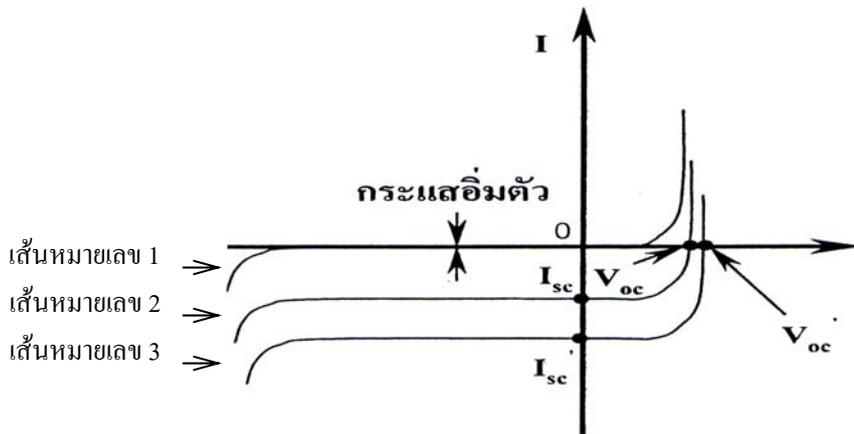
โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ นี้มีหลักการทำงานคือ ในภาวะมีดจะมีค่ากระแสค่าหนึ่งซึ่งเกิดแรงดันไบอัสย้อนกลับ ทำให้มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ เรียกกระแสนี้ว่า “กระแสมีด” แต่เมื่อเขตปลอดพาหะ(W) บริเวณรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำได้รับแสงจะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นซึ่งคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นนี้จะแยกออกจากกันภายใต้สนามไฟฟ้าตามลำดับ ส่งผลให้เกิดเป็นกระแสแสงขึ้นมา โดยมีทิศทางเดียวกันกับกระแสมีด ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.6



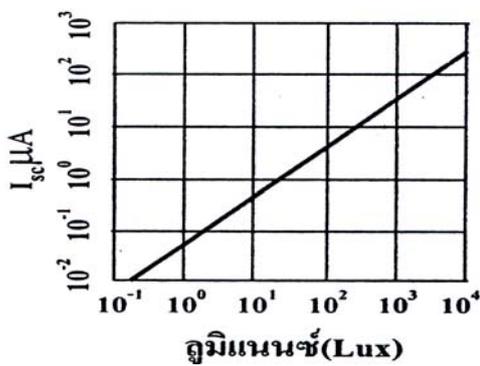
รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

2.3 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

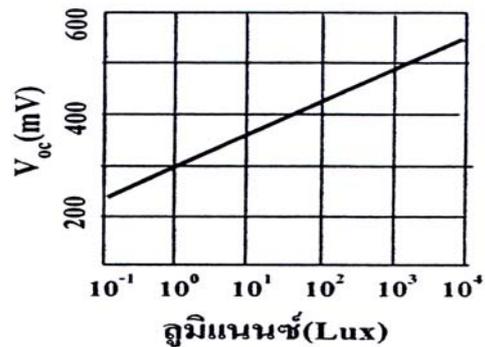
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า โฟโตไดโอดก็คืออุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับไดโอด ดังนั้นในขณะที่ยังไม่มีแสงส่องกระทบที่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมืดจะเหมือนกับของไดโอดที่ใช้กันทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.7 (เส้นหมายเลข 1) เมื่อมีแสงส่องเข้าสู่โฟโตไดโอด จะทำให้เส้น I-V เลื่อนแบบขนานไปสู่เส้นหมายเลข 2 แต่ถ้าความเข้มแสงมากขึ้นก็จะเป็นเส้นกราฟแบบหมายเลข 3 ในขณะที่อยู่ภายใต้ความเข้มแสง อยู่ถ้าทำการวัดกระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอดจะได้ค่า I_{sc} โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอโนดไปแคโทด ถ้าเป็นวงจรเราจะได้แรงดันวงจรเปิด V_{oc} หรือ V'_{oc} และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มแสงเป็นลักษณะเชิงเส้นตรงที่ดีมากดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก)



รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าใน โฟโตไดโอด



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินฟราเรด (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจร V_{oc} และความเข้มของแสงอินฟราเรด

ถ้าความเข้มแสงอยู่ในช่วง 10^{-12} - 10^{-3} (W) I_{sc} จะเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นตรงประมาณ 6-8 หลักซึ่งความเข้มแสงที่ต่ำที่สุดที่ยังคงทำให้ I_{sc} แบบเชิงเส้นตรง ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของโหลดและแรงดันไบแอสย้อนตามสมการต่อไปนี้

$$P_{max} = \frac{V_{Bi} + V_R}{(R_s + R_L) \cdot R_\lambda} \quad (2.12)$$

โดยที่

P_{max} คือ ความเข้มแสงสูงสุดที่กระแสไฟฟ้ายังเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นตรงกับความเข้มของแสง

V_{Bi} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) (V)

V_R คือ แรงดันไบแอสย้อนกลับ (V)

R_L คือ ความต้านทานโหลด (Ω)

R_λ คือ ความไวของโฟโตไดโอด (A/W) ที่ความยาวคลื่น λ

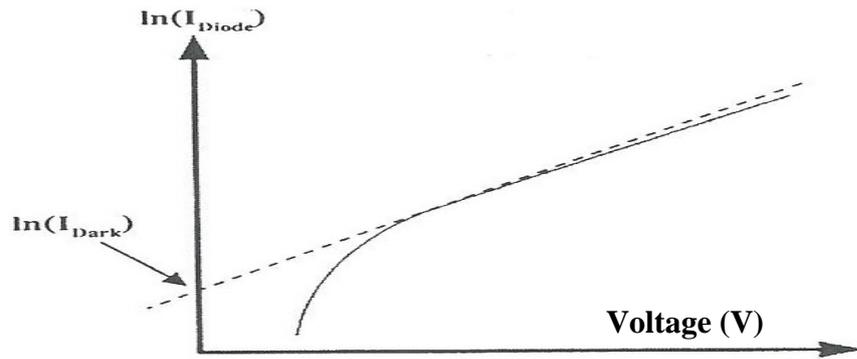
R_s คือ ความต้านทานอนุกรม (Ω)

2.4 ข้อมูลจำเพาะพื้นฐานต่างๆของโฟโตไดโอด[5],[6],[7]

2.4.1 กระแสมืดของโฟโตไดโอด(Dark current : I_{Dark})

กระแสมืด คือ กระแสที่เกิดจากพาหะส่วนน้อย เนื่องจากการไบแอสย้อนกลับในขณะที่โฟโตไดโอดไม่ได้รับแสงโดยปกติจะมีค่าน้อย กระแสมืดหรือกระแสรั่วจัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญโดยต้องควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด เพราะ ถือเป็นสัญญาณรบกวนแบบหนึ่ง โดยกระแสมืดนั้นสามารถเกิดจากการไอออไนซ์ของอะตอมเนื่องจากความร้อน(Thermal ionization) ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นและเป็นกระแสมืดได้ เรียกว่า Thermal noise ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิ ขณะใช้งานจึงมีความจำเป็น เพื่อการควบคุมค่ากระแสมืดนี้

กระแสมืดเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ขีดความสามารถในการตรวจวัดสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่รับได้นั้นควรมีค่ามากกว่าที่จะแสดงนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสมืด เพราะหากสัญญาณที่โฟโตไดโอดตรวจจับได้มีค่าน้อยกว่ากระแสมืดมากๆ จะส่งผลให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณแสงได้อย่างชัดเจน การหาค่ากระแสมืดสามารถหาได้จากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (ค่าลี้กฐานอี่) และแรงดันของโฟโตไดโอดหรือ $\ln(I_{Diode}) - V$ ในขณะที่ได้รับไบแอสตรง ดังแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแสในตัวไหลย้อนกลับ($\ln(I)$) กับ แรงดันไบอัส

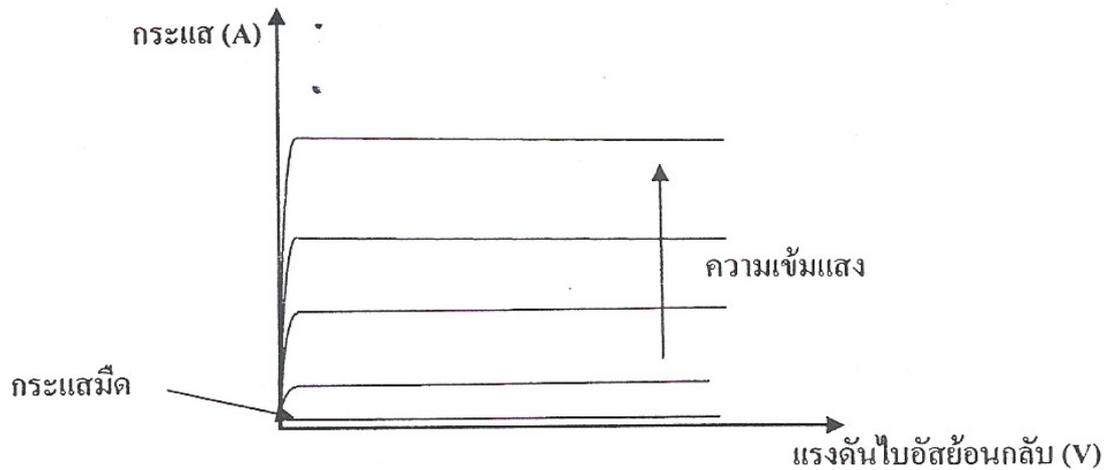
2.4.2 กระแสแสงของโฟโตไดโอด(Photo current : I_{photo})

กระแสแสง คือ กระแสที่เกิดขึ้นใน โฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแสง เนื่องมาจากการดูดกลืนโฟตอนในโฟโตไดโอดทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระ ภายใต้สนามไฟฟ้าในไดโอดจะทำให้พาหะเหล่านี้ เคลื่อนที่และกลายเป็นกระแสแสงไหลในวงจร

กระแสแสงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและบ่งบอกถึงขีดความสามารถในการตรวจวัดแสงปกติ ค่าของกระแสแสงที่ได้ควรมีค่ามากพอที่จะแสดงนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสมืดโดยทั่วไป ขนาดของกระแสแสงจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสง พื้นที่รับแสงและประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอด และค่าของกระแสแสงของโฟโตไดโอดสามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ (2.11) โฟโตไดโอดที่ดีจะต้องสามารถให้กระแสแสงได้สูง กระแสรวมที่ไหลในวงจรขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแสง เป็นผลรวมของกระแสแสงและกระแสมืด ดังนั้นค่าของกระแสแสง อาจหาได้จากผลต่างของกระแสรวมและกระแสมืด ดังสมการที่ (2.13)

$$I_{\text{photo}} = I_{\text{Total}} - I_{\text{Dark}} \quad (2.13)$$

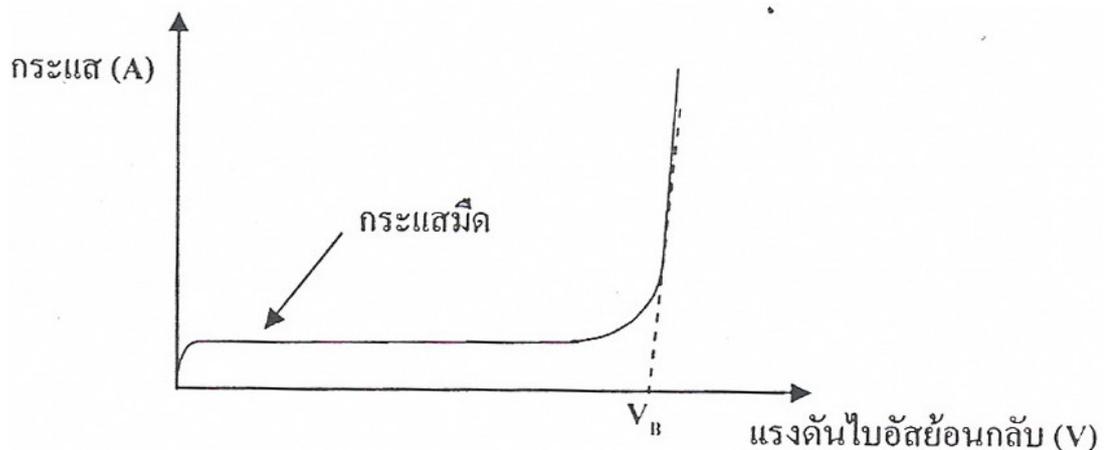
และลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสแสง(I_{photo}) กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของโฟโตไดโอดในขณะที่ได้รับแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับแรงดันไบอัสย้อนกลับขณะได้รับแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

2.4.3 แรงดันพังทลายของโฟโตไดโอด (Breakdown voltage : V_B)

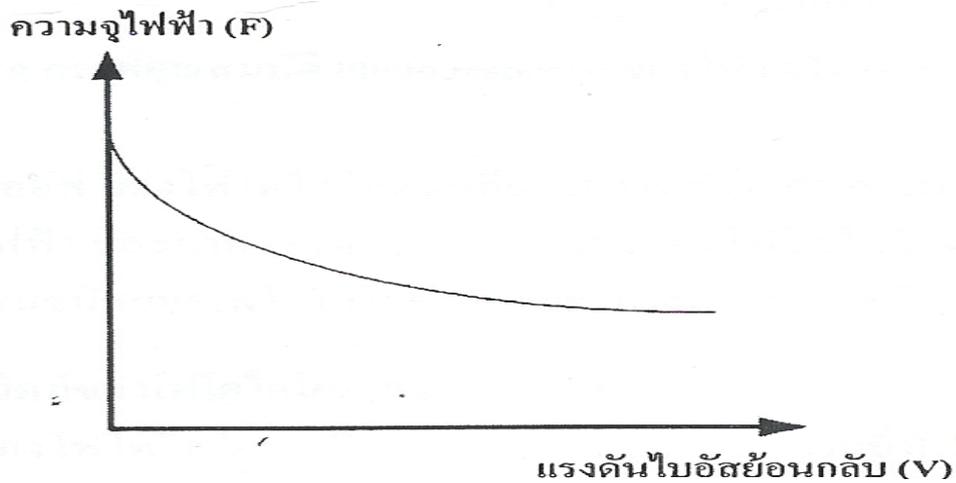
แรงดันพังทลายของโฟโตไดโอดเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการกำหนดค่าแรงดันไบอัสให้แก่โฟโตไดโอดขณะใช้งาน ซึ่งค่าแรงดันพังทลายนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์ในการใช้งาน เช่น อวาแลนซ์โฟโตไดโอด (APD) ต้องออกแบบให้โฟโตไดโอดเกิดการพังทลายแบบอวาแลนซ์ เพื่อให้เกิดการชนของอิเล็กตรอนกับแบบทวีคูณซึ่งทำให้มีอัตราการขยายของกระแสสูง จึงจำเป็นต้องมีค่าแรงดันพังทลายสูงเป็นต้น โดยสามารถหาค่าแรงดันพังทลายของโฟโตไดโอดได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ค่าแรงดันพังทลายของโฟโตไดโอด

2.4.4 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด(Junction capacitance : C_j)

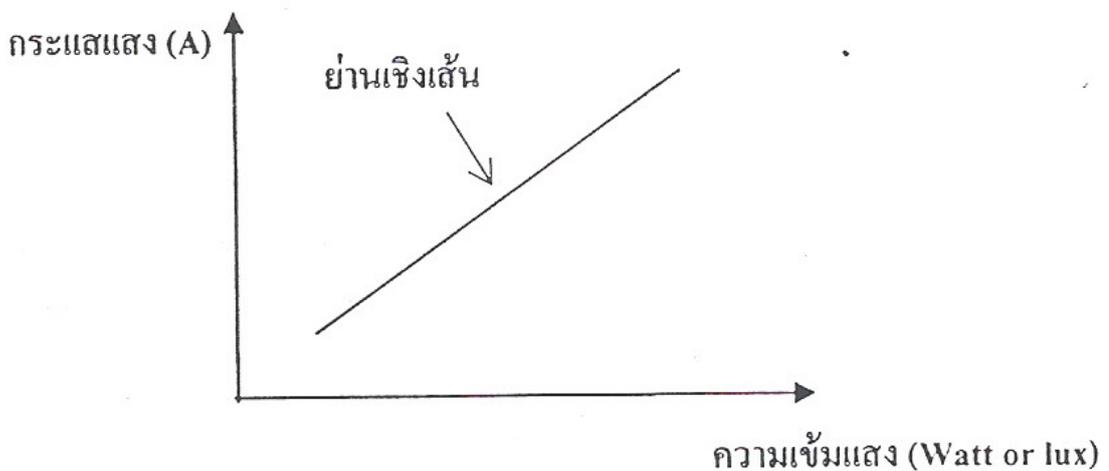
ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความเร็วในการทำงาน หรือความเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงของโฟโตไดโอด ซึ่งค่าของความจุไฟฟ้าของไดโอดจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของรอยต่อใน โฟโตไดโอด หรือก็คือขนาดของไดโอด สำหรับ โฟโตไดโอดที่มีขนาดใหญ่ จะมีค่าความจุไฟฟ้าสูง นอกจากนี้แล้วค่าความจุไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นๆ และเงื่อนไขของการสร้างอีกด้วย ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดสามารถวัดและแสดงได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

2.4.5 ความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอด(Linearity)

ความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอด คือ ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสแสงกับความเข้มแสง ที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงที่คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งถ้าโฟโตไดโอดมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี จะสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย

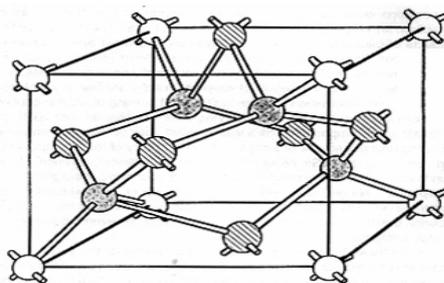


รูปที่ 2.13 ความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอดระหว่างกระแสแสงกับความเข้มแสง

2.5 สารกึ่งตัวนำเพชร

2.5.1 ลักษณะโครงสร้างของผลึกคาร์บอน

ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเราสามารถนำเพชรมาสร้างเป็นโฟโตไดโอดได้เช่นกัน โดยเพชรที่เราจะนำมาสร้างมีลักษณะเป็นฟิล์มบางเพชรดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยสังเคราะห์ขึ้นได้โดยวิธี CVD แบบความร้อนที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.14 โครงสร้างผลึกของเพชร

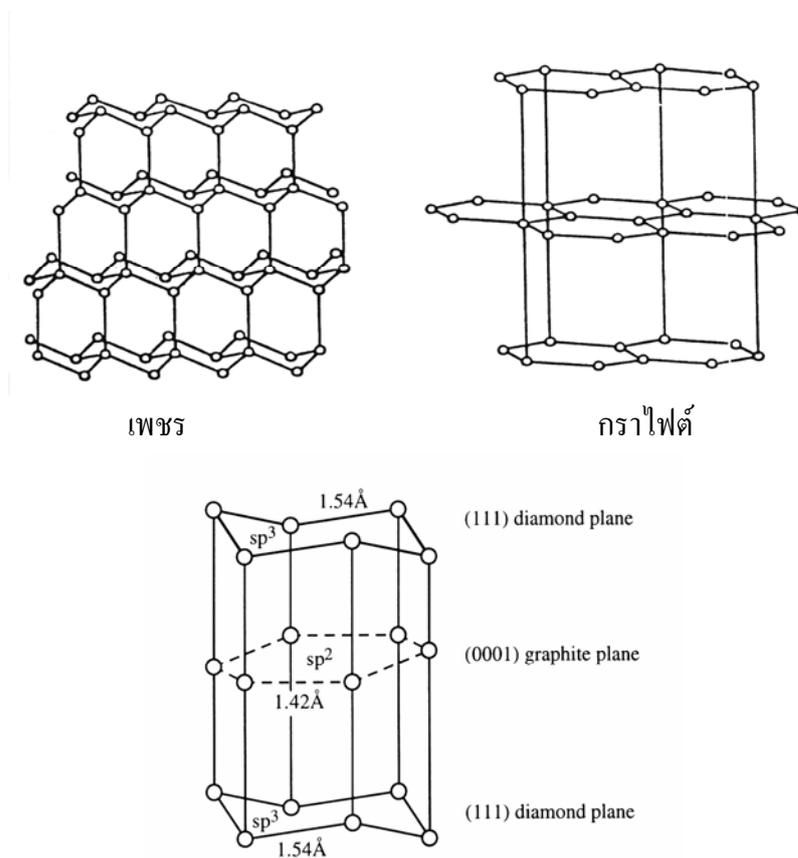
เพชรนั้นจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนซึ่งอยู่ในหมู่ 4 โดยอะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า “Diamond structure” ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14

จากรูปพบว่าภายในยูนิตเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง $1/4$ เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิตเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมองอีกอย่างหนึ่งว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ $\{111\}$ 2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุดและระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายขวางวางซ้อนกันอยู่เป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจดูมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆของวงแหวนหกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกัน ในทิศทางของระนาบ $\{111\}$ การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.567 \AA และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.54 \AA ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First order peak) ของเพชรมีค่า 1332 cm^{-1} และยอดลำดับที่สอง (Second order peak) ของเพชรเท่ากับ 2458 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดลำดับที่หนึ่งอยู่ที่ 1284 cm^{-1}

2.5.1.1 Graphite

กราไฟต์เป็นรูปพื้นฐานของคาร์บอนที่พบได้มากที่สุด ลักษณะโครงสร้างภายในของมันแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 อะตอมคาร์บอนจะจับตัวที่ลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมเช่นเดียวกับเพชร แต่ข้อแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัดคืออะตอมคาร์บอนที่จับตัวเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมของกราไฟต์นั้น จะไม่มีการเชื่อมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้กันเหมือนวงแหวนหกเหลี่ยมของเพชร แต่จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบเสมอกัน อีกทั้งคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ Trigonally กับอะตอมทั้งสามตัวที่อยู่ใกล้เคียงด้วยพันธะแบบ sp^2 การเรียงลำดับชั้นของวงแหวนหกเหลี่ยม กราไฟต์จะเป็นแบบ AB AB AB... ตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงเท่ากับ 1.42 Å ในขณะที่ค่าคงที่แลตทิซคือ 6.707 Å สำหรับกราไฟต์ ผลการวัดด้วย Raman spectroscopy จะแสดงตำแหน่งยอดลำดับที่หนึ่งที่มีค่า 1580 cm^{-1} และยอดลำดับที่สองอยู่ที่ 3240 cm^{-1} ตามลำดับ

นอกจากนี้แล้วยังมีรูปต่างๆของคาร์บอนที่พบได้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรอีกเช่น Amorphous carbon, Lonsdaleite และ Microcrystalline carbon ซึ่งก็จะมีค่าของยอดคลื่นที่ต่างกัันออกไป



รูปที่ 2.15 โครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราไฟต์ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในกราไฟต์ และเพชร

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นรูปต่างๆของคาร์บอนที่พบได้ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร อย่างไรก็ตามฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดๆ ค่ายอดคลื่นจาก

Raman spectroscopy อาจจะไม่ได้แสดงตำแหน่งตรงค่า 1332 cm^{-1} พอดีแต่จะแสดงตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับค่าดังกล่าว ตัวอย่างเช่น อาจจะมีขดคลื่นเป็น 1333 cm^{-1} เนื่องจากในการเกิดเพชรขึ้นตามธรรมชาติ กระบวนการเกิดตลอดจนปัจจัยรอบข้างต่างๆมีผลทำให้เพชรธรรมชาติยังมีความแตกต่างกับเพชรที่สังเคราะห์อยู่บ้าง แต่จากผลของการวิเคราะห์หาคุณสมบัติอื่นๆของฟิล์มเพชรพบว่ามีความใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่ได้จากเพชรธรรมชาติมาก จนยอมรับได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติเหมือนกับเพชรธรรมชาติ

2.6 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของเพชรได้เป็น 3 คุณสมบัติใหญ่ๆคือ คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

2.6.1 คุณสมบัติทางกล

โครงสร้างของเพชรจะประกอบด้วยพันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรง ดังนั้นเพชรจึงมีคุณสมบัติทางกลหลายๆอย่างที่พิเศษกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ตัวอย่างเช่น เพชรจะมีความแข็ง, Molar density และ Thermal conductivity สูง ตลอดจนยังมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนต่ำมาก คือมีค่าเพียง $0.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ คุณสมบัติต่างๆทางกลของเพชรจะมีรายละเอียดดังนี้

- **Thermal conductivity** เพชรมีค่า Thermal conductivity สูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมด คือมีค่าถึง 20 watts/cm.K ข้อมูลแสดงการเปรียบเทียบอยู่ในภาคผนวก

- **Molar heat capacity** ค่า Molar heat capacity หมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของหนึ่งน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา จากภาคผนวก ก แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity ระหว่างเพชรกับวัสดุชนิดอื่นๆ จะพบว่าค่าของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ นั่นหมายความว่า เพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีเท่ากับ Heat sink

- **Thermal expansion** คือค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆแพร่ไปถึงเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 0°C ค่า Thermal expansion นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Molar heat capacity

2.6.2 คุณสมบัติทางแสง

การพิจารณาค่าคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่แล้ว จะพิจารณาค่าดัชนีหักเห และการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ และความยาวคลื่นที่กำหนด ตารางแสดงคุณสมบัติต่างๆของเพชรจะแสดงในภาคผนวก ก

2.6.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หากพิจารณาค่าคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall ในเพชรธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^{15} ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง $1,800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า $2,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ แต่ในเพชรที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ 500°C พบว่ามีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง $850 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเจอร์มาเนียม(Germanium) และอินเดียมแอนติโมนด์(Indium antimonite) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนในวัสดุอื่นๆจะมีค่าความเร็วโฮลอิมิตัวและ Dielectric strength ต่ำ ที่ความแรงสนามไฟฟ้า 10^4 V/cm ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนและโฮลเริ่มมีการอิมิตัวสำหรับโฮลมีค่าความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดที่ 10^7 cm/s และในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ $2.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง $10^{16} \Omega\cdot\text{cm}$

โบรอนเป็นสารเจือที่ถูกลำเอียงมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวทั้งนี้เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 3 ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมเหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดพิษเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก พลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อยลงเกิด Shallow level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่าประมาณ 100 ppm หรือ 10^{19} cm^{-3} พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ $370 \times 10^{-3} \text{ eV}$ และสำหรับฟิล์มเพชรชนิด Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า $10^{19}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$) ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าต่ำคือประมาณ $2 \times 10^{-3} \text{ eV}$

2.6.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดดังกล่าวนิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลจากตาราง 2.1 สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำดังนี้

1. เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์มากจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงๆซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้น(โฮลและอิเล็กตรอน) จำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้าม ทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ

2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง

3.ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ โดยเติมอะตอมสารเจือลงไป

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนและแกเลียมอาร์เซไนด์ [8], [9], [10]

| Materials | Diamond | Si | GaAs |
|--|-----------------------|---------------------|---------------------|
| Crystal Structure | Diamond | Diamond | Zinc blends |
| Energy gap (eV) | 5.45 | 1.1 | 1.43 |
| Electron mobility (cm ² /V.s) | 2000 | 1500 | 8500 |
| Hole mobility (cm ² /V.s) | 1800 | 600 | 400 |
| Breakdown field (V/cm) | 10 × 10 ⁶ | 5 × 10 ⁶ | 6 × 10 ⁶ |
| Resistivity (Ω.cm) | 10 ¹⁶ | 10 ³ | 10 ⁹ |
| Saturated electron velocity (cm/s) | 2.7 × 10 ⁷ | 1 × 10 ⁷ | 1 × 10 ⁷ |
| Dielectric Constant (ε) | 5.7 | 11 | 12.5 |
| Lattice constant (Å) | 3.567 | 5.431 | 5.653 |
| Thermal conductivity (W/cm.K) | 20 | 1.5 | 0.46 |

2.7 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่างๆ [8],[9],[10]

ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธีสร้างที่มีผู้ให้ความสนใจแพร่หลาย มีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ CVD นี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม หลักๆ ได้ตามเทคนิคที่ใช้คือ

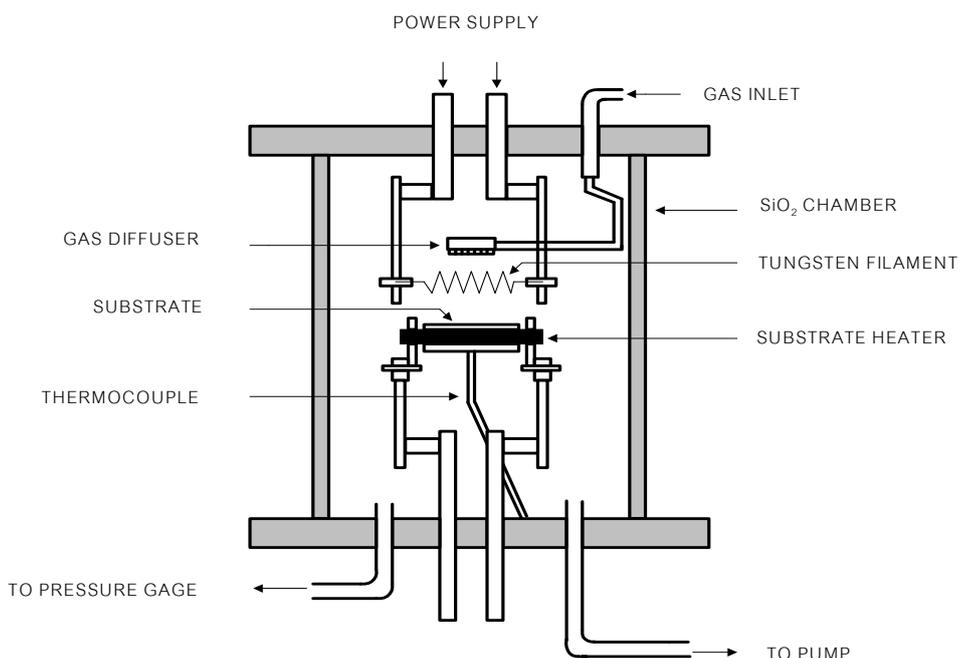
1. Thermal Enhanced CVD Methods
2. Plasma- Enhanced CVD Methods
3. Combustion Flame - Assisted CVD

ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ อาทิเช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร, อุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง, อุณหภูมิของฐานรอง, พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้ แต่ท้ายที่สุดฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการต่างๆ จากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกันอันเป็นที่ยืนยันได้ว่า แม้เทคนิคที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรต่างกัน

แต่ผลที่ได้ก็คือฟิล์มเพชรเหมือนกันนั่นเองแต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การสังเคราะห์แบบ Thermal Enhanced CVD Methods เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและได้เพชรคุณภาพดี ซึ่งจะกล่าวต่อไป

2.7.1 Thermal Enhanced CVD Methods(Filament-Assisted Thermal CVD) [12],[13]

วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Matsumoto et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผนภาพของวิธี Filament-Assisted Thermal CVD แสดงดังรูป 2.16 ภายใน Chamber มีไส้หลอดทั้งสแตนทำหน้าที่ยกานาคความร้อน อุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนมีค่าสูงถึง 2000-2200 °C ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดมีอุณหภูมิ 800-900°C เมื่อก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปใน Chamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตนจะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม ฐานรองสามารถไบอัสไฟเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวเคลียชัน และอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร วิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ในบริเวณกว้าง และมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอดทั้งสแตนสั้น เนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดทั้งสแตนเป็นเวลานาน ทำให้ไส้หลอดเปราะและผิครูปได้ง่าย



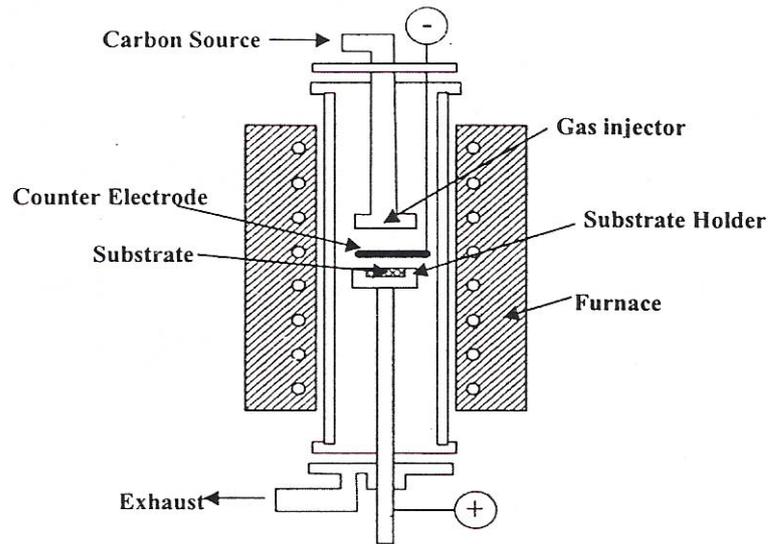
รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD

2.7.2 Plasma- Enhanced CVD Methods

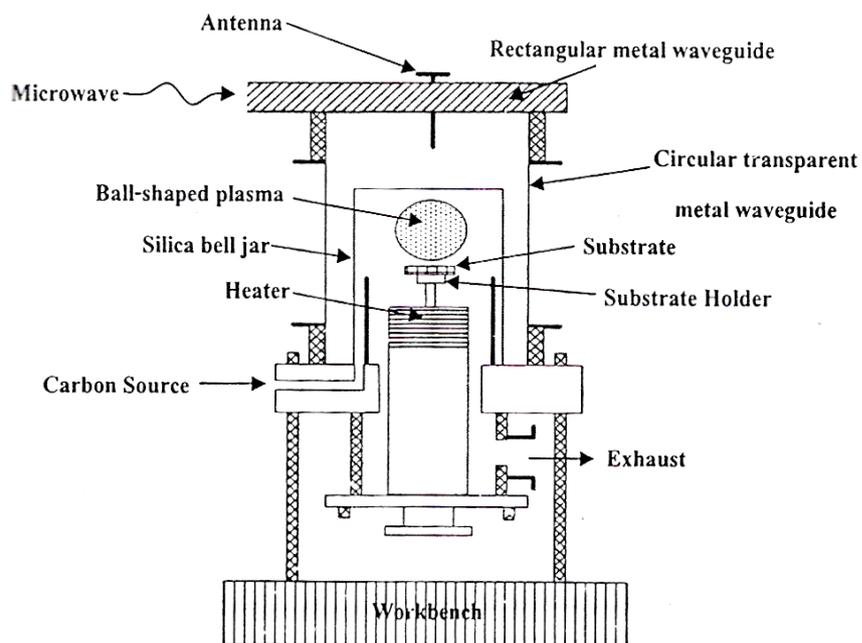
วิธี Plasma-ASSISTED CVD (PACVD) นี้เป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งใช้เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองชนิดต่างๆ ซึ่งเริ่มโดยกลุ่มวิจัยชาวญี่ปุ่นจาก NIRIM(National Institute for Research in Inorganic Material) โดยมีหลักการคือ ใช้สนามไฟฟ้าหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้โมเลกุลของก๊าซแต่ละชนิดแตกตัวเป็นอะตอม เพื่อทำปฏิกิริยากัน ก่อนจะตกลงบนฐานรองที่ได้เตรียมไว้จน

เกิดเป็นชั้นฟิล์ม ลักษณะของเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 2.17 และ 2.18 ซึ่งการสร้างสนามไฟฟ้าหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำได้หลายรูปแบบเช่น คลื่นไมโครเวฟ คลื่นวิทยุ และสนามไฟฟ้าDC เป็นต้น

สำหรับวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่มีความบริสุทธิ์ได้สูงกว่าแบบการใช้ลดความร้อน แต่มีอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรต่ำ และอุปกรณ์ที่ใช้ค่อนข้างยุ่งยาก และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบอื่นๆ



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของเครื่อง CVD แบบ DC plasma



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของเครื่อง CVD แบบ Microwave plasma

2.7.3 Combustion CVD

วิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ด้วยความดันบรรยากาศ โดย Prof. Dr. Hirose ได้สังเคราะห์จากเปลวไฟของออกซิอะเซทิลีน (Oxyacetylene) เป็นผลสำเร็จในปี 1988 ซึ่งการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐาน ที่ประกอบด้วยหัวเชื่อมก๊าซ แหล่งจ่ายก๊าซออกซิเจนและไฮโดรคาร์บอนเป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือการเผาก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรคาร์บอน ในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะปรากฏเป็นเปลวไฟสามชั้น โดยเปลวไฟชั้นกลางจะสัมผัสกับฐานรองซิลิคอน อะตอมคาร์บอนที่หลุดจากการเผาไหม้จะตกลงบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มเพชรขึ้น ซึ่งจากการทดลองของ Prof. Dr. Hirose พบว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีอัตราการเกิดสูง 100-200 $\mu\text{m/hr}$ แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ มีพื้นที่ในการเกิดฟิล์มเพชน้อย คุณภาพของฟิล์มเพชรต่ำจนไม่สามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ และมีความสม่ำเสมอของฟิล์มเพชรต่ำ

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD ซึ่งทำที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้ได้ฟิล์มเพชรนำไปประยุกต์เป็นโฟโตไดโอด

2.8 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน

หลักการพื้นฐานการสร้างฟิล์มเพชรนั้นไม่ว่าจะเป็นวิธีการใดๆตามที่กล่าวมาแล้ว จะมีกลไกพื้นฐาน ดังนี้คือ

2.8.1 ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่

เพชรจะมีความเสถียรในสภาวะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่ากราฟต์ อะตอมไฮโดรเจนเป็นตัวสำคัญในการกำจัดกราฟต์หรือลดการเกิดกราฟต์ขึ้น

2.8.2 ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอน

เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนที่จะก่อพันธะทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของเพชรหรือกราฟต์ ออกมาจากสารตั้งต้นเช่น เอทิลแอลกอฮอล์ โดยใช้ความร้อน

2.8.3 อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม

วิธี CVD แบบความร้อนทั้งหมดที่กล่าวมา เพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองที่ อุณหภูมิตั้งแต่ 500°C ถึง 1,200 °C แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ถ้าหากอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูง หรือต่ำเกินไปจากนี้ อาจจะทำให้เกิดกราฟต์หรือ Diamond-like carbon (DLC) ได้

2.8.4 ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง และจะมีโอกาสเกิดเป็นฟิล์มมากขึ้น หากมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรองเพื่อรองรับการนิวเคลียสชัน ซึ่งมีหลายวิธีในการเตรียมพื้นผิวเช่น การขัด การกัดด้วยสารเคมี การใช้แสงเลเซอร์

2.9 กลไกของการเกิดฟิล์มเพชรโดยวิธี CVD

2.9.1 กระบวนการของก๊าซเฟส

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐานคือต้องมีการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่าง คือ 1. ทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุลซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิวพร้อมที่จะก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรต่อไป 2. แยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจน การทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุลซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิวพร้อมที่จะก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรต่อไปนั้นต้องอาศัยปัจจัยหลายอย่างเช่น ปฏิกิริยาที่ไล่หลอด อุณหภูมิที่เหมาะสม

นอกจากนี้ยังพบว่าบทบาทของไฮโดรเจน และออกซิเจนนั้นยังช่วยให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นอีกด้วยหน้าที่หลักอีกอย่างหนึ่งของไฮโดรเจนคือ ช่วยทำให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้น เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเพชรอะตอมคาร์บอนจะมีพันธะแขวนขาด(Dangling bond) อะตอมไฮโดรเจนจะเข้าไปจับตัวกับแขนที่ขาดของอะตอมคาร์บอนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะของ sp^3 ไปเป็น sp^2 หรือ sp^1 และอะตอมไฮโดรเจนยังมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดเพชร โดยจะเป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนที่จับตัวเป็นพันธะ C-H กับอะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร อะตอมคาร์บอนในพันธะระหว่าง C-H เมื่อสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนออกไปจะเป็น Cd^* ดังสมการ



เมื่อ Cd คืออะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร และ Cd^* คืออะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น

บทบาทหลักๆของออกซิเจนคือช่วยทำให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมาามีคุณภาพดี เป็นที่เชื่อกันว่าหากเราผ่านอนุมูลของก๊าซออกซิเจน เช่น O, O₂ หรือ OH เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชร และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น อนุมูล OH สามารถกระตุ้นอะตอมบริเวณผิวหน้าดังสมการ

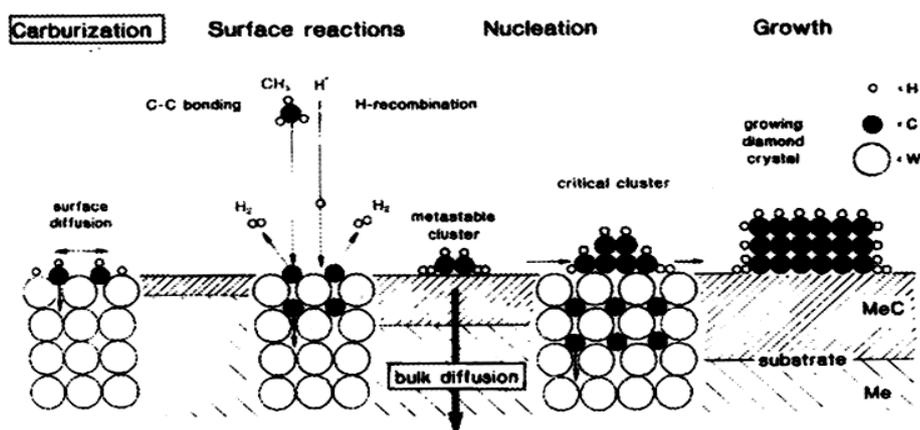


อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาจากสมการ (2.15) ยังไม่มีความสำคัญเท่ากับสมการ (2.14)

2.9.2 ปฏิกิริยาการเกิดนิวเคลียส

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.9.1 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นของก๊าซเฟสสำหรับปรากฏการณ์นิวเคลียสเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อจากกระบวนการของก๊าซเฟส การนิวเคลียสของเพชรสามารถเกิดได้ทั้งแบบ Homogeneous หรือ Heterogeneous ขึ้นอยู่กับชนิดของ

การนิวเคลียสของเพชรเริ่มต้นตรงที่มีการแพร่เข้าไปบนพื้นผิวฐานรองด้วยอนุมูลของ ก๊าซที่มีพันธะ sp^2 ดังเช่น Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs) อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่ฐานรองจนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบางๆที่จึงเรียกชั้นนี้ว่าชั้น “Intermediate layer” ชั้น Intermediate layer นี้เมื่อมีความเข้มข้นของอะตอมคาร์บอนมากพอจะทำให้เกิดขั้นตอนสำคัญของการเกิดเพชรคือเกิดการกำจัดอนุมูลที่มีพันธะ sp^2 ออกไปบนพื้นผิวของฐานรอง โดยอะตอมไฮโดรเจนหรือจากนิวเคลียสที่เสถียรทำให้มีการเปลี่ยนพันธะจาก sp^2 ไปสู่ sp^3 เกิดเป็นเพชรขึ้นบนฐานรองแผนภาพแสดงกลไกของการนิวเคลียสและการเกิดชั้น Intermediate layer แสดงได้ในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กลไกการนิวเคลียสและการเกิดชั้น intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง

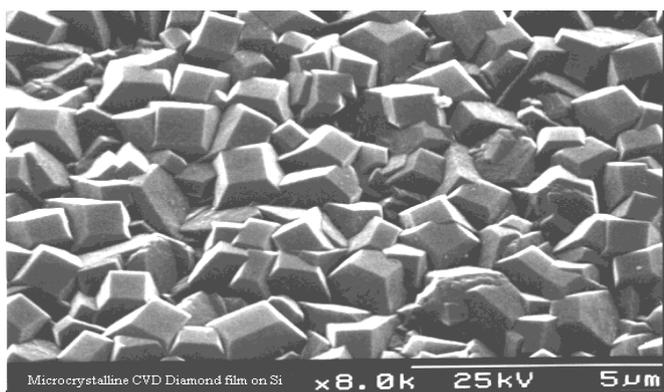
2.10 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

2.10.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM

SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน (μm) หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT(Cathode-ray tube) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscope ชนิดอื่น ๆ คือ SEM มีกำลังขยายสูง(ตั้งแต่ 50-40,000X) ความคมชัด

ของภาพสูง(2.5-10 nm) ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเปรียบเทียบกับ TEM(Transmission electron microscopy) ซึ่งสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบต้องมีความบางมากๆเพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเตรียมก่อน อย่างไรก็ตามในการใช้งานลำอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำ ๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น Raman spectroscopy

นอกจากนี้เทคนิคต่างๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้างโดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร(โดยเฉพาะฐานรอง Si) บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.20 ซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้าง โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่อไฮโดรเจน

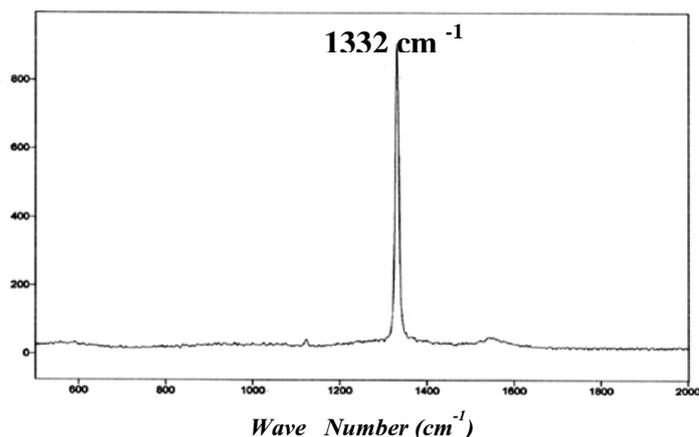


รูปที่2.20 ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มเพชร ที่ถ่ายด้วย SEM

2.10.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy[11]

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและกราไฟต์สูง ตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman Spectrum จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตรวจสอบได้

จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร, กราไฟต์, อะมอร์ฟัสคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman Spectrum และพันธะของคาร์บอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 นอกจากนี้แล้วยังสามารถใช้ Raman Spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่างๆ กันเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น รูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 Raman Spectrum ของฟิล์มเพชร

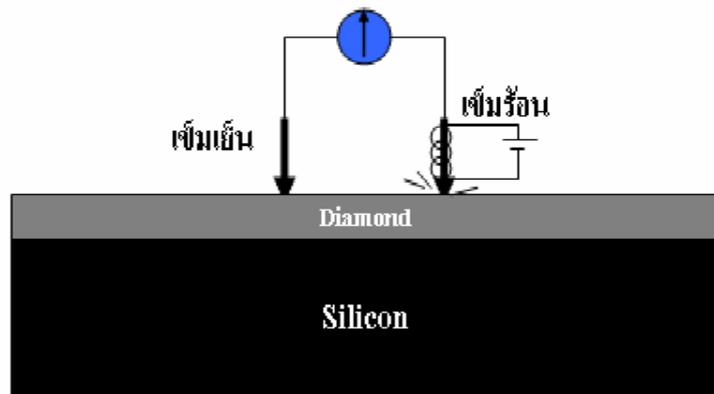
ในรูปที่ 2.21 แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชร สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่นๆ แสดงว่าฟิล์มเพชรมีคุณภาพดี

ตารางที่ 2.2 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอน[9]

| Peak position | Type of carbon | Description |
|------------------------------------|--|--|
| $\sim 1140 \text{ cm}^{-1}$ | small size ($< 0.1 \mu\text{m}$) cubic diamond | occasionally observed in diamond films with very small grain sizes ($< 0.1 \mu\text{m}$) |
| $1315\text{-}1326 \text{ cm}^{-1}$ | hexagonal diamond | broad band, observed in shock wave produced diamond |
| 1332 cm^{-1} | cubic diamond | first order peak with FWHM of 1.9 cm^{-1} for natural diamond |
| 1345 cm^{-1} | amorphous carbon | Broad band. It becomes a shoulder of the 1550 cm^{-1} band when the material is hydrogenated |
| 1355 cm^{-1} | microcrystalline graphite | observed in materials with small grain sizes |
| 1550 cm^{-1} | amorphous or diamond-like carbon | broad band |
| 1580 cm^{-1} | graphite | first order peak |
| 2458 cm^{-1} | cubic diamond | second order peak |
| 2710 cm^{-1} | microcrystalline graphite | second order peak |
| 3240 cm^{-1} | graphite | second order peak |

2.10.3. วิเคราะห์ด้วยวิธี Hot point probe(Seebeck effect)[14]

โดยปกติชนิดของพาหะส่วนมากจะเป็นตัวกำหนดชนิดของสารกึ่งตัวนำดังนั้นหลักการวัดชนิดของสารกึ่งตัวนำก็คือ การวัดและตรวจสอบชนิดของพาหะส่วนมาก ที่อยู่สารกึ่งตัวนำนั่นเอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ทำด้วยโลหะปลายแหลมซึ่งเรียกว่า “โพรบ” หรือ “เข็ม” ขณะทำการทดลอง เข็มหนึ่งจะทำหน้าที่เป็น “เข็มเย็น” โดยมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง และอีกเข็มหนึ่งจะถูกทำให้ร้อน เรียกว่า “เข็มนร้อน” โพรบทั้งสองนี้จะถูกต่อเข้ากับกัลวานอมิเตอร์ ดังรูป ที่ 2.22



รูปที่ 2.22 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดหาประจุพาหะส่วนมากในสารกึ่งตัวนำ

กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณเข็มนร้อน จะทำให้โฮลบริเวณเข็มนร้อนได้รับพลังงานจึงเคลื่อนที่ไปยังเข็มเย็น ทำให้ เข็มเย็นเสมือนมีศักย์เป็นบวก เข็มนร้อนเสมือนมีศักย์เป็นลบ กระแสสุทธิ จึงไหล จากเข็มนร้อนไปยังเข็มเย็น เข็มของ กัลวานอมิเตอร์ จึงชี้ไปยังเข็มนร้อน สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะได้ผลตรงกันข้ามคือเข็มของกัลวานอมิเตอร์ จะชี้ไปยังเข็มเย็น วิธี Hot point probe นี้ มีประโยชน์ในการหาชนิดของประจุพาหะส่วนมากในสารกึ่งตัวนำ และทำให้ทราบชนิดของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวัดคุณสมบัติต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำต่อไป

2.11 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ[14]

2.11.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก หรือ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ คือ สารกึ่งตัวนำที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือใดๆ ลงไป ตัวอย่างเช่นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งจะมีลักษณะแถบพลังงานดังรูปที่ 2.23 (ก) โดยมีระดับพลังงานเฟอร์มิจะอยู่ที่กึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานพอดี คือ

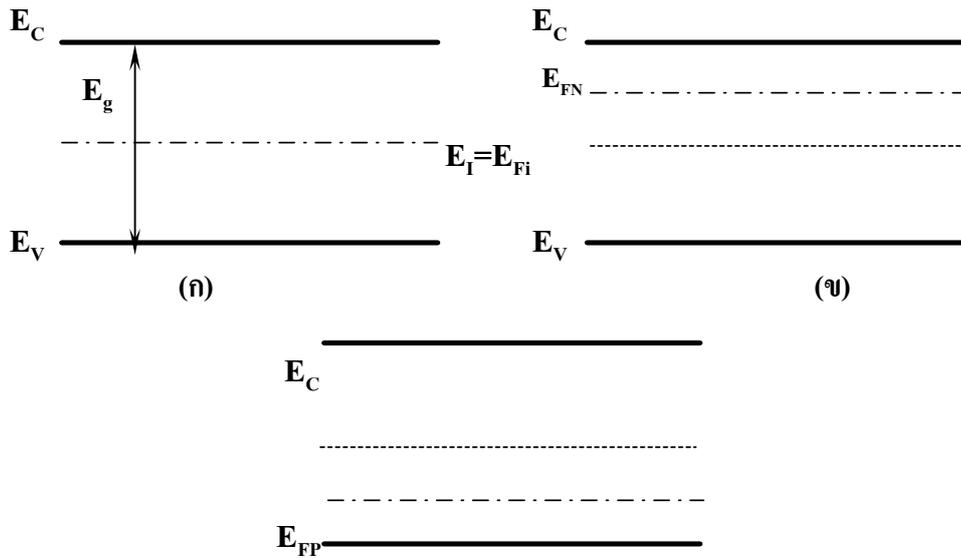
$$E_F = E_i = E_g/2$$

2.11.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี

สารกึ่งตัวนำชนิด พี เกิดจากการเติมอะตอมสารเจือที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน(boron) แกลเลียม(gallium) และ อินเดียม(indium) ลงในซิลิคอน หรือ เพชรที่บริสุทธิ์ จะทำให้ซิลิคอนหรือเพชรมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก ซึ่งระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพีนั้น จะอยู่ใกล้กับระดับพลังงานวาเลนซ์ จะอยู่ใกล้มากแค่ไหนก็ขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมอะตอมสารเจือ ถ้าเติมอะตอมสารเจือมาก ระดับพลังงานเฟอร์มิก็จะอยู่ใกล้กับระดับพลังงานวาเลนซ์มาก ซึ่งสามารถแสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้ในรูปที่ 2.23 (ข)

2.11.3 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้แก่สารกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมของธาตุหมู่ที่ 5 เช่น ฟอสฟอรัส (phosphorus) สารหนู (arsenic) และ พลวง (antimony) ลงไปใน ซิลิคอน หรือ เพชรบริสุทธิ์ จะทำให้ซิลิคอน หรือ เพชรมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ จะอยู่ใกล้กับแถบความนำ จะอยู่ใกล้มากน้อยแค่ไหนก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมอะตอมสารเจือ ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ จะแสดงได้ในรูปที่ 2.23 (ค)



รูปที่ 2.23 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

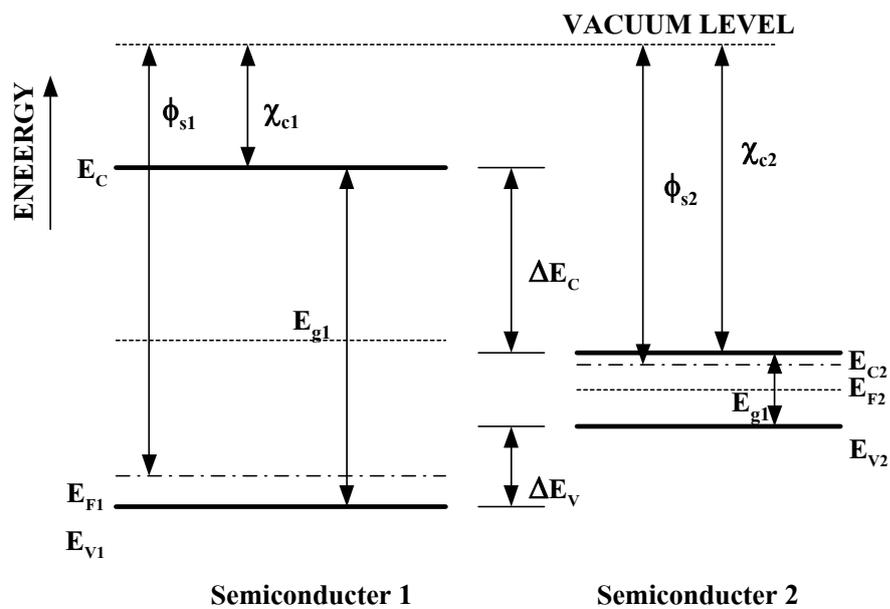
2.12 ทฤษฎีรอยต่อ[15]

จากหัวข้อที่แล้วเราพูดถึงลักษณะของสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลึกเดี่ยวๆ ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้มากนัก แต่ถ้าเรานำผลึกรูปเดี่ยวไม่ว่าจะเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี มาต่อเข้าด้วยกันด้วยวิธีทางเคมีแล้ว เราจะสามารถนำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนี้มาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายขึ้น เช่น ทำเป็นไดโอด ทรานซิสเตอร์ โฟโตไดโอด โซลาร์เซลล์ และ วงจรรวม(IC) ฯลฯ รอยต่อนี้มีได้หลายรูปแบบเช่น รอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน(Homojunction) เช่น ซิลิคอนชนิดเอ็น กับ ซิลิคอนชนิดพี และรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน(Heterojunction) เช่น ซิลิคอนกับเพชร

และรอยต่อก็มีได้อีกหลายแบบเช่น รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ รอยต่อที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะมีลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจ อีกทั้งยังเป็นพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษอื่นๆ ซึ่งมีรอยต่อมากกว่าหนึ่งรอยต่ออีกด้วย

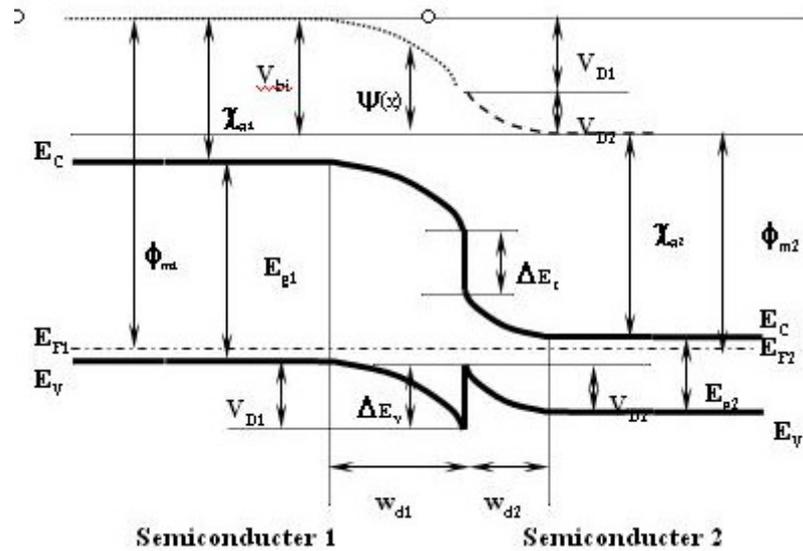
2.12.1 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารต่างชนิดกัน

รอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกัน(Heterojunction)เป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่างกัน โดยมีความเข้ากันได้ดีของค่าคงที่แลตทิซ(lattice constant) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน เช่น รอยต่อระหว่างเพชรกับซิลิกอน แต่อย่างไรก็ตามอาจจะไม่เสมอไป และอาจจะมีจุดบกพร่อง เช่น เกิดสถานะอินเตอร์เฟซที่พื้นที่ผิวของรอยต่อ สถานะนี้สามารถแสดงเป็นศูนย์กลางการแท้ป(trapping center) ซึ่งจะเป็นการจำกัดศักยภาพของอุปกรณ์ แบบจำลองแถบพลังงานของรอยต่อที่มีเนื้อสารต่างชนิดกันแบบอุดมคติโดยปราศจากสถานะอินเตอร์เฟซ ถูกเสนอโดย Anderson โดยมีพื้นฐานของ Shockley เราจะพิจารณาแบบจำลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่ยังไม่นำมาต่อกัน

จากรูปไดอะแกรมแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่มีความแตกต่างกันของแถบพลังงานต้องห้าม(E_g) ค่าฟังก์ชันงาน(ϕ) และ ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี(χ) โดยค่าฟังก์ชันงาน และค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี คือพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากระดับเฟอร์มิไปยังระดับสูญญากาศ และพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขอบล่างของแถบความนำไปยังระดับสูญญากาศ ตามลำดับ และความแตกต่างของแถบความนำและแถบวาเลนซ์ ของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเป็น ΔE_C และ ΔE_V ตามลำดับ เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาต่อเข้าด้วยกัน แถบพลังงานที่แสดงพววะสมดุจะแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันที่สภาวะสมดุล

โดยแถบพลังงานดังรูปจะใช้ในการศึกษาโครงสร้างของ p-type diamond /n-type silicon heterojunction diode โดยกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

โดยค่าของ $E_{F1,2} - E_{v1}$ จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นในการเติมอะตอมสารเจือ

สมการสำหรับความแตกต่างของแถบความนำ ΔE_c คือ

$$\Delta E_c = \chi_{e2} - \chi_{e1} \tag{2.16}$$

และความแตกต่างของแถบวาเลนซ์แสดงได้จากสมการ

$$\Delta E_v = (E_{g1} - E_{g2}) - (\chi_{e2} - \chi_{e1}) \tag{2.17}$$

จากสมการ 2.16 และ 2.17 เราจะได้ว่า

$$\Delta E_c + \Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} \tag{2.18}$$

และ barrier height สำหรับโฮล คือ $qV_D - \Delta E_v$ มีค่าเท่ากับ

$$qV_D - \Delta E_v = E_{g2} - (E_{c2} - E_F) - (E_F - E_{v1}) \tag{2.19}$$

โดยที่ $V_D = V_{D1} + V_{D2}$

V_{D1} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 1

V_{D2} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 2

และค่าของ V_{D1} และ V_{D2} สามารถหาได้จากสมการ

$$V_{D1} = \frac{\epsilon_2 N_2}{\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2} \quad (2.20)$$

$$V_{D1} = \frac{\epsilon_1 N_1}{\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2} \quad (2.21)$$

โดยที่ ϵ_1 และ ϵ_2 คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(dielectric constant) ของสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

N_1 และ N_2 คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

และค่าความกว้างของช่วงปลอดพาหะ(depletion width) ของแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำที่หาได้จากสมการ poisson มีค่าตามสมการดังนี้

$$w_{d1} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 N_2 V_D}{qN_1 (\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2)}} \quad (2.22)$$

$$w_{d2} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 N_1 V_D}{qN_2 (\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2)}} \quad (2.23)$$

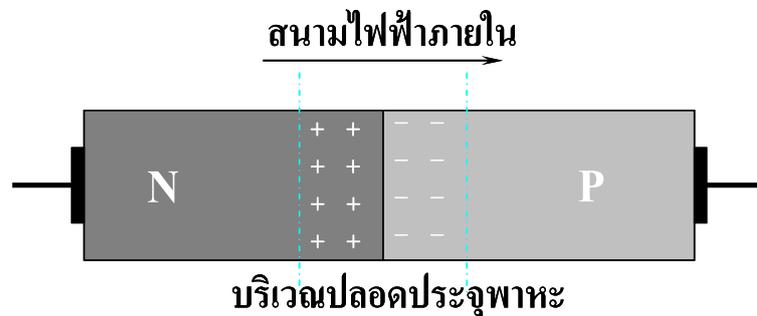
โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงานที่ 300K ได้มีผู้ทำการวิจัยไว้แล้ว แสดงได้ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงาน ที่ 300K

| Symbol | Meaning | Value (unit) |
|------------------------|---|--------------|
| $E_{g, \text{dia}}$ | Energy gap of diamond | 5.5 eV |
| $E_{g, \text{Si}}$ | Energy gap of silicon | 1.12 eV |
| $\chi_{e, \text{dia}}$ | Electron affinity of diamond | 0.5 eV |
| $\chi_{e, \text{Si}}$ | Electron affinity of silicon | 0.5 eV |
| $E_c - E_v$ | Energy difference between Fermi and valence level of Diamond | 0.22 eV |
| $E_c - E_F$ | Energy difference between Conduction and Fermi level of Diamond | 0.22 eV |
| ΔE_c | Conduction band discontinuity | 3.55 eV |
| ΔE_v | Valence band discontinuity | 0.83 eV |

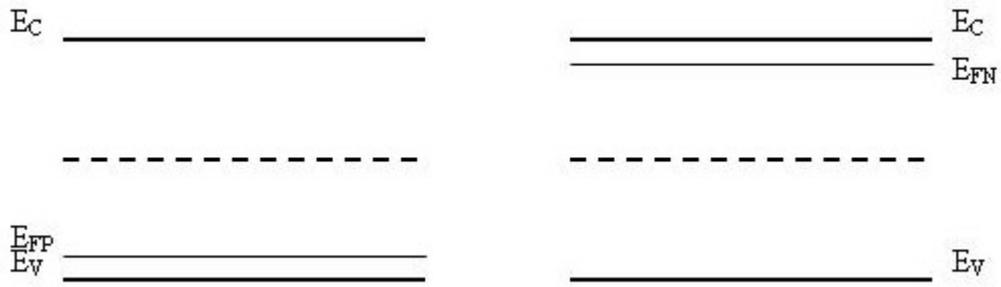
2.12.2 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารชนิดเดียวกัน

รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารชนิดเดียวกัน เช่น ซิลิคอนชนิดพีกับซิลิคอนชนิดเอ็น เมื่อนำซิลิคอนสองชนิดนี้มาต่อเข้าด้วยกันด้วยขบวนการทางเคมี เช่นการแพร่ด้วยความร้อน (Thermal diffusion) และเนื่องจากสารกึ่งตัวนำสองชนิดนี้มีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของประจุพาหะ จึงเกิดการถ่ายเทประจุพาหะขึ้น โดยด้านที่มีความเข้มข้นของประจุพาหะมากจะถ่ายเทไปยังด้านที่มีความเข้มข้นน้อย กล่าวคือ อิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะไหลไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี และโฮลจากทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะไหลไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การแพร่ข้ามรอยต่อนี้ จะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้รอยต่อเป็นอันดับแรก โดยจะเกิดประจุไฟฟ้าลบทางด้านพี เนื่องจากทางด้านพีสูญเสียโฮลไปยังทางด้านเอ็น และประจุไฟฟ้าบวกจะไปปรากฏอยู่ทางด้านเอ็น เนื่องจากอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นไหลไปยังด้านพี ประจุไฟฟ้านี้เองเป็นตัวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 โดยที่สนามไฟฟ้าจะเป็นตัวต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากทางด้านพี และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น ไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ แต่อย่างไรก็ตาม การแพร่นี้จะดำเนินต่อไปจนกว่า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะพอดีที่จะทำให้โฮลและอิเล็กตรอนหยุดแพร่ข้ามรอยต่อนี้ได้ ดังนั้นในสภาวะนี้จะไม่มีการแพร่พาหะใดๆข้ามรอยต่อนี้เราเรียกว่า “ภาวะสมดุลความร้อน” และเนื่องจากมีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อนี้เองจะเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นเราเรียกว่า “ศักย์สัมผัส”(V_0 contact potential) หรือ “แรงดันภายใน”(V_{bi} built in voltage)



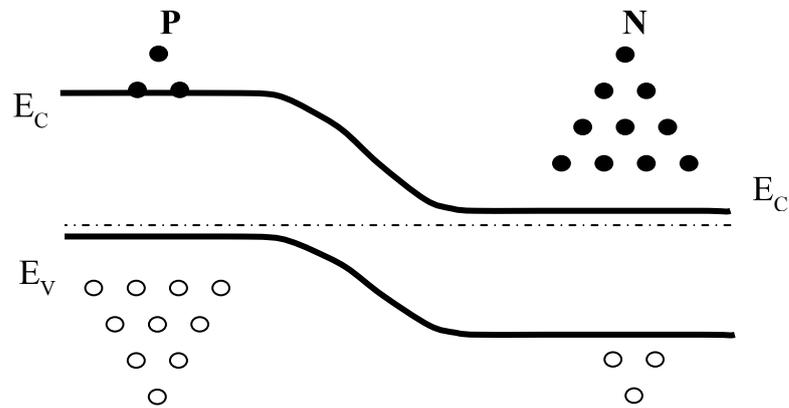
รูปที่ 2.26 ลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

ในการเขียนแถบพลังงาน(Energy band diagram) ของรอยต่อพีเอ็น ในขณะที่ยังไม่สมดุลนั้น เราต้องพิจารณาถึงระดับเฟอร์มิเป็นหลัก โดยในขณะที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นยังไม่สัมผัสกันนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.27



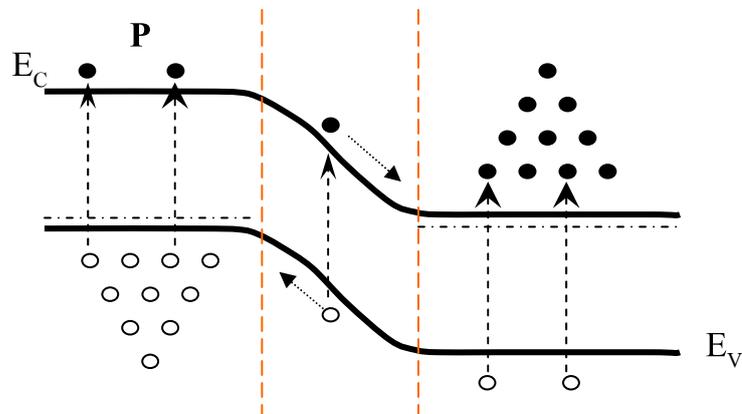
รูปที่ 2.27 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ ชนิดเอ็น ที่ยังไม่ได้สัมผัสกัน

แต่เมื่อเรานำสารกึ่งตัวนำสองชนิดนี้มาสัมผัสกันนั้น เมื่ออยู่ในสถานะสมดุลระดับเฟอร์มิจะต้องต่อเนื่องเป็นเส้นตรงเดียวกัน ผ่านตลอดรอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

และเมื่อทำการไบแอสให้กับรอยต่อพี-เอ็น ลักษณะแถบพลังงานจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะที่ได้รับการไบแอสย้อนกลับ

รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะที่ได้รับกร ไปอัสซ็อนกลับโดยเมื่อมีแสงมาตกกระทบ โฟโตไดโอด และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่า มากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดย พลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนให้กระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบความนำ และที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่โดยคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นสามารถเกิดได้ทั้งในชั้นพี ที่ชั้น ปลอดภัย และที่ชั้นเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบความนำในชั้นพีจะแพร่กระจายไปในชั้น เอ็น และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบความนำในชั้นปลอดภัยจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในพัฒนาให้วิ่ง สู่ชั้นเอ็น ส่วนในกรณีของโฮลก็จะไหลในทิศทางที่ตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ จะไหลจาก แถบวาเลนซ์ในชั้นเอ็น หรือชั้นปลอดภัยไปสู่ชั้นพี จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้ จะ แปรผันกับจำนวนโฟตอนของแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนที่สะสมในชั้นเอ็น จะทำให้ ชั้นเอ็นมีประจุเป็นลบและโฮลที่สะสมในชั้นพี จะทำให้ชั้นพีมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก หลังจากนั้นถ้า เราต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอก อิเล็กตรอนก็จะไหลจาชั้นเอ็น และโฮลจะไหลจากชั้นพีไปสู่ วงจรภายนอก ส่วนคู่อิเล็กตรอน โฮล ที่เกิดขึ้นที่บริเวณชั้นพีและชั้นเอ็นซึ่งอยู่ห่างจาก บริเวณ รอยต่อ(depletion region) นั้นจะเกิดการรวมตัวก่อนที่จะเดินทางไปถึง บริเวณรอยต่อ(depletion region) เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าเป็นตัวเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่