

## บทที่ 2

### ทฤษฎีของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด

ในบทนี้จะพิจารณาถึงทฤษฎีของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด อันได้แก่ หลักการทำงานของโฟโตไดโอด คุณสมบัติที่สำคัญในด้านต่างๆ เช่น ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum efficiency) ค่าการตอบสนอง (Responsivity) และความเร็วในการตอบสนอง (Response speed) ทฤษฎีของสารประกอบกึ่งตัวนำ และทฤษฎีหัวต่อต่างชนิดรวมทั้งปรากฏการณ์หน้าต่างแสง (Window effect)

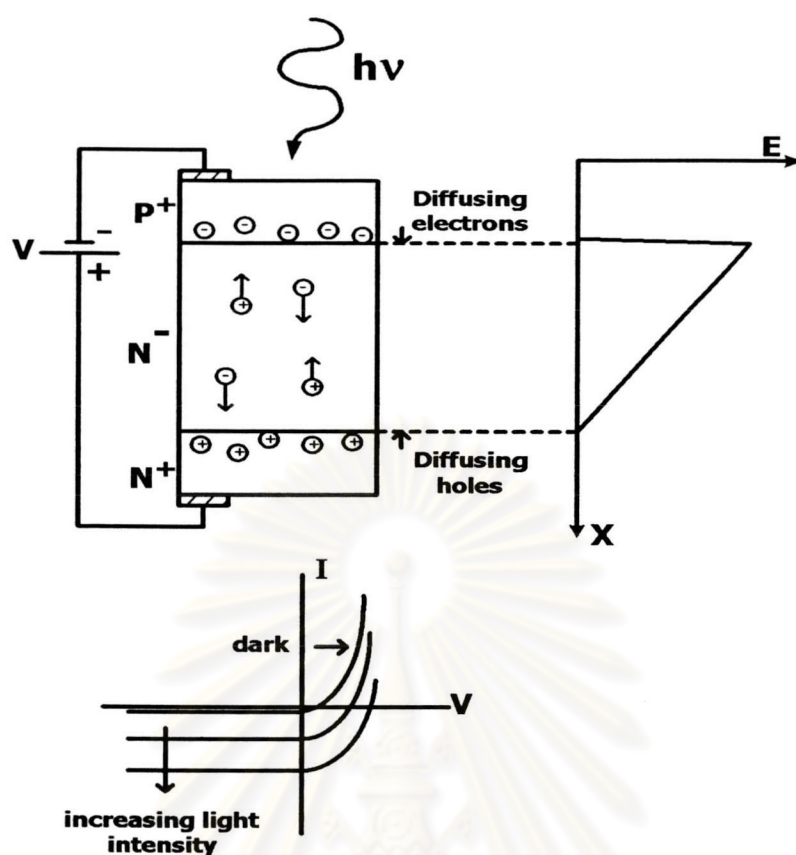
#### 2.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพีเอ็นโดยทั่วไปจะทำงานภายใต้สภาวะไบแอสกลับทาง กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในรอยต่อจะไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้ไบแอส แต่จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มแสงที่ตกกระทบ เนื่องจากความเข้มแสงที่ตกกระทบนั้นส่งผลต่ออัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของโฟโตไดโอด

รูปที่ 2.1 เป็นโฟโตไดโอดชนิด Pin หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Depletion layer photodiode ซึ่งมีความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (Depletion layer) ค่อนข้างมาก ทำให้สามารถดูดกลืนโฟตอนได้มาก เมื่อโฟตอนถูกดูดกลืนก็จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในย่านปลอดพาหะเป็นหลัก คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แยกจากกันด้วยสนามไฟฟ้าในย่านดังกล่าว โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น โฮลจะเคลื่อนที่ไปยังด้านพี ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลนี้ก็จะทำให้เกิดกระแสแสงป้อนให้กับวงจรภายนอกต่อไป

นอกจากนี้ยังมีคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง เกิดขึ้นภายในชั้นพีและเอ็นอีกด้วย แต่เฉพาะพาหะที่เกิดภายในระยะแพร่ซึม (Diffusion length) นับจากรอยต่อเท่านั้นที่สามารถแพร่ซึมเข้าไปยังขอบของชั้นปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะพัดพาออกไปกลายเป็นส่วนหนึ่งของกระแสแสง ส่วนพาหะที่เกิดขึ้นในชั้นพีและเอ็นนอกเหนือจากที่อยู่ในระยะแพร่ซึมจะรวมตัวกลับก่อนที่จะเดินทางไปถึงชั้นปลอดพาหะ จึงไม่ถือเป็นส่วนหนึ่งของกระแสแสง

ดังนั้นกระแสสุทธิ (Total current) ของโฟโตไดโอดที่จะป้อนสู่วงจรภายนอกจึงประกอบไปด้วยพาหะอันเกิดจากการกระตุ้นทางแสงภายในชั้นปลอดพาหะ และการกระตุ้นทางแสงบริเวณภายในระยะแพร่ซึม นับจากขอบของชั้นปลอดพาหะ รวมกับพาหะที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermally generated carrier)



รูปที่ 2.1 (ก) โฟโตไดโอด แสดงย่านที่เกิดกระแสพัชพาและกระแสแพร่ซึม

(ข) คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ภายใต้สภาวะมืดและสภาวะถูกกระตุ้นด้วยแสง

เนื่องจากกระแสสุทธิในโฟโตไดโอดประกอบไปด้วยกระแสที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง และกระแสมืดอันเกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อน จากนิยามนี้จึงเขียนสมการแสดงกระแสสุทธิได้ว่า

$$I = I_0 [ \exp(qv / nkT) - 1 ] - I_p \quad (2.1)$$

โดยที่  $I_0$  คือ กระแสมืดหรือกระแสอิ่มตัว (Dark current or Saturation current) ของ ไดโอด ภายใต้สภาวะไม่มีการไบแอส

$V$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด

$n$  คือ Ideality factor ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1 และ 2

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลท์ซมานน์

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K)

$I_p$  คือ กระแสที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง

เมื่อโฟโตไดโอดทำงานภายใต้สภาวะไบแอสกลับทางด้วยแรงดันที่มีค่ามากพอที่จะทำให้  $\exp(qv/nkt) \ll 1$  จะทำให้ประมาณค่ากระแสสุทธิของโฟโตไดโอดได้เป็น

$$I = -(I_0 + I_p) \quad (2.2)$$

ซึ่งจะเห็นว่ากระแสสุทธิของโฟโตไดโอดภายใต้สภาวะไบแอสกลับทางนั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มแสงที่ตกกระทบ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ทำให้สามารถใช้ โฟโตไดโอดในการตรวจจับสัญญาณแสง โดยเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าพาหะที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงจะเคลื่อนที่โดยอาศัยการพัดพาและการแพร่ซึม ดังนั้นภายใต้สภาวะ Steady state condition ความหนาแน่นของกระแสสุทธิ ( $J$ ) ในสภาวะไบแอสกลับทางจะประกอบไปด้วยความหนาแน่นกระแสส่วนพัดพารวมกับความหนาแน่นกระแสส่วนแพร่ซึม แสดงได้โดย

$$J = J_{dr} + J_{diff} \quad (2.3)$$

โดยที่  $J_{dr}$  คือ ความหนาแน่นกระแสพัดพา

$J_{diff}$  คือ ความหนาแน่นกระแสแพร่ซึม

ในการคำนวณกระแสพัดพา ( $J_{dr}$ ) เราจะละเลยผลของการเกิดพาหะจากความร้อนภายในย่านปลอดพาหะ และให้ประสิทธิภาพควอนตัมภายในเท่ากับ 1 ดังนั้นอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (The electron-hole pair generation rate) ในชั้นปลอดพาหะหนา  $x$  จะเท่ากับ

$$G(x) = \Phi \alpha e^{-\alpha x} = \frac{P_0}{Ah\nu} \alpha e^{-\alpha x} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\Phi$  คือ โฟตอนฟลักซ์ที่ตกกระทบถึงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (photon/sec/cm<sup>2</sup>)

$P_0$  คือ กำลังงานแสงที่ตกกระทบถึงรอยต่อ (watt)

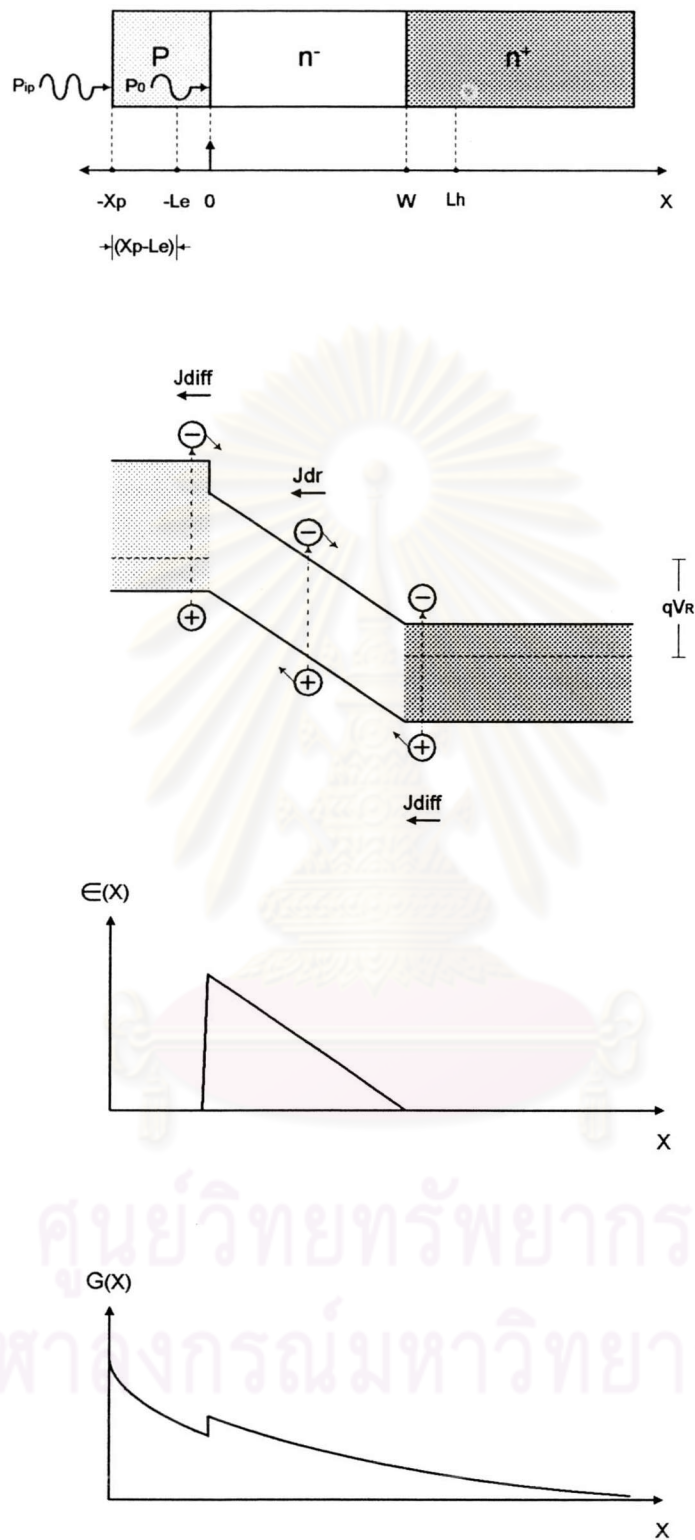
$h$  คือ ค่าคงตัวของแพลงค์

$\nu$  คือ ความถี่แสง (Hz)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของโฟโตไดโอด (cm<sup>2</sup>)

$x$  คือ ระยะทางนับจากรอยต่อระหว่างชั้นรับแสงและชั้นทำงาน (cm)

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (cm<sup>-1</sup>)



รูปที่ 2.2 การดูดกลืนพลังงานแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล  
ใน PIN โฟโตไดโอดภายใต้สภาวะไบแอสกลับทาง

จากรูปที่ 2.2 เมื่อแสงตกกระทบบนชั้นรับแสงของโฟโตไดโอด ก็จะเกิดการดูดกลืนกำลังงานแสงส่วนหนึ่งในชั้นรับแสง ซึ่งกำลังงานแสงที่เหลือจากการดูดกลืนและตกกระทบรอยต่อระหว่างชั้นรับแสงและชั้นทำงาน แสดงได้โดย

$$P_0 = P_{ip} e^{-\alpha_p x_p} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $P_0$  คือ กำลังงานแสงที่ตกกระทบบนรอยต่อระหว่างชั้นรับแสงและชั้นทำงาน (watt)

$P_{ip}$  คือ กำลังงานแสงที่ตกกระทบบนชั้นรับแสง (watt)

$\alpha_p$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง ( $\text{cm}^{-1}$ )

$x_p$  คือ ความกว้างของชั้นรับแสง (cm)

กระแสไฟฟ้าในย่านปลอดพาหะ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} J_{dr} &= -q \int_0^w G(x) dx \\ &= -q \Phi_0 (1 - e^{-\alpha w}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\Phi_0$  คือ โฟตอนฟลักซ์ที่ตกกระทบบนรอยต่อระหว่างชั้นรับแสงและชั้นทำงาน (photon/sec/cm<sup>2</sup>)

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้นทำงาน ( $\text{cm}^{-1}$ )

$W$  คือ ความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (cm)

สำหรับกระแสแพร่ซึม เราจะพิจารณาทั้งกระแสแพร่ซึมที่เกิดจากแผ่นฐาน ( $n^+$ -Substrate) ภายในระยะแพร่ซึมของโฮลนับจากรอยต่อระหว่างชั้นทำงานและแผ่นฐาน และกระแสแพร่ซึมที่เกิดจากชั้นรับแสงภายในระยะแพร่ซึมของอิเล็กตรอนนับจากรอยต่อระหว่างชั้นรับแสงและชั้นทำงาน

กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐาน เกิดจากการแพร่ซึมของพาหะข้างน้อยซึ่งคือโฮล ที่เกิดในแผ่นฐาน ภายในระยะแพร่ซึมนับจากรอยต่อระหว่างชั้นทำงานและแผ่นฐาน เมื่อโฮลดังกล่าวแพร่ซึมมาจนถึงชั้นทำงาน ก็จะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นทำงานพัดพาออกไปกลายเป็นส่วนหนึ่งของ

กระแสไฟฟ้าสุทธิ กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐาน ( $n^+$ -Substrate) สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์สมการความต่อเนื่อง (The continuity equation) สำหรับโฮลในแผ่นฐานที่สภาวะอยู่ตัว (Steady state)

$$D_h \frac{\partial^2 p_N}{\partial x^2} - \frac{p_N - p_{NO}}{\tau_h} + G(x) = 0 \quad (2.7)$$

เมื่อ  $D_h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล  
 $\tau_h$  คือ ค่าเวลาชีวิตของพาหะของโฮล  
 $p_{NO}$  คือ Equilibrium hole density

สามารถแก้สมการได้โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) คือ

$$p_N = p_{NO} \quad \text{ที่} \quad x = \infty$$

$$p_N = 0 \quad \text{ที่} \quad x = W$$

จะได้ว่า

$$p_N = p_{NO} - (p_{NO} + Ce^{-\alpha w}) e^{(w-x)/L_h} + Ce^{-\alpha x} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $L_h$  คือ ระยะแพร่ซึม (Diffusion length) ของโฮล

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (2.9)$$

$$C = \frac{\Phi_0 \alpha L_h^2}{D_h (1 - \alpha^2 L_h^2)} \quad (2.10)$$

กระแสแพร่ซึมจากแผ่นฐาน คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} J_{diff\_sub} &= -qD_h \left( \frac{\partial p_N}{\partial x} \right)_{x=w} \\ &= -q\Phi_0 \left( \frac{\alpha L_h}{1 + \alpha L_h} \right) e^{-\alpha w} - qP_{NO} \frac{D_h}{L_h} \end{aligned} \quad (2.11)$$

กระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสง เกิดจากการแพร่ซึมของพาหะข้างน้อยซึ่งคืออิเล็กตรอน ที่เกิดในชั้นรับแสง ( $P^+$ ) ภายในระยะแพร่ซึมนับจากรอยต่อระหว่างชั้นรับแสงและชั้นทำงาน เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้แพร่ซึมมายังชั้นทำงาน ก็จะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นทำงานพัดพาออกไปกลายเป็นส่วนหนึ่งของกระแสไฟฟ้าสุทธิ เราสามารถคำนวณกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้จากสมการความต่อเนื่องสำหรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสงที่สภาวะ Steady state

$$D_e \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_e} + G(x) = 0 \quad (2.12)$$

สามารถแก้สมการได้โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) คือ

$$n_p = n_{p0} \quad \text{ที่} \quad x = -\infty$$

$$n_p = 0 \quad \text{ที่} \quad x = 0$$

จากรูปที่ 2.2 ให้  $w' = -L_e - (-X_p) = X_p - L_e$  (2.13)

จะได้ว่า

$$n_p = n_{p0} - (n_{p0} + C' e^{-\alpha_p w'}) e^{(w'-x)/L_e} + ce^{-\alpha_p x} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$L_e = \sqrt{D_e \tau_e} \quad (2.15)$$

$$C' = \frac{\Phi_{ip} \alpha_p L_e^2}{D_e (1 - \alpha_p^2 L_e^2)} \quad (2.16)$$

กระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสง ( $P^+$ ) คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} J_{diff\_P} &= -qD_e \left( \frac{\partial n_p}{\partial x} \right)_{x=-L_n - (-X_p)} \\ &= -qD_e \left( \frac{\partial n_p}{\partial x} \right)_{x=w'} \\ &= -q\Phi_{ip} \left( \frac{\alpha_p L_e}{1 + \alpha_p L_e} \right) e^{-\alpha_p w'} - qn_{PO} \frac{D_e}{L_e} \end{aligned} \quad (2.17)$$

จากผลรวมของสมการที่ (2.6), (2.11) และ (2.17) จะทำให้ได้กระแสสุทธิเป็น

$$\begin{aligned} J &= -q\Phi_o \left( 1 - \frac{e^{-\alpha w}}{1 + \alpha L_h} \right) - q\Phi_{ip} \left( \frac{\alpha_p L_e}{1 + \alpha_p L_e} \right) e^{-\alpha_p w'} \\ &\quad - qp_{NO} \frac{D_h}{L_h} - qn_{PO} \frac{D_e}{L_e} \end{aligned} \quad (2.18)$$

โดยที่ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ เทอม  $-qp_{NO} \frac{D_h}{L_h}$  และเทอม  $-qn_{PO} \frac{D_e}{L_e}$  ในสมการที่ (2.18) จะมีค่าน้อยมาก เนื่องจาก  $p_{NO}$  และ  $n_{PO}$  มีค่าน้อยมาก



## 2.2 ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม ค่าการตอบสนอง และความเร็วในการตอบสนอง

### (Quantum efficiency, Responsivity and Response speed)

ในการนำโฟโตไดโอดไปใช้งาน คุณสมบัติสำคัญ 3 ประการของโฟโตไดโอดที่ต้องพิจารณาคือ ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม ค่าการตอบสนอง และความเร็วในการตอบสนอง

#### 2.2.1 ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมและค่าการตอบสนอง

ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม ( $\eta$ ) นิยามเป็นจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นต่อโฟตอนที่เข้ามาตกกระทบ ในกรณีที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงมีคุณภาพดี ชั้นปกคลุมพาหะควรมีความกว้างอย่างพอเหมาะ เพื่อให้ดูดกลืนแสงไว้ได้มาก นอกจากนี้การใช้โครงสร้างหัวต่อต่างชนิดก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงควอนตัมด้วย เนื่องจากวัสดุที่มีค่าช่องว่างพลังงานกว้าง ซึ่งถูกใช้เป็นชั้นหน้าต่าง จะส่งผ่านโฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าค่าช่องว่างพลังงานของชั้นหน้าต่างนั้นให้เข้ามาและถูกดูดกลืนในชั้นทำงานโดยไม่เกิดการลดทอน ส่วนค่าที่บ่งบอกถึงคุณภาพของโฟโตไดโอดอีกอย่างหนึ่งคือ ค่าการตอบสนอง (Responsivity,  $R$ ) นิยามเป็นสัดส่วนระหว่างกระแสแสง (Photocurrent,  $I_p$ ) ต่อพลังงานแสงที่เข้ามาตกกระทบ (Optical power,  $P_{opt}$ )

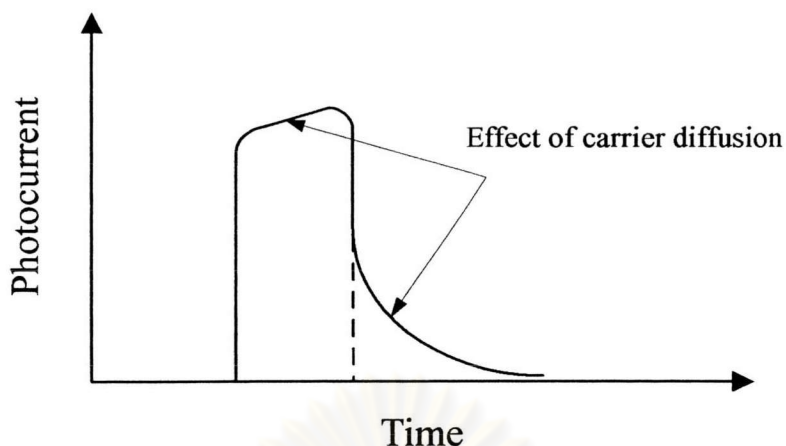
$$R = \frac{I_p}{P_{opt}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda_{(\mu m)}}{1.24} \quad (A/W) \quad (2.19)$$

#### 2.2.2 ความเร็วในการตอบสนอง

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเร็วในการตอบสนอง (Response speed) ของโฟโตไดโอด ได้แก่

- (1) การแพร่ซึมของพาหะที่เกิดภายในระยะแพร่ซึมนับจากขอบของย่านทำงาน
- (2) เวลาการพัดพาหะข้ามหัวต่อ
- (3) ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) บริเวณหัวต่อ

พาหะที่เกิดภายในระยะแพร่ซึมนับจากหัวต่อจะสามารถแพร่ซึมไปยังหัวต่อได้ และจะถูกสนามไฟฟ้าภายในชั้นทำงานพัดพา ทำให้เป็นส่วนหนึ่งของสัญญาณเอาต์พุตดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว เนื่องจากการแพร่ซึมของพาหะเป็นกระบวนการที่ช้ามากเมื่อเทียบกับการพัดพาหะ ส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) ยกตัวอย่างเช่นสำหรับโฟโตไดโอดความเร็วสูง เวลาที่ใช้ในการพัดพาหะข้ามหัวต่ออยู่ที่ประมาณ 1ps ในขณะที่การแพร่ซึมของพาหะมายังหัวต่อใช้เวลาประมาณ 1-10 ns โดยผลที่เห็นชัดเจนได้แก่ การเกิด Long tail ใน impulse response ของโฟโตไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [4]



รูปที่ 2.3 แสดงผลของกระแสแพร่ซึ่งมีต่อ Impulse response ของโฟโตไดโอด [1]

เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากผลของกระแสแพร่ซึ่งมีต่อ จึงควรเลือกใช้โครงสร้างโฟโตไดโอดแบบหัวต่อต่างชนิดเพื่อให้มีปรากฏการณ์หน้าต่างแสง (Window effect) อันจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.4 นอกจากนี้ยังสามารถอาศัยการออกแบบโครงสร้างให้กับโฟโตไดโอด เพื่อช่วยลดกระแสแพร่ซึ่งมีทั้งจากแผ่นฐานและจากชั้นรับแสง ดังเช่นที่ได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์นี้

ถ้าหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของโฟโตไดโอด ย่านปลอดพาหะก็ควรจะทำกว้างเพื่อให้ผู้เคลื่อน โฟตอนที่จะเข้ามาตกกระทบไว้ได้มาก แต่ย่านปลอดพาหะนี้ก็ไม่ควรจะมี ความกว้างมากเกินไปเนื่องจากผลของค่า Transit time ของพาหะจะจำกัดความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอด ในทางตรงกันข้ามหากย่านปลอดพาหะบางจนเกินไปก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณหัวต่อ (Junction capacitance) มีค่ามาก ดังสมการ

$$C = \frac{\epsilon A}{W} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด

$W$  คือ ความกว้างของย่านปลอดพาหะ

$\epsilon$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

ซึ่งการที่ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณหัวต่อมากจะทำให้ค่า  $R_L C$  time constant มีค่ามาก ส่งผลให้ ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดลดลง

ดังที่กล่าวมาทั้งหมด เพื่อที่จะให้ได้ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดสูงๆ นอกจากจะต้องออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดเพื่อกำจัดกระแสแพร่แล้ว

การทำย่านปลอดพาหะให้บางก็จะช่วยลด Transit time ของพาหะได้ แต่การทำเช่นนั้นก็จะเป็นการลดประสิทธิภาพเชิงควอนตัม ลดค่าการตอบสนองของโฟโตไดโอด และเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าบริเวณหัวต่อด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดต่อการออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอด เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

### 2.3 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำ (Compound semiconductor)

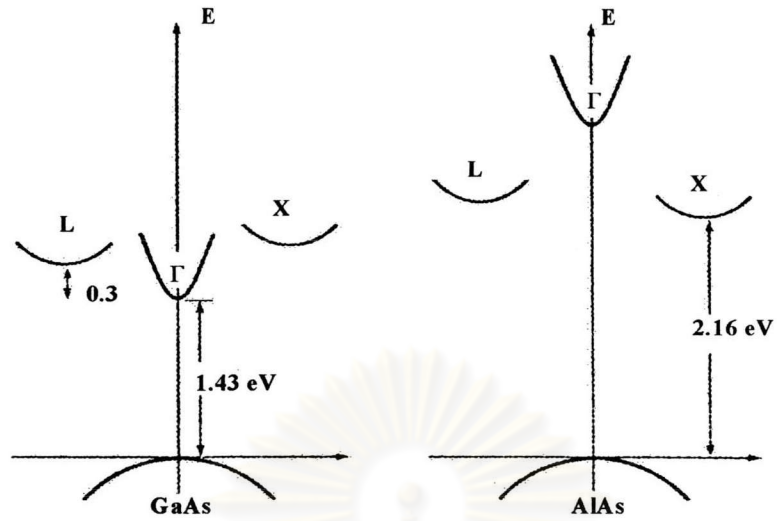
สารกึ่งตัวนำอาจเป็นธาตุหรือสารประกอบก็ได้ โดยสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุจะประกอบไปด้วยอะตอมชนิดเดียว เช่น Si และ Ge ในขณะที่สารประกอบกึ่งตัวนำ (Compound semiconductor) จะประกอบไปด้วยธาตุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ยกตัวอย่างสาร Binary compounds ได้แก่ GaAs และ InP หากนำสาร Binary compounds มาทำการอัลลอย (Alloy) ก็จะทำให้เกิดเป็นสาร Ternary compounds ได้แก่ GaAlAs และ GaAsP หรือสาร Quaternary compounds ได้แก่ InGaAsP

สารอัลลอยเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้เมื่อเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของการอัลลอย (Alloy composition) ยกตัวอย่างเช่น สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแถบพลังงาน คุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้า เป็นต้น

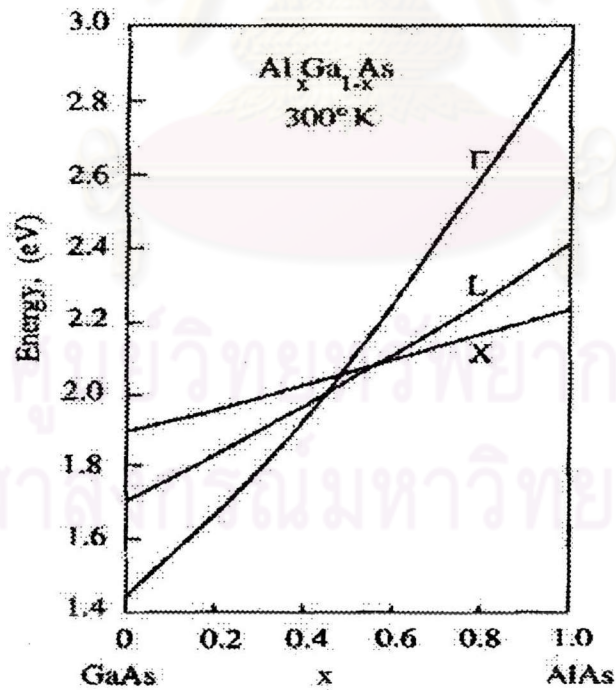
#### 2.3.1 ค่าช่องว่างพลังงาน (Energy bandgap)

โครงสร้างแถบพลังงาน (Bandstructure) จะบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ สำหรับสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุชนิดเดียว และสารกึ่งตัวนำประเภท Binary compounds จะมีโครงสร้างแถบพลังงานที่เฉพาะเจาะจง แต่เราก็สามารถทำการปรับโครงสร้างแถบพลังงานของสารเหล่านี้ได้ด้วยการอัลลอย และเมื่อองค์ประกอบของการอัลลอยเปลี่ยนไปโครงสร้างแถบพลังงานก็จะเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโครงสร้างแถบพลังงานของสารอัลลอยสามารถแสดงเป็นฟังก์ชันกับสัดส่วนขององค์ประกอบในสารอัลลอยได้

ยกตัวอย่างเช่น พิจารณาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแถบพลังงานของ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ซึ่งเป็นสารอัลลอยชนิด Ternary compound ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูง เนื่องจาก  $Ga_{1-x}Al_xAs$  เกิดจากสาร Binary compounds สองชนิดคือ GaAs และ AlAs โครงสร้างแถบพลังงานของ GaAs และ AlAs แสดงดังรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าสารประกอบทั้งสองชนิดมีสาม Conduction band minima คือ Direct  $\Gamma$  minima, Indirect X minima และ Indirect L minima GaAs เป็นสารที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct bandgap) เนื่องจาก Direct  $\Gamma$  minima เป็นจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (The lowest energy minima) ในขณะที่ AlAs เป็นสารที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect bandgap) เนื่องจาก Indirect X minima เป็นจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 (E,k) ไดอะแกรม แสดง Energy minima ในแถบนำ สำหรับ GaAs และ AlAs



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลง Energy minima เทียบกับสัดส่วนของอลูมิเนียม (x) ใน  $Ga_{1-x}Al_xAs$

รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Energy minima ทั้งสาม เทียบกับสัดส่วนของ อลูมิเนียม (x) ใน  $Ga_{1-x}Al_xAs$  และจากรูปจะเห็นว่าบริเวณที่ x มีค่าประมาณ 0.45  $GaAlAs$  จะเปลี่ยน จากสารที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรงเป็นสารที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง โดยค่าช่องว่าง พลังงานสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันกับสัดส่วนของอลูมิเนียม (x) ได้ดังนี้ [4]

$$\begin{aligned}
 E_g^F &= 1.425 + 1.247x && \text{Direct - bandgap condition } x \leq 0.45 \\
 &= 1.425 + 1.247x + 1.147(x - 0.045)^2 && \text{Indirect - bandgap condition } x > 0.45 \\
 E_g^X &= 1.9 + 1.125x + 0.143x^2 \\
 E_g^L &= 1.708 + 0.642x && (2.21)
 \end{aligned}$$

### 2.3.2 ค่าคงตัวของโครงผลึก (Lattice constant, a)

ค่าคงตัวของโครงผลึกก็เป็นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารอัลลอยที่สามารถปรับได้ด้วยการเปลี่ยนองค์ประกอบของการอัลลอย รูปที่ 2.6 แสดงค่าช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่ำของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เทียบกับค่าคงตัวของโครงผลึก โดยแถบสีเทาในแนวดิ่งแสดงกลุ่มของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าคงตัวของโครงผลึกใกล้เคียงกัน ซึ่งเราสามารถนำสารกึ่งตัวนำที่มีค่าคงตัวของโครงผลึกใกล้เคียงกันแต่มีค่าช่องว่างพลังงานไม่เท่ากันเหล่านี้มาสร้างหัวต่อต่างชนิด (Heterojunction) และหัวต่อต่างชนิดที่สร้างจากคู่ของสารกึ่งตัวนำต่างกันก็จะมีค่า Band offset แตกต่างกันด้วย

ยกตัวอย่างเช่น ค่าคงตัวของโครงผลึก (a) ของ  $Ga_{1-x}Al_xAs$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับสัดส่วนของ อลูมิเนียม (x) แสดงได้เป็น [5]

$$a = 5.6533 + 0.0078x \quad (2.22)$$

### 2.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient, $\alpha$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบและชนิดของสาร สำหรับ  $GaAs$  ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคำนวณได้จาก [6]

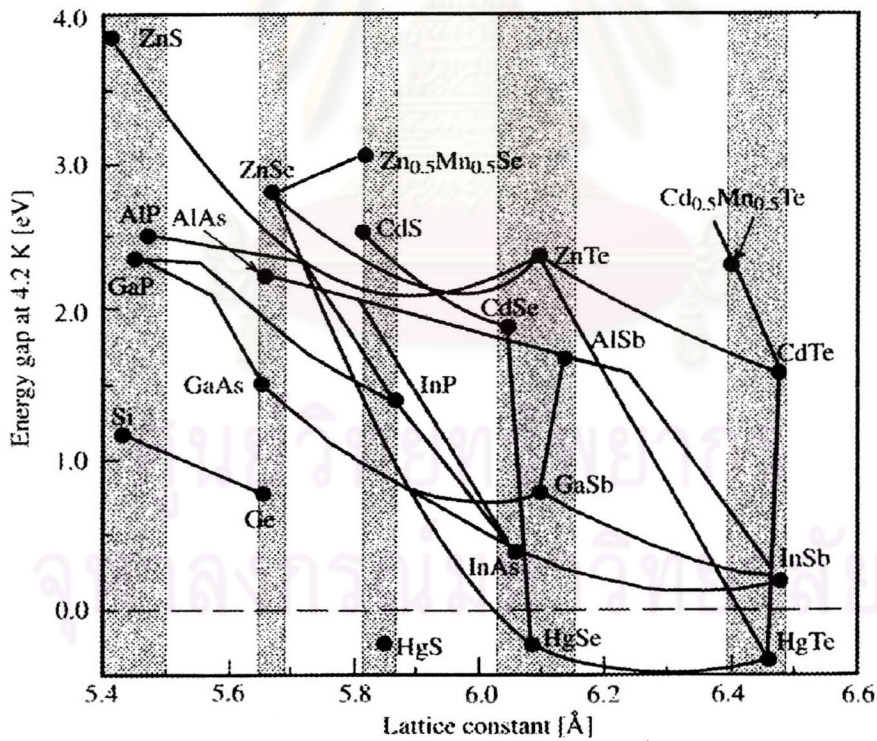
$$\alpha = \begin{cases} 5.8 * 10^4 \sqrt{(E_p - E_g)} & \text{---- } (E_a \leq E_p) \\ \exp[100(E_p - E_g) + 7.82] & \text{---- } (E_b \leq E_p \leq E_a) \\ 0.13(E_g - E_p - 4.25 * 10^{-2}) & \text{---- } (E_p \leq E_b) \end{cases} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $E_p$  คือ พลังงานโฟตอนที่ตกกระทบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{h\nu}{q}$  (eV)

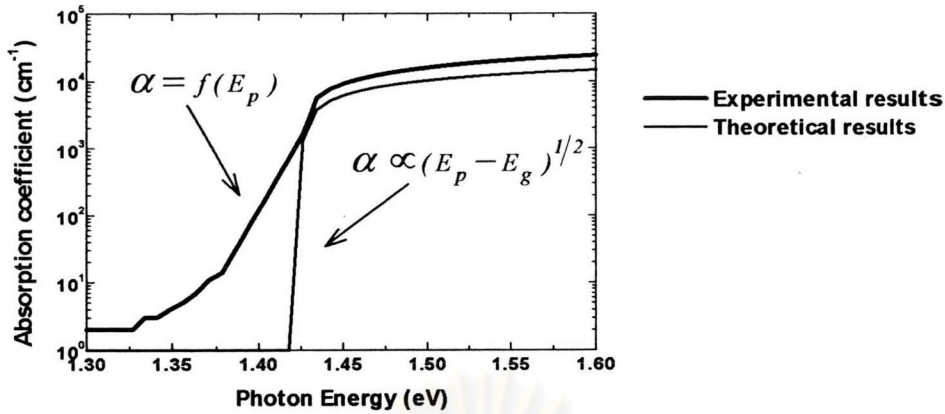
$E_g$  คือ ค่าช่องว่างพลังงาน (eV)

$E_a$  ให้มีค่าเท่ากับ  $E_g + 0.005$  (eV)

$E_b$  ให้มีค่าเท่ากับ  $E_g - 0.0526$  (eV)



รูปที่ 2.6 ค่าช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิห้องของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เทียบกับค่าคงดั่งแลตทิซ

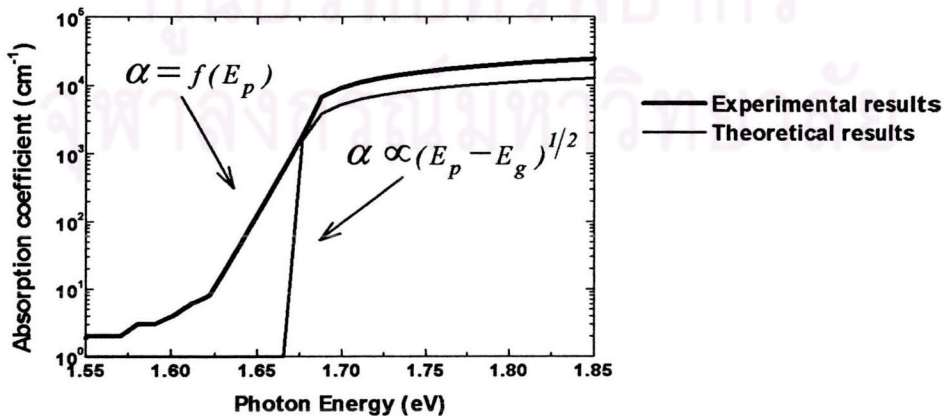


รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและขอบของการดูดกลืนของ GaAs ที่อุณหภูมิห้อง

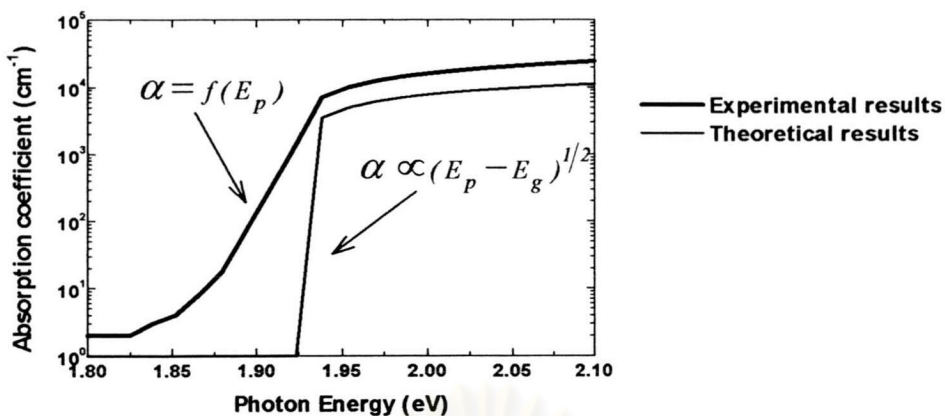
จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณขอบของการดูดกลืน (Absorption edge) ซึ่งคือเส้นกราฟทางทฤษฎีในส่วนที่ดั่งขึ้น

ค่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดสารอิลลอยจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของการอิลลอย ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงก็จะขึ้นกับองค์ประกอบของการอิลลอยด้วย ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและขอบของการดูดกลืนของ  $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$  และ  $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$  ตามลำดับ และรูปที่ 2.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเปรียบเทียบกันระหว่าง GaAs,  $Ga_{0.9}Al_{0.1}As$ ,  $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ ,  $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$  และ  $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$  ตามลำดับ

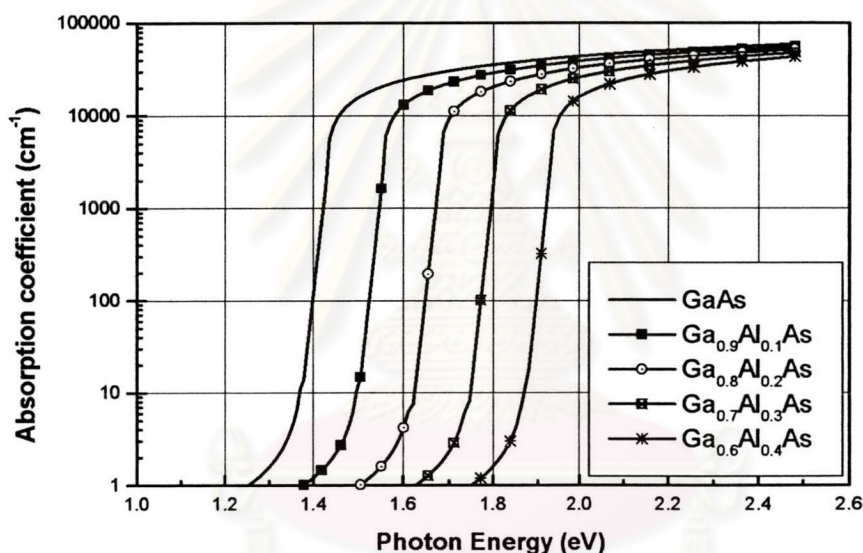
เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเป็นฟังก์ชันกับค่าพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบ ดังนั้นสำหรับโฟโตไดโอดที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งๆจะมีผลตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นที่จำกัด เพราะฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญอันหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและขอบของการดูดกลืนของ  $Ga_{0.8}Al_{0.2}As$  ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและขอบของการดูดกลืนของ Ga<sub>0.6</sub>Al<sub>0.4</sub>As ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิห้อง

ของ GaAs, Ga<sub>0.9</sub>Al<sub>0.1</sub>As, Ga<sub>0.8</sub>Al<sub>0.2</sub>As, Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As และ Ga<sub>0.6</sub>Al<sub>0.4</sub>As ตามลำดับ

## 2.4 หัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs และปรากฏการณ์หน้าต่างแสง

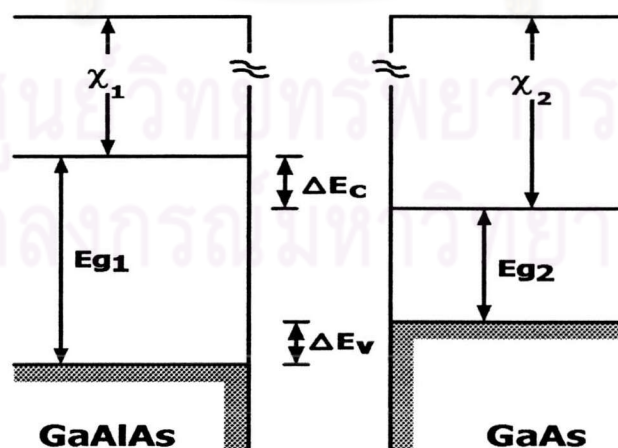
หัวต่อต่างชนิด (Heterojunction) คือหัวต่อที่สร้างจากคู่ของสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่แตกต่างกัน ถ้าสารกึ่งตัวนำสองชนิดนั้นเดิมสารเจือชนิดเดียวกันก็จะเรียกหัวต่อนั้นว่า Isotype heterojunction แต่ถ้าสารกึ่งตัวนำสองชนิดนั้นเดิมสารเจือต่างชนิดกันก็จะเรียกหัวต่อนั้นว่า Anisotype heterojunction ทฤษฎีเกี่ยวกับหัวต่อต่างชนิดเป็นที่ศึกษากันอย่างแพร่หลายและนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์หลายชนิด เช่น ตัวตรวจจับสัญญาณแสง เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ และ เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น



คู่ของสารกึ่งตัวนำที่เลือกมาสร้างหัวต่อต่างชนิดจะต้องมีค่าคงตัวแลตทิซและสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของการขยายตัว (Thermal coefficient of expansion) ที่ใกล้เคียงกัน หัวต่อต่างชนิดที่สร้างจาก GaAlAs/GaAs เป็นคู่สารกึ่งตัวนำที่มีแลตทิซแมทซ์ (Lattice-matched material) โดยค่าคงตัวแลตทิซมีการ Mismatch น้อยมากเพียง 0.1% ตลอดช่วงสัดส่วนของ Al ใน GaAlAs ดังนั้นจึงทำให้ที่หัวต่อมี Interface state น้อยมากและหัวต่อต่างชนิดที่สร้างได้จะเรียกได้ว่า ไม่มี ความเครียด (Mechanical strain) และจุดบกพร่องอันเกิดจากการไม่เท่ากันของค่าคงตัวแลตทิซที่หัวต่อเลย

ภาพโครงสร้างแถบพลังงานของ GaAlAs และ GaAs ก่อนนำมาสร้างหัวต่อต่างชนิดแสดงดังรูปที่ 2.11 โดยที่  $\chi_1$  และ  $\chi_2$  คือ Electron affinity ของ GaAlAs และ GaAs ตามลำดับ  $E_{g1}$  และ  $E_{g2}$  คือ ค่าช่องว่างพลังงานของ GaAlAs และ GaAs ตามลำดับ  $\Delta E_c$  และ  $\Delta E_v$  คือ ความแตกต่างระหว่างค่าพลังงานที่ขอบของแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ ตามลำดับ

เมื่อนำหัวต่อต่างชนิด GaAlAs/GaAs มาฉายแสง โดยให้แสงตกกระทบด้าน GaAlAs โดยหลักการที่ว่า GaAlAs ซึ่งเป็นสารกึ่งนำที่มีค่าช่องว่างพลังงานกว้าง จะทำหน้าที่เหมือนกับหน้าต่างแสงที่ยอมให้โฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่า  $E_{g1}$  ผ่านได้ และโฟตอนเฉพาะที่มีพลังงานอยู่ระหว่างค่า  $E_{g1}$  และ  $E_{g2}$  เท่านั้นที่จะทะลุผ่านชั้น GaAlAs และถูกดูดกลืนในชั้น GaAs ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์หน้าต่างแสง (Window effect) ในหัวต่อต่างชนิด จึงทำให้โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดสามารถมีรอยต่อที่อยู่ลึกกว่าโฟโตไดโอดหัวต่อชนิดเดียว (Homojunction photodiode) ได้ แต่อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาถึงการลดทอนกำลังงานแสงในสารกึ่งตัวนำด้วย ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.5 เพราะฉะนั้นการออกแบบโครงสร้างโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดให้มีชั้นรับแสงแคบและชั้นปกปิดพาหะกว้างก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของโฟโตไดโอดได้



รูปที่ 2.11 ภาพโครงสร้างแถบพลังงานของ GaAlAs และ GaAs ก่อนนำมาสร้างหัวต่อต่างชนิด