แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4
ภาครับสัญญาณแสง

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. ตัวรับแสงแบบโฟโตไดโอดและพินโฟโตไดโอด
2. ตัวรับแสงแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอด
3. ค่าความไวและอัตราส่วนกำลังงานสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายหลักการทำงาน และโครงสร้างของภาครับแสงได้
2. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายหลักการทำงานของโฟโตไดโอดและพินโฟโตไดโอดได้
3. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายหลักการทำงานของอะวาลานซ์โฟโตไดโอดได้
4. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถอธิบายค่าความไว และอัตราส่วนค่ากำลังงานสัญญาณต่อกำลังงานสัญญาณรบกวนในระบบได้

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอนประจำบท

1. วิธีสอน

1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย

1.2 วิธีสอนแบบอภิปราย

1.3 วิธีสอนแบบค้นคว้าหาความรู้ด้วยตนเอง

2. กิจกรรมการเรียนการสอน

2.1 ผู้สอนบรรยายเนื้อหาที่เกี่ยวกับโครงสร้างของภาครับแสง หลักการตรวจจับพัลส์แสง อุปกรณ์รับแสงแบบพินโฟโตไดโอดและแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอด ค่าความไวและอัตราส่วนกำลังงานสัญญาณต่อกำลังงานสัญญาณรบกวน

2.2 ผู้สอนมีการตั้งคำถามระหว่างการสอน

2.3 มีการมอบหมายแบบฝึกหัดให้ผู้เรียนได้ทำเป็นการบ้าน

2.4 มีการมอบหมายหัวข้อให้ผู้เรียนได้ไปอ่านล่วงหน้า

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอน รายวิชาการสื่อสารทางแสง
2. เว็บไซต์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน
4. เครื่องคำนวณ

การวัดผลและการประเมินผล

1. การเข้าชั้นเรียน ความตรงต่อเวลา และความตั้งใจในระหว่างเรียน
2. การส่งแบบฝึกหัด การบ้านและการนำเสนอรายงาน
3. การสอบกลางภาค
4. การสอบปลายภาค
5. การค้นคว้าเพิ่มเติมตามหัวข้อที่ได้รับมอบหมาย

บทที่ 4
ภาครับสัญญาณแสง

อุปกรณ์ตรวจจับแสงหรือตัวรับแสง (optical detectors) จะทำหน้าที่เปลี่ยนพัลส์แสงที่ความถี่สูงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (สัญญาณเบสแบนด์หรือสัญญาณดิจิทัล ลอจิก “1” และ “0”) คุณสมบัติพื้นฐานที่ดีของตัวรับแสงคือ 1.) มีค่าความไวสูง สามารถรับสัญญาณได้ดีแม้มีค่าอัตราส่วนกำลังงานสัญญาณข้อมูลต่อกำลังงานสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ (SNR : signal to noise ratio) 2.) มีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน 3.) มีประสิทธิภาพเชิงควอนตัมสูง 4.) ตอบสนองต่อสัญญาณความถี่สูงได้ดี 5.) สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในน้อย 6.) ขนาดเล็ก ใช้งานง่าย ราคาถูก มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และ 7.) ขณะทำงานใช้แรงดันไบอัสต่ำและมีเสถียรภาพสูง

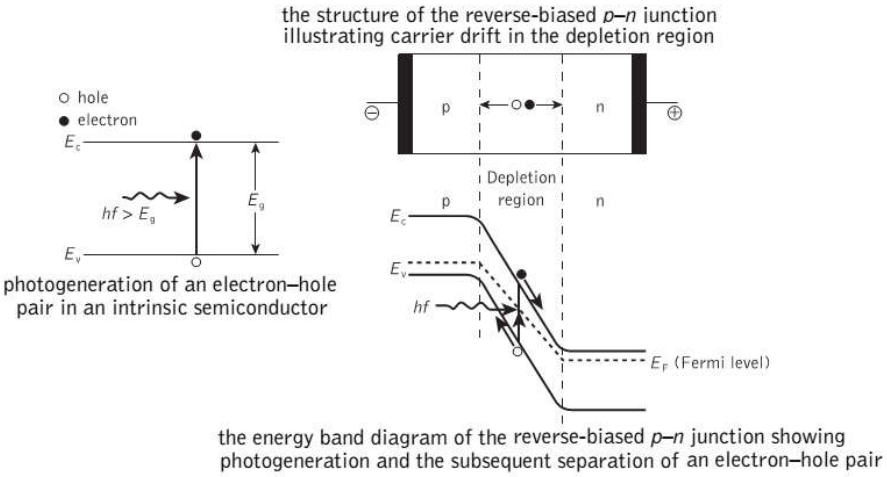
4.1 ตัวรับแสงแบบโฟโตไดโอดและพินโฟโตไดโอด

ในระบบสื่อสารทางแสงปัจจุบัน ตัวรับแสงจะสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรินซิก (Intrinsic semiconductor) เช่น เจอร์เมเนียม และโลหะอัลลอย หมู่ 3 และ 5 ตัวรับแสงที่นิยมใช้คือโฟโตไดโอด (photo diode) ที่ความยาวคลื่นแสงย่าน 800, 900, 1,300 และ 1,500 nm ชนิดของโฟโตไดโอดที่นิยมในปัจุบันได้แก่

1. พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode)
2. อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode)

การทำงานของโฟโตไดโอดจะเป็นดังภาพที่ 4.1 เมื่อรอยต่อ p-n ได้รับแรงดันไบอัสกลับ สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อจะบังคับให้โฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากในสาร p (Hole) และอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างมากในสาร n (electron) เกิดการเคลื่อนที่ (sweeps mobile carriers) เพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล (holes and electrons) ในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้า

ช่วงปลอดพาหะจะถูกสร้างขึ้นที่บริเวณรอยต่อ p-n (repletion region) และมีระดับพลังงานแถบช่องว่างเท่ากับ E_g (bandgap energy) และเมื่อมีพลังงานโฟตอน (แสง) จากภายนอกตกกระทบลงบนรอยต่อ p-n (1 โฟตอนจะมีพลังงานเท่ากับ hf) ถ้าพลังงานหนึ่งโฟตอนมีค่ามากกว่าระดับพลังงานแถบช่องว่าง ($hf \geq E_g$) จะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence band) ขึ้นไปสู่แถบนำ (conduction band) ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 การทำงานของโฟโตไดโอด
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 448)

ในช่วงเวลานี้จะทำให้โฮลในสาร p และอิเล็กตรอนในสาร n สามารถไหลข้ามรอยต่อได้ กระแสที่เกิดขึ้นจะเป็นกระแสแบบแทนที่ (displacement current) เกิดจากการจับคู่กันระหว่างโฮลและอิเล็กตรอนแบบต่อเนื่องที่บริเวณรอยต่อ (photo generation of electron-hole) จำนวนการจับคู่ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอนจะแปลผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกำลังงานของอิเล็กตรอนตรงบริเวณรอยต่อ (α_0) ของสารกึ่งตัวนำ ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโต (photo current) ที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการ

$$I_P = \frac{P_0 e(1-r)}{hf}[1-\exp(-\alpha_0 d)] \tag{4.1}$$

โดยที่ P_0 คือค่ากำลังงานแสง (โฟตอน) ที่ตกกระทบ

e คือประจุอิเล็กตรอน

r คือค่าดรรชนีการหักเหแบบเฟรแนล (Fresnel reflection coefficient) ระหว่างอากาศกับสารกึ่งตัวนำ

d คือค่าความกว้างช่องดูดกลืนกำลังงานแสงที่ตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำ

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานโฟตอนของอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อ (α_0) ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำโฟโตไดโอด ค่าความยาวคลื่นและความลึกของผิวที่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้และอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.1 แถบพลังงานช่องว่างของวัสดุสารกึ่งตัวนำ

semiconductor	Bandgap (eV) at 300 K	
	Indirect	Direct
S_i	1.14	4.10
Ge	0.67	0.81
GaAs	-	1.43
InAs	-	0.35
InP	-	1.35
GaSb	-	0.73
$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	-	0.75
$In_{0.14}Ga_{0.86}As$	-	1.15
$GaAs_{0.88}Sb_{0.12}$	-	1.15

ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 449)

สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาสร้างเป็นโฟโตไดโอด เช่น silicon, germanium, gallium arsenide, indium gallium arsenide, และ indium gallium arsenide phosphide ที่มีค่าระดับพลังงานแถบช่องว่าง (bandgap) ทั้งแบบตรงและแบบไม่ตรงแสดงดังตารางที่ 4.1 สารเจอร์เมเนียมสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนในช่วงความยาวคลื่นกว้างที่สุด แต่โฟโตไดโอดที่ความยาวคลื่น 1,550 nm จะใช้วัสดุประเภทเทอร์นารีอัลลอย เช่น InGaAs และ GaAlSb ที่เคลือบบน InP และใช้ GaSb เป็นซับสเตจ เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานโฟตอนของอิเล็กตรอนมากกว่าเจอร์เมเนียม แต่ข้อเสียของวัสดุประเภทเทอร์นารีอัลลอย จะมีค่ากระแสรั่วตรงรอยต่อไบอัสกลับสูง (dark current) แต่สามารถทำให้น้อยลงได้โดยใช้วัสดุผสม $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของโฟโตไดโอด (η) คือตัวแปรสำคัญที่บอกอัตราการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นกระแสไฟฟ้า ดังสมการ

$$\eta = \frac{\text{number of electron collected}}{\text{number of incident photons}} \tag{4.2}$$

$$\eta = \frac{r_e}{r_p} \tag{4.3}$$

โดยที่ r_e คือปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบ (photons per second)

r_p คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ (electrons per second)

ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 75 % แต่ในทางปฏิบัติสมรรถนะของโฟโตไดโอดจะอยู่ในเทอมของค่าความไว (responsivity) ดังสมการ

$$R = \frac{I_P}{P_0} \tag{4.4}$$

โดยที่ I_P คือค่ากระแสเอาต์พุตของโฟโตไดโอด (A)

P_0 คือค่ากำลังงานแสงที่ตกกระทบ (W)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานแสงที่ตกกระทบและพลังงานโฟตอนจะเป็นดังสมการ (4.5) โดยกำหนดให้หนึ่งโฟตอนมีพลังงานเท่ากับ hf

$$r_P = \frac{P_0}{hf} \tag{4.5}$$

จากสมการ (4.3) จัดสมการใหม่จะได้

$$r_e = \eta r_P \tag{4.6}$$

แทนสมการ (4.5) ลงในสมการ (4.6) จะได้

$$r_e = \frac{\eta P_0}{hf} \tag{4.7}$$

ฉะนั้นค่ากระแสเอาต์พุตของโฟโตไดโอดคือ

$$I_P = \frac{\eta P_0 e}{hf} \tag{4.8}$$

และค่าความไวคือ $$R = \frac{\eta e}{hf} \tag{4.9}$$

ค่าความถี่ของแสงที่ตกกระทบ $$f = \frac{c}{\lambda} \tag{4.10}$$

โดยที่ c คือค่าความเร็วแสงในอากาศ แทนสมการ (4.10) ลงในสมการ (4.9) สุดท้ายจะได้สมการความไวคือ

$$R = \frac{\eta e \lambda}{hc} \tag{4.11}$$

ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของวัสดุที่ใช้ทำโฟโตไดโอดจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบมีค่ามากกว่าความยาวคลื่นคัทออฟ (cutoff wavelength) และถ้าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบมีพลังงานน้อยกว่าค่าพลังงานแถบช่องว่าง E_g (bandgap energy) ค่าความไวของโฟโตไดโอดจะเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญที่ใช้สร้างตัวรับคลื่นแสงจะต้องเป็นไปตามสมการ (4.12)

$$\frac{hc}{\lambda} \geq E_g \tag{4.12}$$

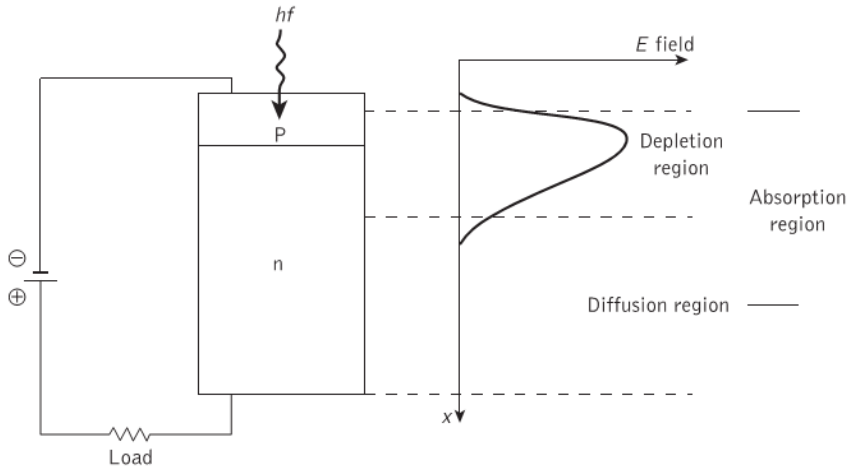
จากสมการ (4.12) จะได้ค่าความยาวคลื่นดังสมการ

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \tag{4.13}$$

ดังนั้นค่าความยาวคลื่นคัทออฟสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \tag{4.14}$$

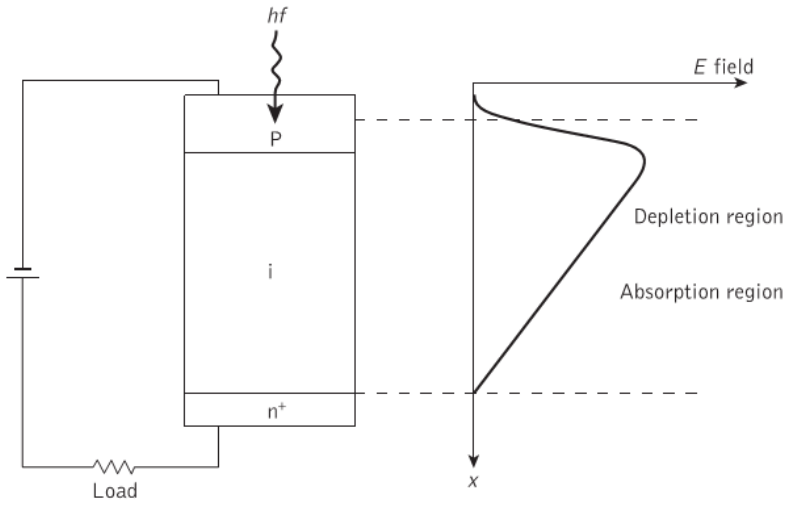
ถ้าความยาวคลื่นที่ตกกระทบ (λ) มากกว่าความยาวคลื่นคัทออฟ (λ_c) จะทำให้โฟโตไดโอดไม่สามารถรับสัญญาณได้ ตัวรับแสงแบบโฟโตไดโอดเป็นตัวรับที่ไม่มีอัตราการขยายภายใน แบบแรกคือโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-n หรือ pn โฟโตไดโอด (pn photodiode) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-n ดังภาพที่ 4.2 ขณะทำงานโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-n จะได้รับแรงดันไฟฟ้าแบบไบอัสกลับ ในช่วงเวลาที่ยังไม่มีพลังงานโฟตอน (แสง) มาตกกระทบบริเวณรอยต่อ p-n จะเกิดช่องว่างปลอดพาหะ (depletion region) ช่องการแพร่ซึม (diffusion region) และช่องการดูดกลืนพลังงาน (absorption region) กระแสที่เกิดจากพาหะข้างน้อยประกอบด้วย อิเล็กตรอนในสาร p และโฮลในสาร n สามารถไหลข้ามรอยต่อ p-n ได้แต่มีปริมาณน้อยมาก กระแสส่วนนี้กำหนดให้เป็นกระแสมืด (dark current)



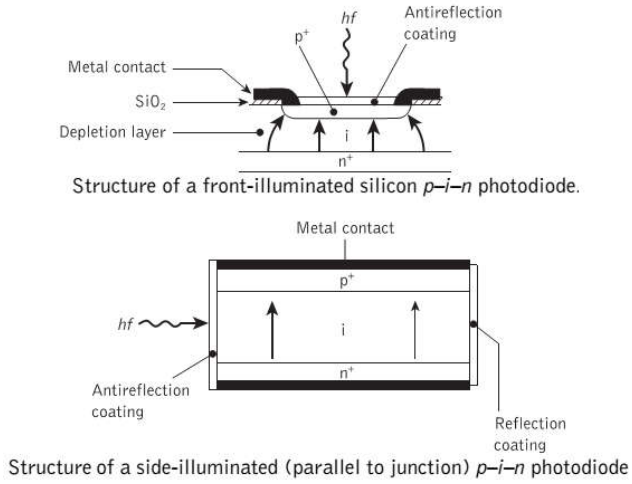
ภาพที่ 4.2 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-n
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 457)

เมื่อมีพลังงานแสงมาตกกระทบบนสาร p และมีค่ามากกว่าแถบพลังงานช่องว่าง อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนจนสามารถเลื่อนแถบพลังงานจากวาเลนซ์ไปสู่แถบนำ คู่อิเล็กตรอน-โฮล จะถูกสร้างขึ้นและคลื่นที่ผ่านเข้าไปสู่ช่องการแพร่ซึมตามค่าสนามไฟฟ้าที่ไบอัสกลับ ถ้าพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบมีค่าน้อย กระแสที่เกิดจากคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกแพร่ซึมในสารชั้น n จนหมด แต่ถ้าพลังงานโฟตอนมีค่ามาก กระแสที่เกิดจากคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะมากพอที่สามารถแพร่ซึมข้ามสารชั้น n ไปได้ ระดับกระแสเอาต์พุตที่ได้เมื่อความเข้มกำลังงานโฟตอน (แสง) ที่ตกกระทบมีการเปลี่ยนแปลง ในระดับ ระดับสูง และไม่มีพลังงานโฟตอนมาตกกระทบ ถ้าโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-n ทำมาจากซิลิคอน ค่าความยาวคลื่นใช้งานจะอยู่ในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ (visible light) 400-700 nm และในกรณีโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-n ทำมาจากเจอร์เมเนียมค่าความยาวคลื่นใช้งานจะอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด 700-900 nm

อุปกรณ์รับแสงแบบโฟโตไดโอดที่ไม่มีอัตราการขยายภายใน หรือมีค่าอัตราการขยายน้อยกว่าหนึ่ง ถูกออกแบบมาให้มีค่าความไวมากขึ้นและมีกระแสมืดน้อยลง พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) จะมีชั้นสารอินทรินซิก i (intrinsic) คั่นระหว่างชั้น p และ n และชั้น n ถูกโด๊ปอย่างหนัก (n^+ type) เพื่อลดความต้านทานของรอยต่อให้น้อยลง ค่าความยาวคลื่นใช้งานประมาณ 1,090 nm, 800-900 nm โครงสร้างของพินโฟโตไดโอดแสดงดังในภาพที่ 4.3 รูปแบบช่องรับแสงและไบอัสแสดงดังในภาพที่ 4.4 และ 4.5 ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมอยู่ระหว่าง 75 % ถึง 100 % ขณะที่รอยต่อ p และ n^+ ได้รับแรงดันไบอัสกลับในช่วงที่ยังไม่มีพลังงานแสงตกกระทบลงบนด้านหน้าพินโฟโตไดโอด

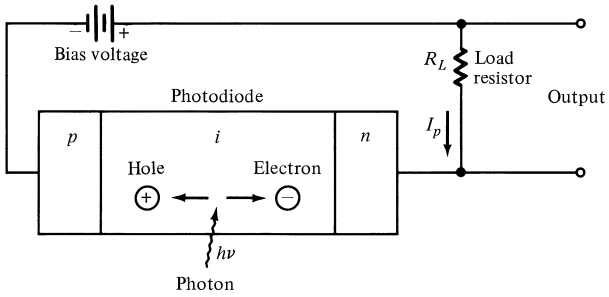


ภาพที่ 4.3 โครงสร้างของพินโฟโตไดโอด
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 457)

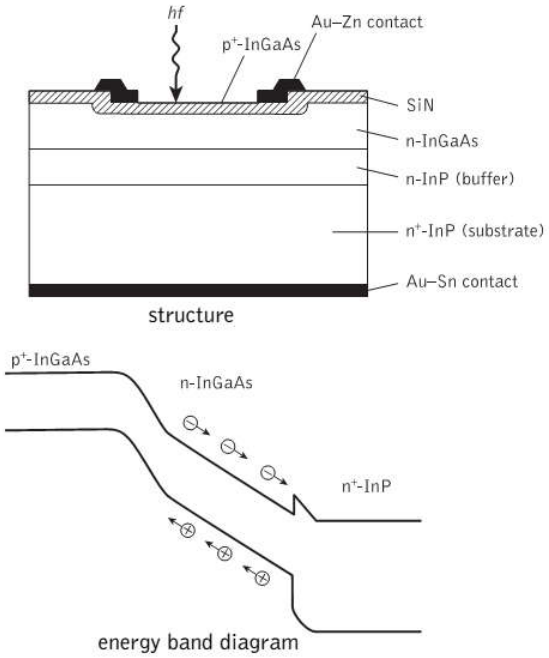


ภาพที่ 4.4 ช่องรับแสงของพินโฟโตไดโอด
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 458)

กระแสที่เกิดจากพาหะส่วนน้อยจะมีค่าน้อยมาก น้อยกว่า 1 nA (dark current) เนื่องจากมีสารอินทรินซิกคั่นกลางจะเกิดช่วงปลอดพาหะ (depletion region) ประมาณ 20–50 μm และเมื่อมีพลังงานแสง (โฟตอน) ตกกระทบช่องดูดกลืนพลังงานและความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ มีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่น คัทออฟจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงาน สามารถคลื่นที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำได้ เกิดการจับคู่ โฮล-อิเล็กตรอนใหม่แบบต่อเนื่อง จนเกิดกระแสไหลผ่านรอยต่อ p-n ได้ดังแสดงในภาพ 4.5

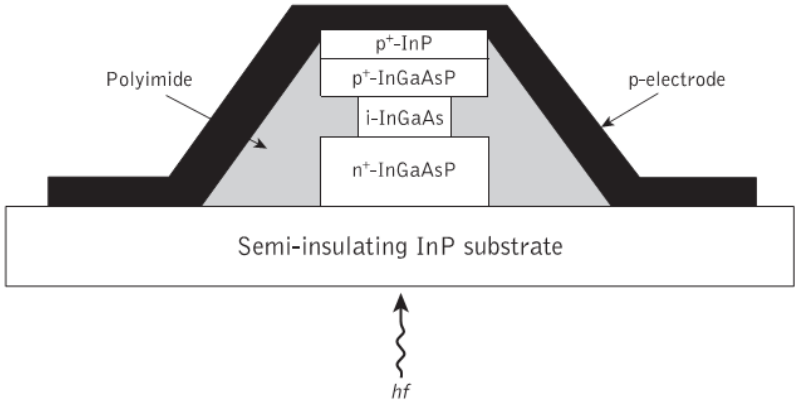


ภาพที่ 4.5 การไบอัสและกระแสโฟตอนของพินโฟโตไดโอด
ที่มา (Keiser, 2000, p. 224)



ภาพที่ 4.6 โฟโตไดโอดแบบ Planar InGaAs
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 459)

เพื่อให้พินโฟโตไดโอด สามารถรับแสงให้มีย่านความยาวคลื่นมากขึ้น โดยวิธีปลูกผลึกชั้นอินทรินซิกให้มีรูปแบบดังภาพที่ 4.6 จะเรียกพินโฟโตไดโอดแบบ Planar InGaAs ซึ่งสามารถรับแสงที่มีความยาวคลื่นถึง 1,670 nm โครงสร้างพินโฟโตไดโอดแบบ Planar InGaAs ที่มีรอยต่อ p-n แบบเฮเทโร (hetero junction) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงควอนตัมให้สูงขึ้น มีค่าเก็บประจุบริเวณรอยต่อน้อย



ภาพที่ 4.7 โฟโตไดโอดแบบ mushroom waveguide
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 461)

(parasitic capacitance) น้อยกว่า 0.1 pF มีค่าแบนด์วิดท์อยู่ที่ประมาณ 15 GHz และประสิทธิภาพเชิงควอนตัมอยู่ระหว่าง 75-100% ภาพที่ 4.7 เป็นพินโฟโตไดโอดแบบ mushroom waveguide ที่มีโครงสร้างแบบท่อนำคลื่นชั้นสารจะหนาประมาณ 0.20 μm การออกแบบให้ชั้นดูดกลืนแสง (absorption region) ควรมีความกว้างมากที่สุดและบางที่สุดเท่าที่จะทำได้ จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมและค่าความไวมีค่าสูง พินโฟโตไดโอดแบบ mushroom waveguide มีค่าความเร็วได้ถึง 110 GHz ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมมากกว่า 80 % และมีค่าแบนด์วิดท์ประมาณ 10 GHz ค่าความเร็วของโฟโตไดโอดในการตอบสนองพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบจะขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการคือ

1.) ช่วงเวลาการเคลื่อนที่พาหะ (คู่อิเล็กตรอน-โฮล) ข้ามรอยต่อ p-n (drift time of carriers) คำนวณได้จากสมการ (4.15)

$$t_{\text{drift}} = \frac{W}{v_d} \tag{4.15}$$

โดยที่ v_d คือค่าความเร็วดริฟท์ของพาหะที่ถูกสร้างภายในรอยต่อ,

W คือค่าความกว้างของชั้นปลอดภาพะ (depletion layer width) ที่ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า $2\text{x}10^4$ V/cm

สำหรับซิลิคอนความเร็วสูงสุดของพาหะ (คู่อิเล็กตรอน-โฮล) คลื่นที่ข้ามรอยต่อประมาณ 10^7 cm/s ถ้าความหนาของรอยต่อ 10 μm ค่าความเร็วดริฟท์จะเท่ากับ 0.1 ns

2.) คือค่าเวลาการเคลื่อนที่แบบแพร่ซึมของพาหะที่ถูกสร้างภายนอกรอยต่อ (diffusion time of carriers) คำนวณได้จากสมการ (4.16)

$$t_{\text{drift}} = \frac{d^2}{2D_c} \tag{4.16}$$

โดยที่ D_c คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมภายในรอยต่อและ d คือค่าความกว้างของช่องรับแสง สำหรับซิลิคอน ถ้าความหนาของรอยต่อ 10 μm ค่าเวลาการเคลื่อนที่แบบแพร่ซึมของโฮล (hole diffusion time) ประมาณ 40 ns และค่าเวลาการเคลื่อนที่แบบแพร่ซึมของอิเล็กตรอน (electron diffusion time) ประมาณ 8 ns

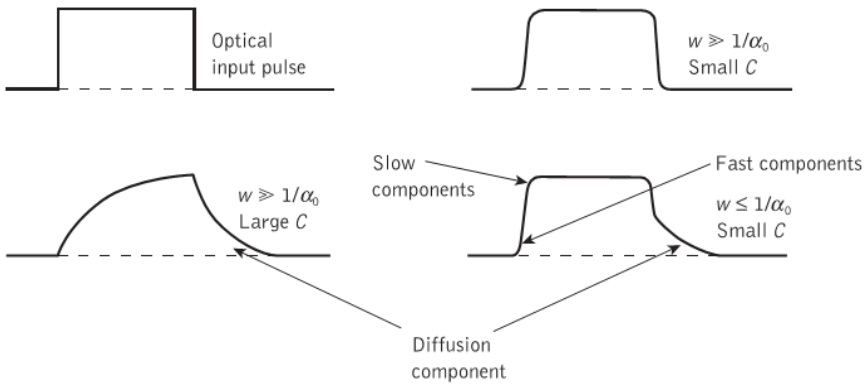
3.) คือค่าคงที่ทางเวลาของพาหะเนื่องจากค่าเก็บประจุที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อเมื่อได้รับแรงดันแบบไบอัสกลับ คำนวณได้จากสมการ

$$C_j = \frac{\varepsilon_s A}{W} \tag{4.17}$$

โดยที่ ε_s คือค่าสภาพะยอมทางสนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและ A คือค่าพื้นที่รอยต่อ p-n ถ้าค่าความกว้างของช่วงปลอดพาหะ W (depletion layer width) มีขนาดลดลงค่าเก็บประจุที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อเมื่อได้รับแรงดันแบบไบอัสกลับจะเพิ่มขึ้น และเมื่อนำพินโฟโตไดโอดต่อกับโหลด (load) จะเกิดค่าคงที่ทางเวลาทันที (RC time constant) กรณีที่พิจารณาเฉพาะผลกระทบจากช่วงเวลาการเคลื่อนที่พาหะ (คู่อิเล็กตรอน-โฮล) ข้ามรอยต่อ p-n (drift time of carriers) เพียงอย่างเดียว ที่ส่งผลต่อค่าแบนด์วิดท์สูงสุดที่ 3 dB สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$B_m = \frac{1}{2\pi t_{\text{drift}}} = \frac{v_d}{2\pi W} \tag{4.18}$$

เมื่อค่าความกว้างของช่วงปลอดภาพะ W (depletion layer width) เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ขนาดค่าเก็บประจุที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อเมื่อได้รับแรงดันแบบไบอัสกลับเปลี่ยนแปลงด้วย ขณะทำงานพินโฟโตไดโอดต่ออยู่กับโหลด R ค่าหน่วงเวลา RC จะส่งผลต่อพัลส์แสงรูปสี่เหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 4.8 เทคนิคลดค่าหน่วงเวลา RC คือการสร้างโฟโตไดโอดเป็นแบบท่อนำคลื่นเรียกว่า โฟโตไดโอดแบบ traveling-wave โฟโตไดโอดจะถูกต่อแบบอาเรย์และทำการแมทชิ่งค่าความเร็วทางแสงและความเร็วทางไฟฟ้า โดยวิธีการปรับเฟสสนามไฟฟ้าบนแผ่นสายส่งที่ประกบคู่ด้านบนและล่างชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอน (transmission line velocity matching scheme) เทคนิคนี้สามารถเพิ่มความเร็วโฟโตไดโอดได้ถึง 100–160 Gbps และมีค่าแบนวิดท์สูงถึง 1.5 THz



ภาพที่ 4.8 การตอบสนองต่อพัลส์แสงรูปสี่เหลี่ยมเมื่อพารามิเตอร์ C และ W เปลี่ยนแปลง
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 461)

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในโฟโตดีเทคเตอร์ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้เพราะเกิดขึ้นโดยธรรมชาติ กรณีแรกจะเป็นสัญญาณรบกวนแบบช็อตนอยส์ (shot noise) ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (root mean square) ของสัญญาณรบกวนแบบช็อตนอยส์จะเป็นดังสมการ

$$\left(\overline{I_s^2}\right)^{\frac{1}{2}} = (2eB\overline{I})^{\frac{1}{2}} \tag{4.19}$$

โดยที่ $\overline{I}$ คือค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เอาต์พุตของโฟโตดีเทคเตอร์ (A)

B คือค่าแบนด์วิดท์ (Hz)

ในการวิเคราะห์ระบบสื่อสารทางแสง จะพิจารณาสัญญาณรบกวนแบบช็อตนอยส์ในรูปแบบกำลังสัมบูรณ์ NEP (noise equivalent power) ค่า NEP คือค่ากำลังงานแสงที่ตกกระทบลงบนช่องรับแสงแล้วทำให้เกิดกระแสโฟโต (I_P) เท่ากับกระแสช็อตนอยส์พอดี ถ้ากำหนดให้แบนด์วิดท์เท่ากับ 1 Hz จากสมการ (4.8) สามารถจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$P_0 = \frac{I_P hf}{\eta e} = \frac{I_P hc}{\eta e \lambda} \tag{4.20}$$

ณ จุดที่ค่ากระแสโฟโต (I_P) เท่ากับกระแสอาร์เอ็มเอสช็อตนอยส์ ($\overline{I_s^2}$) สมการ (4.19) จะเท่ากับ

$$I_P = (2e\bar{I}B)^{\frac{1}{2}} \tag{4.21}$$

แต่อย่างไรก็ตามค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $\bar{I}$ คือผลรวมระหว่างกระแสโฟโต (I_P) (เมื่อมีพลังงานโฟตอนตกกระทบแล้วเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า) กับกระแสมืด (I_d) เป็นกระแสที่เกิดขึ้นที่ช่องดูดกลืนพลังงานแสงในขณะที่ยังไม่มีแสงมากระทบ (dark current) สมการ (4.21) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I_P = [2e(I_P + I_d)B]^{\frac{1}{2}} \tag{4.22}$$

ในสภาวะการทำงานปกติค่ากระแสโฟโตจะมากกว่ากระแสมืดมาก ๆ ($I_P \gg I_d$) สมการ (4.21) และ (4.22) สามารถประมาณได้

$$I_P \simeq 2eB \tag{4.23}$$

แทนสมการ (4.23) ลงในสมการ (4.20) และกำหนดให้แบนด์วิดท์ (B) เท่ากับ 1 Hz จะได้

$$NEP = P_0 \simeq \frac{2hc}{\eta\lambda} \tag{4.24}$$

ในทางตรงกันข้าม ในสภาวะการทำงานที่มีกระแสมืดมากกว่าค่ากระแสโฟโตมาก ๆ ($I_d \gg I_P$) สมการ (4.21) และ (4.22) สามารถประมาณได้

$$I_P \simeq [2eI_dB]^{\frac{1}{2}} \tag{4.25}$$

$$NEP = P_0 \simeq \frac{hc(2eI_d)^{\frac{1}{2}}}{\eta e\lambda} \tag{4.26}$$

ค่าความสามารถในการตรวจจับ D (detectivity) จะแปรผกผันค่า NEP ดังนั้น

$$D = \frac{1}{NEP} \tag{4.27}$$

ถ้าแสงที่ตกกระทบลงบนช่องรับแสงโฟโตไดโอดเป็นแสงสีเดียว (monochromatic) และกระแสมืดมีอิทธิพลมากกว่าค่ากระแสโฟโต จากสมการ (4.26) และ (4.27) จะได้

$$D = D_{\lambda} = \frac{\eta e \lambda}{hc(2eI_d)^{\frac{1}{2}}} \tag{4.28}$$

ค่ากระแสมืดจะสัมพันธ์กับพื้นที่แสงตกกระทบ A (effective area) บนช่องรับแสงโฟโตไดโอด และค่าแบนด์วิดท์ของความถี่พัลส์แสง ค่าความสามารถในการตรวจจับ D จะเป็นดังสมการ (4.29)

$$D^* = DA^{\frac{1}{2}} = \frac{\eta e \lambda}{hc(2eI_d / A)^{\frac{1}{2}}} \tag{4.29}$$

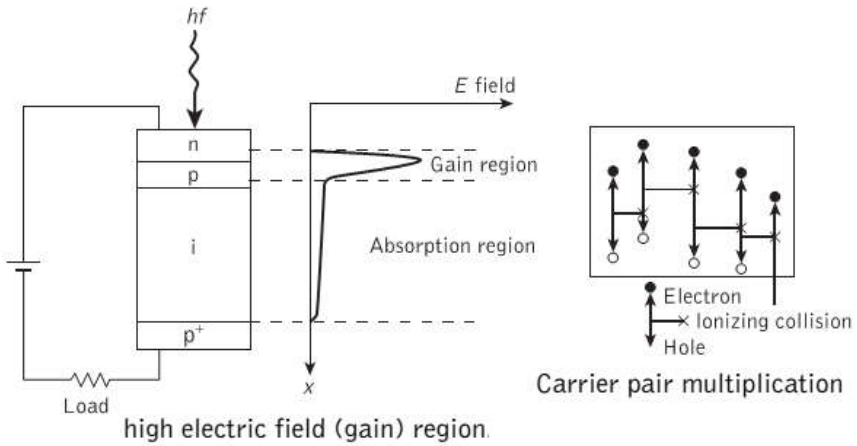
ค่าความสามารถในการตรวจจับ D ในสมการ (4.29) พิจารณากรณีแบนด์วิดท์เท่ากับ 1 Hz ถ้าความกว้างแถบความถี่เท่ากับ B Hz จากสมการ (4.29) จะกลายเป็น

$$D^* = D(AB)^{\frac{1}{2}} \tag{4.30}$$

4.2 ตัวรับแสงแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอด

อุปกรณ์รับแสงแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photo diode: APD) จะมีค่าการขยายสัญญาณภายในมากกว่าหนึ่ง มีโครงสร้างดังภาพที่ 4.9 จากภาพช่วงดูดกลืนพลังงาน (absorption region) จะถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าแบบไบอัสกลับที่ความต่างศักดิ์สูงถึง 50-400 V ฉะนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อจะสูงมากประมาณ 3×10^5 V/cm เมื่อมีพลังงานโฟตอน (แสง) ตกกระทบตรงรอยต่อจะทำให้เกิดคู่พาหะ (โฮล-อิเล็กตรอน) และคู่โฮล-อิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง และเกิดการชนกันภายในรอยต่อ p-n กระตุ้นให้เกิดการแตกตัวเป็นอิออน คู่โฮล-อิเล็กตรอนใหม่แบบต่อเนื่อง เรียกว่าปรากฏการไอออไนส์ (ionization) และนำไปสู่การพังทลายของค่าความต่างศักดิ์บริเวณรอยต่อแบบอะวาลานซ์ (avalanche breakdown) ส่งผลให้ค่ากระแสโฟโตถูกขยายให้มีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมาก

อัตราการขยายจะประมาณ 10^4 เท่าหรือมากกว่า ค่าความไวหรือการตอบสนองของอะวาลานซ์โฟโตไดโอดต่อพัลส์แสง จะขึ้นอยู่กับ



ภาพที่ 4.9 ตัวรับแสงแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอด
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 471)

1. ค่าเวลาการส่งผ่านของคู่พาหะ (โฮล-อิเล็กตรอน) คลื่นที่ผ่านช่วงแถบดูดกลืน (absorption region)

2. ค่าเวลาที่ถูกใช้ในกระบวนการแตกตัวเป็นอิออน คู่โฮล-อิเล็กตรอนใหม่บริเวณรอยต่อแบบอะวาลานซ์

3. ค่าเวลาคงตัว RC อันเนื่องมาจากค่าเก็บประจุบริเวณรอยต่อที่เชื่อมต่อกับโหลด R (load)

อัราการขยายของอะวาลานซ์โฟโตไดโอด (M) คำนวณได้จากสมการ (4.31)

$$M = \frac{I}{I_P} \tag{4.31}$$

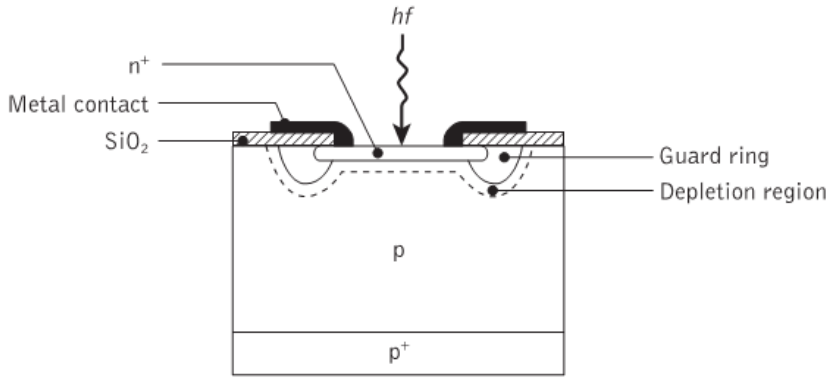
โดยที่ I คือค่ากระแสรวมเอาต์พุตในสภาวะทำงาน (อะวาลานซ์)

I_P คือค่ากระแสเริ่มต้นซึ่งคำนวณได้จากสมการ (4.32)

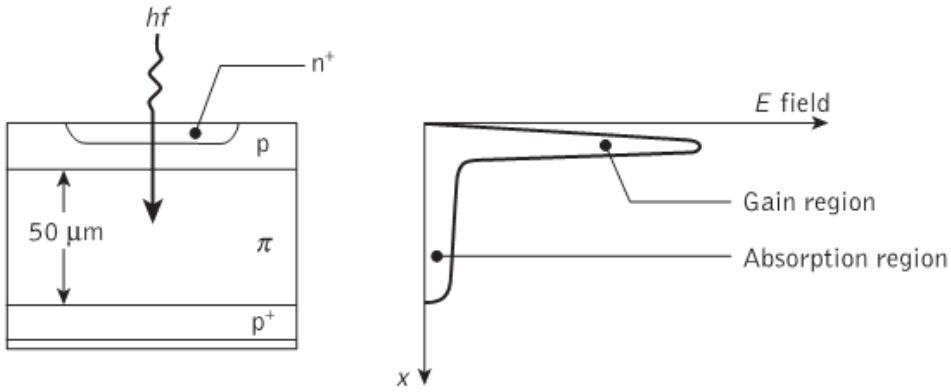
และค่าความไวจะเป็นดังสมการ (4.33)

$$I_P = P_0 R \tag{4.32}$$

$$R = \frac{\eta e \lambda}{hc} \tag{4.33}$$

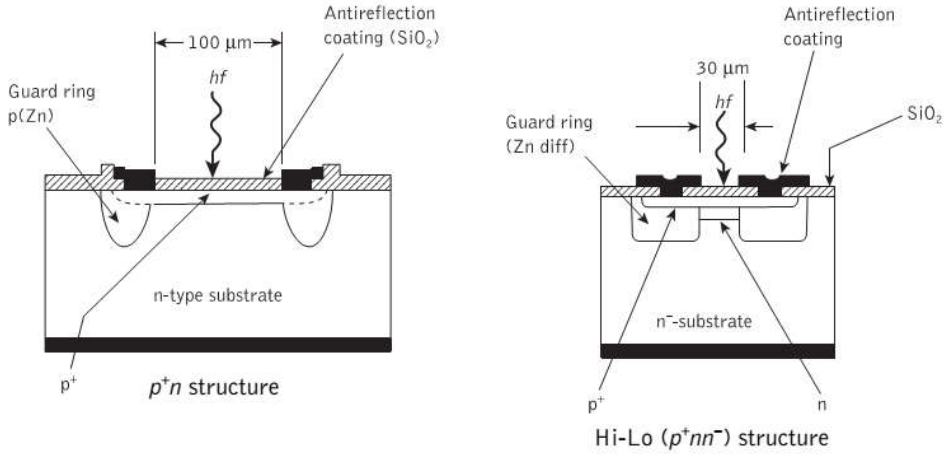


ภาพที่ 4.10 อะวาลานซ์โฟโตไดโอดแบบ guard ring
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 472)



ภาพที่ 4.11 อะวาลานซ์โฟโตไดโอดแบบ reach through
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 473)

แต่ในปัจจุบันอะวาลานซ์โฟโตไดโอดสามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่ำประมาณ 15-25 V และเพิ่มโครงสร้างแบบ guard ring ดังแสดงในภาพที่ 4.10 เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อลดกระแสรั่วตรงรอยต่อ ในสภาวะที่การแตกตัวเป็นอิออน คู่โฮล-อิเล็กตรอนใหม่แบบต่อเนื่องบริเวณรอยต่อแบบอะวาลานซ์ จนเกิดการขยายสัญญาณและสัญญาณรบกวนก็จะถูกขยายไปด้วย กรณีอะวาลานซ์โฟโตไดโอดที่ทำจากซิลิคอนและมีโครงสร้างชั้นสารแบบรีชทรู (silicon reach through APD : RAPD) ดังแสดงในภาพที่ 4.11



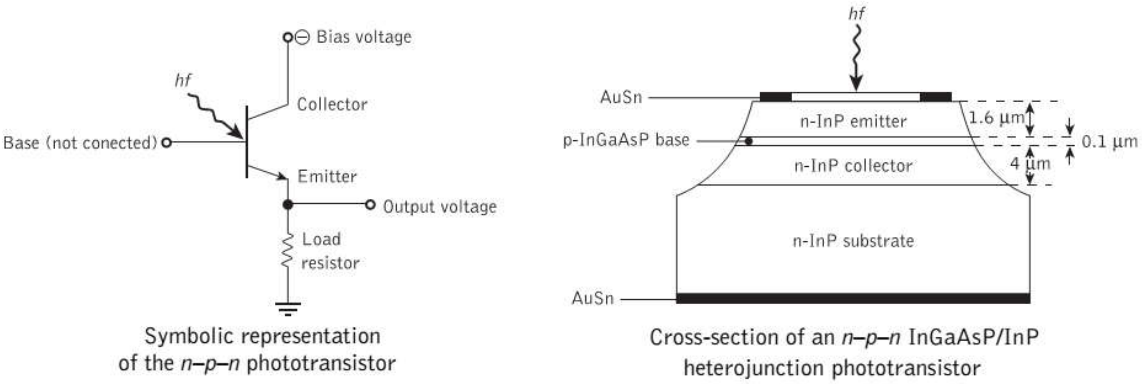
ภาพที่ 4.12 อะวาลานซ์โฟโตไดโอดแบบเจอร์เมเนียม
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 475)

โครงสร้างแบบรีชทรูสารชั้น π จะถูกโด๊ปแบบเบาบาง (lightly doped) สารชั้น π จะกว้างกว่าชั้น p และ p^+ ช่องรับแสงจะแคบอยู่บนสาร p ส่งผลให้แรงดันไบอัสกลับส่วนใหญ่ตกคร่อมอยู่ระหว่างชั้นสาร n^+ และสาร p จึงทำให้การแตกตัวไปเป็นอิออน คู่โฮล-อิเล็กตรอนใหม่แบบต่อเนื่องบริเวณรอยต่อแบบอะวาลานซ์เกิดได้เร็วขึ้น

ในกรณีอะวาลานซ์โฟโตไดโอดที่สร้างจากเจอร์เมเนียมจะมีค่าความไว และช่วงความยาวคลื่นแสงกว้างกว่าซิลิคอน แต่ข้อด้อยของเจอร์เมเนียมวาลานซ์โฟโตไดโอด จะมีค่ากระแสมืดที่สูงกว่า (ประมาณ 100-300 nA) และมีความไวต่ออุณหภูมิสูง แต่สามารถปรับปรุงสมรรถนะให้ดีขึ้นโดยออกแบบโครงสร้างแบบ Hi-Lo (p^+nn^-) แสดงดังภาพที่ 4.12

ปัญหาประการหนึ่งสำหรับอะวาลานซ์โฟโตไดโอด จะต้องใช้ย่านความยาวคลื่นที่กว้างในการกระตุ้นให้เกิดปรากฏการอะวาลานซ์ โฟโตทรานซิสเตอร์ถูกออกแบบมาให้เป็นอุปกรณ์รับแสงที่มีอัตราการขยายเช่นเดียวกับอะวาลานซ์โฟโตไดโอดแต่ใช้แรงดันที่ต่ำกว่า โครงสร้างโฟโตทรานซิสเตอร์แสดงดังภาพที่ 4.13

โฟโตทรานซิสเตอร์ถูกสร้างให้รอยต่อ p-n เป็นแบบ n–p–n InGaAsP/InP hetero ขณะทำงานรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์จะได้รับแรงดันไบอัสตรง ส่วนคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์จะเป็นแบบไบอัสกลับ เมื่อมีพลังงานแสงตกกระทบระหว่างเบส-คอลเลคเตอร์ จะกระตุ้นให้เกิดการขยายของกระแสระหว่างคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์เพื่อตกคร่อมโหลด (load) ค่าความยาวคลื่นใช้งานอยู่ระหว่าง 900-1,300 nm และอัตราการขยายประมาณ 100 เท่า ซึ่งอัตราการขยายโฟโตทรานซิสเตอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการ



Symbolic representation of the *n–p–n* phototransistor

Cross-section of an *n–p–n* InGaAsP/InP heterojunction phototransistor

ภาพที่ 4.13 อุปกรณ์รับแสงแบบโฟโตทรานซิสเตอร์
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 481)

$$G_0 = \eta h_{FE} = \frac{hf}{e}\frac{I_c}{P_0} \tag{4.34}$$

โดยที่ η คือค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมระหว่างเบส-คอลเลคเตอร์ของโฟโตทรานซิสเตอร์

h_{FE} คือค่าอัตราการขยายกระแสแบบอิมิตเตอร์ร่วม

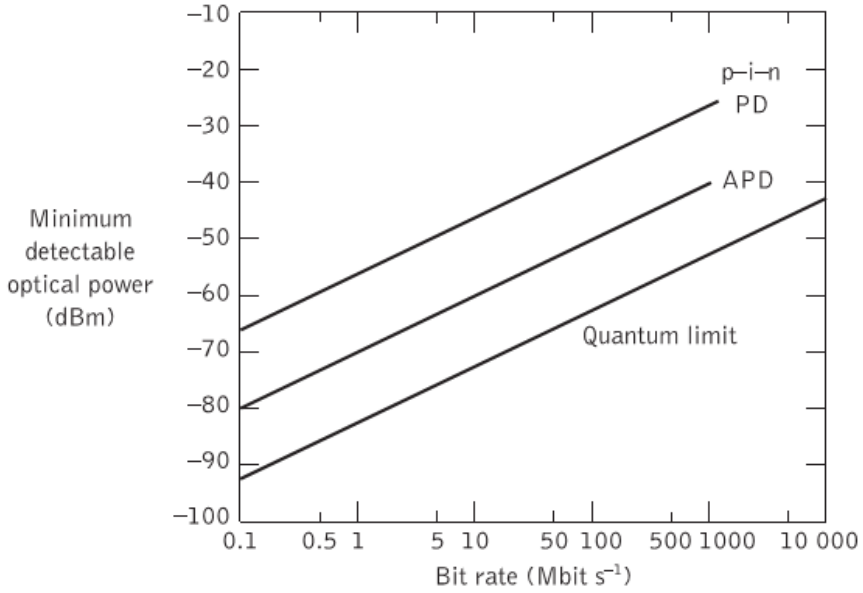
I_c คือค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (A)

e คือค่าประจุอิเล็กตรอน

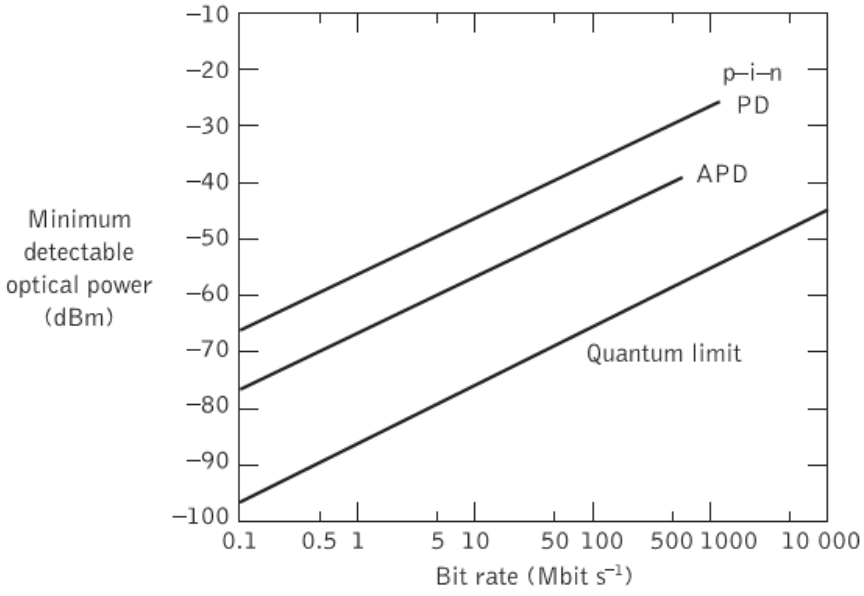
P_0 คือค่ากำลังงานแสงที่ตกกระทบ (W)

4.3 ค่าความไวและอัตราส่วนกำลังงานสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน

ข้อได้เปรียบของตัวรับคลื่นแสงแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอดคือ สามารถทำงานได้ดีแม้อัตราส่วนกำลังงานสัญญาณต่อกำลังงานสัญญาณรบกวนมีค่าน้อย โดยทั่วไปแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอดจะมีค่าความไวสูงกว่าพินโฟโตไดโอดประมาณ 5–15 dB ความสามารถในการรับพัลส์แสงที่ระดับพลังงานต่ำ ๆ ระหว่างพินโฟโตไดโอดกับอะวาลานซ์โฟโตไดโอดที่ทำจากซิลิคอน ทำงานที่ความยาวคลื่น 820 nm แสดงดังภาพที่ 4.14 และ 4.15 ส่วนพินโฟโตไดโอดและอะวาลานซ์โฟโตไดโอดที่ทำจาก InGaAs ความยาวคลื่น 1,550 nm จะเห็นว่าที่ความเร็วการส่งข้อมูลเท่ากันอะวาลานซ์โฟโตไดโอดจะมีสมรรถนะที่ดีกว่าพินโฟโตไดโอด แต่อย่างไรก็ตามข้อด้อยของอะวาลานซ์โฟโตไดโอดคือโครงสร้างซับซ้อนส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง, สัญญาณรบกวนสูง (additional noise contribution)



ภาพที่ 4.14 สมรรถนะระหว่างพินโฟโตไดโอดกับอะวาลานซ์โฟโตไดโอดที่ทำจากซิลิคอน
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 480)



ภาพที่ 4.15 สมรรถนะระหว่างพินโฟโตไดโอดกับอะวาลานซ์โฟโตไดโอดที่ทำจากเจอร์เมเนียม
ที่มา (Senior & Jamro, 2009, p. 480)

และต้องการแรงดันไบอัสสูง (150 ถึง 400 V), และต้องควบคุมอุณหภูมิขณะทำงาน อัตราการขยายของอะวาลานซ์โฟโตไดโอดที่สัมพันธ์กับแรงดันไบอัสกลับเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไประดับแรงดันที่ไบอัสกลับสูงขึ้นอัตราการขยายกระแสจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการขยายกระแสจะลดลง ส่วนประกอบภาครับพัลส์แสงโดยพื้นฐานจะประกอบด้วย

1. ตัวรับแสง (photo-detector)
2. ภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier)
3. ภาคขยายหลัก (main amplifier)
4. อีควอไลซ์เซอร์ (equalizer)
5. วงจรกรอง (filter)

ในการออกแบบวงจรตัวรับพัลส์แสงที่ดีจะต้องมีความไวสูง สัญญาณรบกวนต่ำ มีความเป็นเส้นและมีการสะสมอุณหภูมิต่ำ ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนิยมใช้ตัวรับสองแบบคือพินโฟโตไดโอดและอวาลานซ์โฟโตไดโอด ในกรณีพินโฟโตไดโอดเป็นตัวรับแสงที่มีอัตราการขยายต่ำกว่าหนึ่ง

4.4 บทสรุป

อุปกรณ์รับแสงหรือโฟโตดีเทคเตอร์สำหรับภาครับในระบบสื่อสารทางแสงจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานโฟตอน (แสง) ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า พลังงานแสงที่ตกกระทบลงบนช่วงดูดกลืนพลังงาน (absorption region) กระตุ้นให้อะตอมในสารกึ่งตัวนำดูดกลืนพลังงานจนเกิดการแตกตัวเป็นคู่โฮล-อิเล็กตรอนใหม่จนมากพอที่ สามารถไหลผ่านข้ามรอยต่อชั้นสาร เป็นกระแสเอาต์พุตออกไปสู่โหลด โฟโตไดโอดที่นิยมใช้ในระบบสื่อสารทางแสงคือ พินโฟโตไดโอด, อะวาลานซ์โฟโตไดโอด และโฟโตทรานซิสเตอร์ วัสดุที่นิยมนำมาสร้างเป็นโฟโตไดโอดได้แก่ Si, Ge, GeAs, InGaAs และ InGaAsP วัสดุที่ใช้ทำโฟโตไดโอดจะเป็นตัวกำหนดค่าความยาวคลื่นใช้งาน โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 600-1,600 nm โดยทั่วไปพารามิเตอร์ที่กำหนดการทำงานของโฟโตไดโอดคือ ค่าความไว ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม ผลตอบสนองทางเวลา อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ผลกระทบของความร้อน, และกระแสมืด

ตัวรับแสงแบบพินโฟโตไดโอดจะมีอัตราการขยายสัญญาณต่ำกว่าหนึ่ง ส่วนอะวาลานซ์โฟโตไดโอดจะมีอัตราการขยายสัญญาณมากกว่าหนึ่ง โดยใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงเพื่อเพิ่มขบวนการแตกตัวของโฮล-อิเล็กตรอนใหม่แบบทวีคูณ (ปรากฏการอะวาลานซ์) ฉะนั้นอะวาลานซ์โฟโตไดโอดสามารถทำงานได้ดีที่ค่าพลังงานแสงที่ค่าต่ำ ๆ หรือสามารถทำงานได้แม้อัตราส่วนกำลังงานสัญญาณต่อกำลังงานสัญญาณรบกวนต่ำ แต่วงจรขับอะวาลานซ์โฟโตไดโอดมีความซับซ้อนสูง และมีความไวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

4.5 คำถามทบทวน

1. Photo detector ที่เป็นไดโอด มีกี่ชนิด อะไรบ้าง
2. APD ทำงานโดยอาศัยหลักการใด
3. แสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงแบบ LD และ LED มักมีหลายความยาวคลื่นแสง โดยจำนวนความยาวคลื่นแสงจะมากหรือน้อยสามารถพิจารณาจากอะไร
4. อุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์เช่น เลเซอร์ไดโอด หรือ แอลอีดี ชนิด Pig-Tail หมายถึงอุปกรณ์ประเภทใด
5. ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัด ระหว่างการใช้ LED และ LD ในการสร้างวงจรขับคืออะไร
6. จงหาค่าคาบเวลาที่ทำให้เลเซอร์ไดโอดเกิดสภาวะ Population Inversion เพื่อสร้างอัตราขยายแสงที่มากกว่าค่าการสูญเสียแสงในโพรงที่สร้างแสงเลเซอร์ได้ ถ้ากำหนดค่าแอมพลิจูดของพัลส์กระแส ค่ากระแสไบอัส ค่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และค่าช่วงเวลาเฉลี่ยของพาห์ประจุในบริเวณการรวมตัวกันใหม่ มีค่าเท่ากับ 0.5 A, 30 mA, 55 mA และ 1 ns
7. ข้อจำกัดพื้นฐานสำหรับอัตราการมอดูเลตของเลเซอร์ไดโอดคืออะไร
8. หากว่าความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานของ อิเลกตรอน ระหว่าง สถานะพื้น (ground state) และ สถานะกระตุ้น (excited state) เป็น 2eV ดังนั้นความยาวคลื่นของ photon จะมีค่าโดยประมาณเท่าใด เพื่อจะยิงเข้าไปแล้วทำให้ อิเลกตรอน กระโดดจากสถานะพื้น ไปยังสถานะกระตุ้น (Plauck's constant = 6.625x10-34 Js)
9. หากอุณหภูมิของตัว LD มีค่าเพิ่มขึ้นขณะทำงาน จะส่งผลอย่างไรต่อการทำงาน
10. ค่า Line width หรือ Spectral Width ของแหล่งกำเนิดแสงหมายถึงอะไร
11. เทคนิคที่ใช้ในการชดเชยปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของแหล่งกำเนิดแสงคืออะไร
12. จงอธิบายการเกิด Population Inversion ของเลเซอร์ไดโอด