



รายงานผลการวิจัย
ทุนวิจัยรับศวกิเชดสมโภช

4
เรื่อง

การสร้างและวิเคราะห์ห้ยลของโฟโตไดโอด

โดย

บรรยง โดประเสริฐพงษ์
ภนตรี ตรีศค้ศสูงขาร

๒๕๒๖

621.381
522
111775
7.2



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย รัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การสร้างและวิเคราะห์ผลของโฟโตไดโอด

โดย

บรรยง โตประเสริฐพงศ์
มนตรี สวัสดิ์ตฤงฆาร

พฤษภาคม 2526

ลับ
ลับ

ชื่อโครงการวิจัย การสร้างและวิเคราะห์ผลของโฟโตไดโอด

ชื่อผู้วิจัยหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรยง โดประเสริฐพงศ์

ชื่อผู้วิจัยร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร

เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ พฤษภาคม 2526

บทคัดย่อ

โฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างต่างๆกันได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษาเปรียบเทียบลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน ความรู้สึกต่อแสง ความไวของการตอบสนองและผลตอบสนองสัมพัทธ์ต่อสเปกตรัม พบว่าโฟโตไดโอดที่ใช้แวนผลึกที่มีความต้านทานจำเพาะสูง (3000 โอห์ม-เซนติเมตร) ใช้กระบวนการผลิตที่อุณหภูมิต่ำ และใช้ความหนาของชั้นป้องกันการสะท้อนแสงที่เหมาะสมให้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือมีความรู้สึกต่อแสงเท่ากับ 0.55 A/W rise time และ fall time มีค่า 30 ns และ 20 ns ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับระยะเวลาที่พาหะวิ่งผ่านเขตปลอดพาหะ และผลตอบสนองสัมพัทธ์ต่อสเปกตรัมมีค่ายอดที่ 0.87 μm หลังจากนั้นได้นำโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นไปเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดเบอร์ TIL 81 และ TIL 100 ซึ่งมีความไวสูงสุดที่มีขายในท้องตลาดพบว่าโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นมีสมรรถนะที่ดีกว่าในแง่ของความรู้สึกต่อแสงและความไวของการตอบสนอง ท้ายที่สุดได้นำโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการรับสัญญาณวิทยุ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้อนุมัติทุนรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2525 เพื่อสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณรัฐบาลฝรั่งเศสที่ได้บริจาคครุภัณฑ์หลักให้แก่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จผลตามเป้าหมาย

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาคีวิศวกรกรมไฟฟ้าและคณะกรรมการศาสตร์ที่ได้อำนวยความสะดวกเรื่องสถานที่ทำการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร. บัณฑิต โรจน์อารยานนท์ที่ได้ให้ยืมแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดและเครื่องมือในการวัดกำลังของแหล่งกำเนิดแสง

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ร่วมงานทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ และคุณสุภโชค ไทยน้อย ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณขวัญเรือน ชันทะกิตติ ที่ได้พิมพ์รายงานฉบับนี้ด้วยความมานะพยายาม เนื่องจากมีทั้งภาษาไทย ภาษาอังกฤษ และสัญลักษณ์วิทยาศาสตร์ประกอบกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

<u>บทที่</u>	<u>หน้า</u>
1 บทนำ	1
2 ทฤษฎีของโฟโตไดโอด	4
2.1 โฟโตคอนดักเตอร์	4
2.2 โฟโตไดโอด	9
2.2.1 การพิจารณาสมรรถนะของโฟโตไดโอด	9
2.2.1.1 กระบวนการพื้นฐานของการตรวจรับแสง	9
2.2.1.2 วัสดุที่ใช้ทำโฟโตไดโอด	10
2.2.1.3 การพิจารณาสัญญาณรบกวน	13
2.2.2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด	14
2.2.2.1 การเกิดพาหะนำไฟฟ้าอิสระในหัวต่อพี-เอ็น	14
2.2.2.2 ความกว้างของเขตปลอดพาหะและคาปาซิแตนซ์ของหัวต่อ	16
2.2.2.3 ความไวของการตอบสนอง	17
2.2.2.4 กระบวนการทริจิกจำนวนพาหะแบบอะวาลานซ์	18
2.2.3 โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น	21
2.2.4 โฟโตไดโอดแบบหัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ	23
2.2.5 โฟโตไดโอดแบบ Heterojunction	24
2.2.6 อะวาลานซ์โฟโตไดโอด	26
2.3 โฟโตทรานซิสเตอร์	28
3 การเตรียมงานและสร้างโฟโตไดโอด	30
3.1 การเตรียมอุปกรณ์และวัสดุวิจัย	30
3.2 การสร้างโฟโตไดโอดแบบต่างๆ	30
3.2.1 โฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น	30
3.2.2 โฟโตไดโอดแบบเอ็น-ไอ-พี	33
3.2.3 โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น	35

<u>บทที่</u>	<u>หน้า</u>
4 วิธีการวิเคราะห์โฟโตไดโอด	41
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน	41
4.2 การหาความรู้สึกต่อแสง	43
4.3 การหาความไวของการตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด	45
4.4 การหาผลตอบสนองลัมพีท	47
5 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลของโฟโตไดโอด	50
5.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน	51
5.1.1 แรงดันวงจรเปิด	51
5.1.2 กระแสลัดวงจรและกระแสรั่ว	53
5.2 ผลการวิเคราะห์ความรู้สึกต่อแสง	54
5.2.1 ความรู้สึกต่อแสงอินฟราเรดความยาวคลื่น 0.94 μm	55
5.2.2 ความรู้สึกต่อแสงจากหลอดทั้งสี่ เตน	58
5.3 ผลการวิเคราะห์ความไวของการตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด	59
5.4 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองลัมพีท	66
6 การเปรียบเทียบโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นกับที่ขายในท้องตลาด	71
6.1 การเปรียบเทียบความรู้สึกต่อแสง	71
6.2 การเปรียบเทียบความไวของการตอบสนอง	72
7 การนำโฟโตไดโอดไปประยุกต์ใช้งาน	75
8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
ภาคผนวก ก. การล้างและขัดผิวแว่นผลึกของซิลิกอน	79
ภาคผนวก ข. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยความร้อน	81
ภาคผนวก ค. การแพร่ซึมฟอสฟอรัส	83
ภาคผนวก ง. การแพร่ซึมโบรอน	85
ภาคผนวก จ. การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า	88
เอกสารอ้างอิง	89



1 บทนำ

ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) เป็นส่วนที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในระบบการสื่อสารโดยใช้ใยแสง (Optical-fiber communication system) ตัวตรวจจับแสงจะทำการ demodulate สัญญาณแสง นั่นคือแปลงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางแสงให้เป็นการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า และอาจจะเอาสัญญาณนี้เข้าวงจรขยายเพื่อนำไปใช้งานต่อไป จากบทบาทที่สำคัญยิ่งของตัวตรวจจับแสงในระบบทำให้เราต้องคำนึงถึงสมรรถนะในการทำงานที่ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ และความเข้ากันได้ (Compatibility) กับระบบ นอกจากนี้สิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาในการเลือกตัวตรวจจับแสงเพื่อใช้งานในระบบก็คือ ราคา

ตัวตรวจจับแสงนอกจากจะใช้งานโดยตรงในด้านสื่อสารสัญญาณแล้วยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่เราเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น ใช้ในการควบคุมการเปิด-เปิดประตูลิฟท์ ประตูสำนักงาน ใช้ในการนับบัตรเจาะรู (Punch card) ในระบบคอมพิวเตอร์ ใช้ในการนับธนบัตร และยังสามารถนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย เช่น ช่วยนับจำนวนเม็ดยาที่จะต้องบรรจุลงขวด เช็กระดับของเหลวที่จะต้องบรรจุลงในขวด ฯลฯ

สมรรถนะในการทำงานของตัวตรวจจับแสงจะต้องคำนึงถึงสิ่งสำคัญ 4 ประการต่อไปนี้

ก. มีการตอบสนอง (response) หรือความรู้สึก (sensitivity) สูงที่ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้งาน ในปัจจุบันความยาวคลื่นที่ใช้งานทางด้านสื่อสารโดยใช้แสง (Optical communication) อยู่ในช่วง $0.8-0.9 \mu\text{m}$ ซึ่งได้มาจาก AlGaAs lasers และ LEDs ในอนาคตความยาวคลื่นในการใช้งานจะขยับเข้าไปหา $1.1-1.6 \mu\text{m}$ เพราะว่าใยแสง (Optical fiber) มีการสูญเสียทางแสงน้อยกว่าและมี material dispersion ต่ำ

ข. ต้องมี bandwidth ค่อนข้างกว้างหรือความเร็วต่อการตอบสนองสูง (Speed of response) เพื่อที่จะสามารถรับข่าวสารที่ส่งมาได้ทันโดยที่สัญญาณไม่เพี้ยนไปเสียก่อน

ค. ตัวตรวจรับแสงจะต้องไม่เพิ่มสัญญาณรบกวน (noise) มากเกินไป ตัวตรวจรับแสงที่ดีจะต้องมีกระแสเมื่อไม่ได้รับแสง (Dark current) หรือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current) ต่ำ กระแสรั่ว (leakage current) และ shunt conductance ต่ำ และถ้าตัวตรวจรับแสงมีการขยายภายใน เช่น อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode) กลไกภายในตัวตรวจรับแสงที่ทำให้เกิดการขยายสัญญาณต้องทำให้เกิดสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด

ง. คุณสมบัติต่างๆ ของตัวตรวจรับแสงจะต้องมี susceptibility (Susceptibility) ต่ำต่อการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม เช่น ความรู้สึก (Sensitivity) สัญญาณรบกวนและการขยายภายในของตัวตรวจรับแสงโดยทั่วๆ ไปมักจะแปรตามอุณหภูมิ ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้งานบางอย่างจำเป็นต้องมีการชดเชย (Compensate) ผลอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ

ส่วนความเข้ากันได้ (Compatibility) จะต้องคำนึงถึงขนาดของตัวตรวจรับแสง (เมื่อติดตั้งบน header หรือ package แล้ว) การเชื่อมต่อ (Coupling) เข้ากับไฟเบอร์และวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง และแหล่งจ่ายไฟตรงที่จะต้องใช้ ตัวตรวจรับแสงที่ใช้งานทางด้านสื่อสารที่ดีจะต้องมีขนาดเล็ก เพื่อที่จะสามารถรวมหุ้ม (package) ได้กับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์อื่นๆ และเชื่อมต่อเข้ากับไฟเบอร์ได้ง่าย นอกจากนั้นยังต้องใช้กับแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำและกระแสต่ำ

Photomultiplier มีสมรรถนะที่ดีแต่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ใช้กับแรงดันไฟฟ้าสูง และราคาค่อนข้างสูงทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้งานในด้านการสื่อสารโดยใช้ไฟเบอร์ ส่วนซิลิคอน-สเตทโฟโตไดโอด (Solid-state photodiode) รวมข้อดีของสมรรถนะในการทำงานและความเข้ากันได้ (Compatibility) และมีราคาค่อนข้างต่ำ ในปัจจุบันโฟโตไดโอดที่ทำด้วยซิลิคอนมี sensitivity สูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ $0.85 \mu\text{m}$ และชนิดที่ใช้งานทางด้านสื่อสารมีความไวต่อการตอบสนองสูง (ถึง 100 MHz) มีกระแสเมื่อไม่มีแสง (dark current) ต่ำ shunt conductance น้อยมาก ส่วนชนิดที่มีการขยายภายในก็มีอัตราขยายค่อนข้างสูงโดยมีสัญญาณรบกวนต่ำ และมีเสถียรภาพและอายุการใช้งานสูง เนื่องจากว่ามีขนาดเล็กทำให้สามารถเชื่อมต่อเข้ากับใยแสง (optical-fiber) และวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ได้ง่าย และต้องการแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงต่ำ

เนื่องจากการตอบสนองของสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากซิลิกอนตกลงมากที่ความยาวคลื่นของแสงเกินกว่า 1 μm ทำให้ไม่สามารถที่จะใช้งานได้เหมาะสมในอนาคตที่ความยาวคลื่นประมาณ 1.3 μm งานวิจัยในต่างประเทศในปัจจุบันได้เน้นไปยังสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) น้อยกว่าของซิลิกอน ซึ่งจะให้ผลตอบสนองที่ดีขึ้นที่ความยาวคลื่นสูงกว่า

Anderson, DiDomenico, and Fisher¹ และ Melchoir^{2,3} ได้ review เกี่ยวกับตัวตรวจจับแสงที่มีความไวสูง review ที่น่าสนใจเกี่ยวกับตัวตรวจจับแสงอินฟราเรดได้กล่าวถึงในหนังสือ "Semiconductor and Semimetals"⁴ รายละเอียดเกี่ยวกับอะวาลานซ์โฟโตไดโอดได้กล่าวถึงโดย Stillman and Wolfe⁵ ส่วน Lee and Li ได้พูดถึงตัวตรวจจับแสงที่ใช้ในด้านการสื่อสารโดยใช้ใยแสง⁶ และ Staff ของ Hewlett-Packard ได้กล่าวถึงโฟโตไดโอดในบทที่ 4 ของหนังสือ Optoelectronics/Fiber-Optics Applications Manual⁷

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2 ฤทธิ์ของโฟโตไดโอด

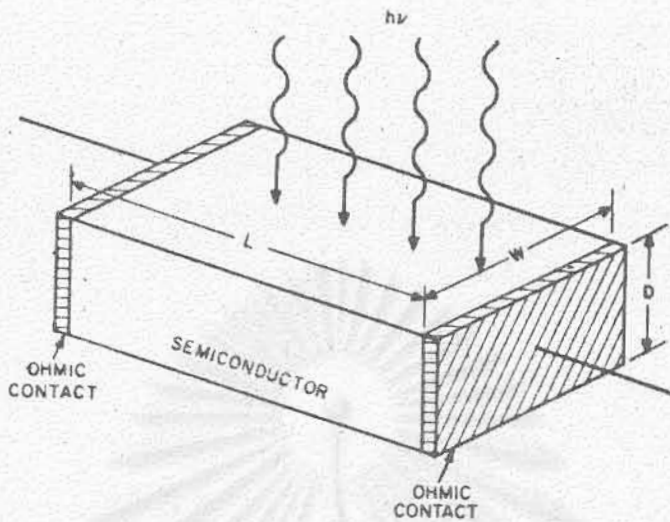
โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่อาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เดียวกันกับที่เกิดขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์ ข้อแตกต่างระหว่างโฟโตไดโอดกับเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือ โฟโตไดโอดถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ตรวจจับแสงเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ตอนสร้างจึงต้องคำนึงถึงความไวของการตอบสนอง (Speed of response) ต่อแสงที่ความยาวคลื่นนั้นๆ และมีขนาดเล็กเพื่อให้เชื่อมต่อได้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์และโยแสง และเวลาใช้งานโฟโตไดโอดต้องมีแหล่งจ่ายไฟตรงเลี้ยง โดยการไบแอสย้อน ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า การสร้างไม่คำนึงถึงความไวของการตอบสนอง พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมาก และไม่ต้องมีแหล่งจ่ายไฟตรงเลี้ยงตัวเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่ตัวเซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงเสียเอง

ตัวตรวจจับแสง (photodetector) สารกึ่งตัวนำ ไม่ใช่จะมีเฉพาะโฟโตไดโอด เท่านั้น ยังมีโฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor) นอกจากนั้นยังมีโฟโตไดโอดแบบอื่นๆที่ไม่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ แต่จะยกเอาทฤษฎีการทำงานของตัวตรวจจับแสงต่างๆ มากล่าวถึงในบทนี้ด้วยพอสังเขปเพื่อประโยชน์ในการค้นคว้าต่อไป

กลไกการทำงานของตัวตรวจจับแสงโดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- ก. พหุหน้าไฟฟ้าอิสระถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นโดยพลังงานแสง (โฟตอนที่มีพลังงานที่เหมาะสม)
- ข. พหุหน้าไฟฟ้ามีการถ่ายเทหรือถูกทวีจำนวนขึ้นโดยกลไกภายในของโครงสร้างตัวตรวจจับแสง
- ค. เกิดกระแสไหลไปยังวงจรภายนอกในรูปของสัญญาณไฟฟ้า

2.1 โฟโตคอนดักเตอร์ (Photoconductor) โฟโตคอนดักเตอร์เป็นโครงสร้างง่ายๆ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำในรูปของแท่งหรือแผ่นบาง (thin film) ซึ่งมีผิวสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contacts) ติดอยู่ที่ด้านสองด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 2.1

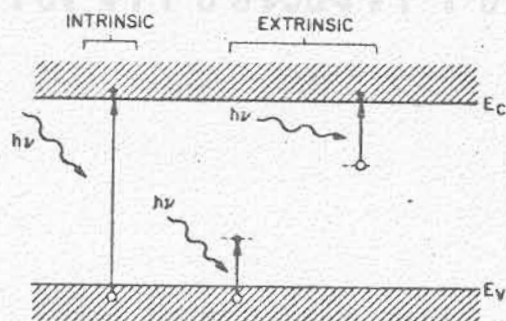


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดซึ่งประกอบด้วยแท่งสารกึ่งตัวนำและผิวสัมผัสโอห์มิกที่ด้านสองด้านตรงข้ามกัน

เมื่อแสงตกกระทบบนผิวของโฟโตไดโอด พหุพลังงานไฟฟ้าอิสระจะถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งในสองกระบวนการคือ (รูปที่ 2.2)

ก. band-to-band transition (หรือเรียกว่า intrinsic transition) การทรานซิชัน (transition) แบบนี้ อิเล็กตรอนจะกระโดดจากแถบวาเลนซ์ (Valence band) ไปยังแถบความนำ (Conduction band)

ข. Extrinsic transition คือการทรานซิชันที่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) เช่นการที่อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปยังระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 2.2 กระบวนการกระตุ้นด้วยแสงแบบ Intrinsic และ Extrinsic

ไม่ว่าพาหะนำไฟฟ้าอิสระจะถูกกระตุ้นขึ้นโดยวิธีการใดก็ตาม สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของโฟโตคอนดักเตอร์จะสูงขึ้น สำหรับโฟโตคอนดักเตอร์ซึ่งถูกกระตุ้นแบบ Intrinsic สภาพการนำไฟฟ้าถูกกำหนดโดย

$$\sigma = q (\mu_n n + \mu_p p) \quad (2.1)$$

เมื่อ σ คือสภาพการนำไฟฟ้า

q คือประจุของอิเล็กตรอนหนึ่งตัว

μ_n คือความคล่องตัว (mobility) ของอิเล็กตรอน

μ_p คือความคล่องตัวของโฮล

n คือจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ

p คือจำนวนโฮลอิสระ

สภาพการนำไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของพาหะนำไฟฟ้าอิสระอันได้แก่ อิเล็กตรอนและโฮลเมื่อถูกฉายด้วยแสง ความยาวคลื่นวิกฤต (Critical wavelength or Cutoff wavelength) ถูกกำหนดโดย

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g \text{ (eV)}} \quad (\mu\text{m}) \quad (2.2)$$

เมื่อ λ_c คือความยาวคลื่นวิกฤต

h คือค่าคงที่ของพลังค์

c คือความเร็วของแสงในสุญญากาศ

E_g คือช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

สำหรับความยาวคลื่นที่สั้นกว่าความยาวคลื่นวิกฤต แสงที่ตกกระทบจะถูกดูดกลืนโดยสารกึ่งตัวนำ และคู่อิเล็กตรอนโฮลจะถูกสร้างขึ้น ส่วนการกระตุ้นแบบ Extrinsic สภาพการนำไฟฟ้าด้วยแสง (Photoconductivity) เกิดขึ้นโดยการดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่เท่ากับหรือมากกว่าผลต่างระหว่างระดับพลังงานที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงานกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือแถบความนำ ซึ่งในกรณีหลังนี้ความยาวคลื่นวิกฤตหาได้จากสมการ (2.2)

โดยแทนค่า E_g ด้วยผลต่างของระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องในการทรานซิชัน
สมรรถนะการทำงานโดยทั่วไปของตัวตรวจจับแสงและโดยเฉพาะอย่างยิ่งของ
โฟโตคอนดักเตอร์ขึ้นกับพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ

- ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency) หรืออัตราขยาย (gain)
- เวลาของการตอบสนอง (Response time)
- ความรู้สึกต่อแสง (Sensitivity หรือ Detectivity)

พิจารณาการทำงานของโฟโตคอนดักเตอร์ในรูปที่ 2.1 ที่เวลา $t=0$ จำนวน
พาหะนำไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรโดยปริมาณของฟลักซ์ของโฟตอน (Photon
flux) ที่กำหนดมีค่า n_0 สมมติว่าฟลักซ์ของโฟตอนคงที่ตลอดเวลา เมื่อเวลาผ่านไป
 t จำนวนพาหะนำไฟฟ้า $n(t)$ ในหนึ่งหน่วยปริมาตรลดลงโดยการรวมตัวใหม่
(Recombination) เหลือ $n = n_0 \exp(-t/\tau)$ เมื่อ τ คือเวลาชีวิตของพาหะ
ถ้าโฟโตคอนดักเตอร์มีพื้นที่ผิวรับแสง $A = WL$ จำนวนโฟตอนที่ตกลงบนผิวรับแสงจะเท่ากับ
 $P_{opt}/h\nu$ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา เมื่อ P_{opt} คือกำลังงานของแสงที่ตกกระทบ และ $h\nu$
คือพลังงานของโฟตอนหนึ่งตัว

ในสภาวะอยู่ตัว อัตราการเกิดของพาหะย่อมเท่ากับอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ
ถ้าความหนา D ของโฟโตคอนดักเตอร์หนากว่าความลึกของการทะลุทะลวงของแสงมาก
($1/\alpha$) เมื่อ α คือสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง (Absorption coefficient, cm^{-1})
อัตราการเกิดของพาหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในสภาวะอยู่ตัวมีค่า

$$G = \frac{n}{\tau} = \frac{\eta (P_{opt}/h\nu)}{WLD} \quad (2.3)$$

เมื่อ η คือ quantum efficiency (จำนวนพาหะที่ถูกสร้างขึ้นต่อโฟตอน
หนึ่งตัว)

n คือความหนาแน่นของพาหะ (จำนวนพาหะต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร)

กระแสอันเกิดจากแสงที่ไหลผ่านอิเล็กโทรดมีค่า

$$I_p = (q\xi) WD = (qn_n \xi) WD = (qnv_d) WD \quad (2.4)$$

เมื่อ ξ คือสนามไฟฟ้าภายในโฟโตคอนดักเตอร์

v_d คือความเร็วลอยเลื่อน (Drift velocity)

แทนค่า n จากสมการ (2.3) ลงในสมการ (2.4) ได้

$$I_p = q \eta \left(\frac{P_{opt}}{h\nu} \right) \left(\frac{\mu_n \tau \xi}{L} \right) \quad (2.4ก)$$

ถ้าเรากำหนดให้ primary photocurrent $I_{ph} = q \left(\eta \frac{P_{opt}}{h\nu} \right)$ อัตราขยายของกระแสโฟโต (photocurrent gain) จะหาได้จากสมการ (2.4 ก)

$$\text{gain} = \frac{I_p}{I_{ph}} = \frac{\mu_n \tau \xi}{L} = \frac{\tau}{t_r} \quad (2.5)$$

เมื่อ $t_r = L/v_d$ คือ carrier transit time สำหรับโฟโตคอนดักเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดสั้นและมีเวลาชีวิตยาว อัตราขยายจะมีค่ามากกว่าหนึ่งมาก เนื่องจากโฟโตคอนดักเตอร์ใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมากและใช้สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ทำให้เวลาของการตอบสนองมีค่าสูงเมื่อเทียบกับโฟโตไดโอด ค่าตัวอย่าง (Typical value)^{2,8} ของอัตราขยายและเวลาของการตอบสนองของตัวตรวจจับแสงแบบต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ค่าตัวอย่างของอัตราขยายและเวลาของการตอบสนอง

Photodetector	Gain	Response Time (s)	Operating Temperature (K)
Photoconductor	$1 \sim 10^6$	$10^{-3} \sim 10^{-8}$	4.2 ~ 300
p-n junction	1	10^{-11}	300
p-i-n junction	1	$10^{-8} \sim 10^{-10}$	300
Metal-semiconductor diode	1	10^{-11}	300
Avalanche photodiode	$10^2 \sim 10^4$	10^{-10}	300
Bipolar phototransistor	10^2	10^{-8}	300
Field-effect phototransistor	10^2	10^{-7}	300

2.2 โฟโตไดโอด

2.2.1 การพิจารณาสมรรถนะของโฟโตไดโอด (Performance consideration) ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงหลายๆ แฟคเตอร์ซึ่งกำหนดสมรรถนะการทำงานของโฟโตไดโอดสารกึ่งตัวนำ สิ่งที่จะพูดถึงได้แก่

- กระบวนการพื้นฐานของการตรวจจับแสง
- วัสดุที่ใช้ทำโฟโตไดโอด
- การพิจารณาสัญญาณรบกวน

2.2.1.1 กระบวนการพื้นฐานของการตรวจจับแสง (Basic Detection Process) กระบวนการพื้นฐานของการตรวจจับแสงในโฟโตไดโอดสารกึ่งตัวนำ เกี่ยวข้องกับการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นโดยแสงในบริเวณที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง เช่น ในเขตปลอดพาหะ (Depletion region) ของหัวต่อพี-เอ็น (PN junction) คู่พาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกจากกันโดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าไหลไปยังอิเล็คโทรด เพื่อที่จะให้ประสิทธิภาพควอนตัม (η) สูง เขตปลอดพาหะจะต้องกว้างเพื่อให้บริเวณดูดกลืนแสงมาก แต่ระยะเวลาที่พาหะวิ่งระหว่างอิเล็คโทรดเป็นตัวกำหนดความไวของการตอบสนองของโฟโตไดโอด ถ้าจะให้เวลาของการตอบสนองน้อยเขตปลอดพาหะรวมทั้งชั้นสารกึ่งตัวนำจะต้องบาง ดังนั้นในการสร้างโฟโตไดโอด ถ้าต้องการให้ความไวของการตอบสนองสูง จะทำให้ประสิทธิภาพควอนตัมต่ำนั่นก็คือ ความรู้สึกต่อแสง (Sensitivity or Responsivity) ต่ำ

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption coefficient) α ที่ความยาวคลื่น λ กระแสโฟโตที่ถูกกระตุ้นโดยแสงตกกระทบบนซึ่งมีพลังงาน P_{opt} มีค่า

$$I_p = P_{opt} \frac{q(1-R)(1-e^{-\alpha W})}{h\nu} \quad (2.6)$$

เมื่อ $h\nu$ คือพลังงานโฟตอน $= 1.24 / \lambda$ eV และ λ มีหน่วยเป็น ไมครอน

R คือ Fresnel reflection coefficient ที่ interface ระหว่างสารกึ่งตัวนำ และอากาศ

W เป็นความกว้างของบริเวณที่ดูดกลืนแสง

ในสมการที่ (2.6) นี้สมมุติว่าการดูดกลืนแสงเป็นแบบ band-to-band เท่านั้น ประสิทธิภาพควอนตัม η มีค่า

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{จำนวนคู่ของพาหะนำไฟฟ้าอิสระที่ถูกสร้างขึ้น}}{\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ}} \\ &= \frac{I_p / q}{P_{opt} / h\nu} \end{aligned} \quad (2.7 \text{ ก})$$

$$= (1-R) (1-e^{-\alpha W}) \quad (2.7 \text{ ข})$$

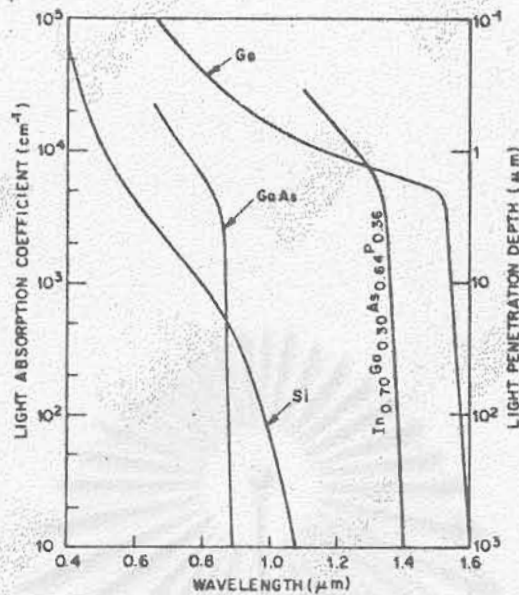
Sensitivity หรือ Responsivity \mathcal{R} ซึ่งใช้ในการหาสมรรถนะของโฟโตไดโอด ตามคำจำกัดความมีค่า

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{opt}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda (\mu\text{m})}{1.24} \text{ A/W} \quad (2.8)$$

ในกรณีที่โฟโตไดโอดเป็นแบบอุดมคติคือ $\eta = 1$

$$\mathcal{R} = \frac{\lambda (\mu\text{m})}{1.24} \text{ A/W} \quad (2.9)$$

2.2.1.2 วัสดุที่ใช้ทำโฟโตไดโอด เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำขึ้นกับความยาวคลื่นแสง ในอุดมคติจึงควรเลือกวัสดุที่จะทำโฟโตไดโอดที่มีช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) เล็กกว่าพลังงานโฟตอนที่มีความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดที่จะใช้งานเล็กน้อย เมื่อเลือกวัสดุได้ตามเงื่อนไขนี้แล้ว สัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าสูงทำให้ประสิทธิภาพควอนตัมและความไวของการตอบสนองดี สัมประสิทธิ์การดูดกลืนและ

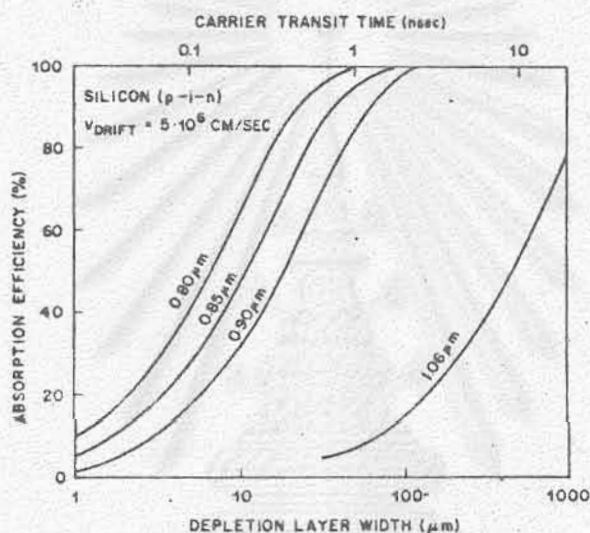


รูปที่ 2.3 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความลึกของการทะลุทะลวง (Penetration depth) vs ความยาวคลื่นสำหรับซิลิกอน เยอรมันเนียม แกลเลียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์

ความลึกของการทะลุทะลวง (Penetration depth) $1/\alpha$ ของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่รู้จักกันดีสามชนิดในการทำโฟโตไดโอด (ซิลิกอน (Si) เยอรมันเนียม (Ge) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs)) ได้แสดงในรูปที่ 2.3 สำหรับความยาวคลื่นแสงในช่วง $0.4-1.6 \mu\text{m}$ ส่วนอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ (InGaAsP) ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำควอเตอร์นารี (Quaternary compound) ซึ่งในปัจจุบันใช้ทำเลเซอร์ (LASER) และ ไดโอดเปล่งแสง (LED) ซึ่งทำงานในย่านความถี่ $1.3 \mu\text{m}$ ก็ได้แสดงไว้ในรูปด้วย จะเห็นจากรูปได้ว่าวัสดุทั้งสี่ชนิดสามารถใช้ทำโฟโตไดโอดซึ่งทำงานที่ความยาวคลื่น $0.9 \mu\text{m}$ ได้ แต่มีเพียงเยอรมันเนียม อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ (และสารประกอบกึ่งตัวนำควอเตอร์นารีบางชนิด เช่น GaAsSb) ซึ่งเหมาะที่จะใช้งานในย่าน $1.3 \mu\text{m}$ ข้อดีของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์และสารประกอบกึ่งตัวนำอื่นๆ ก็คือสามารถที่จะแปรค่าช่องว่างแถบพลังงานได้โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบของสาร สำหรับโฟโตไดโอดที่ทำด้วยเยอรมันเนียมมีกระแสมืด (Dark current) สูงกว่าที่ทำจากซิลิกอนเนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่า

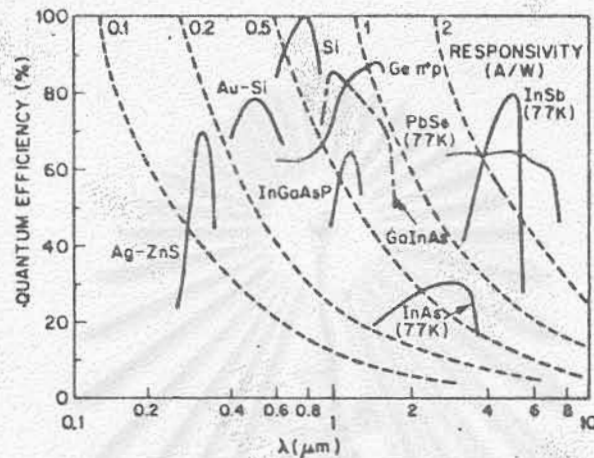
ซิลิกอนเป็นวัสดุที่ถูกเลือกใช้สำหรับแสงในย่านที่ตามองเห็นจนถึง $1 \mu\text{m}$ เพราะเทคโนโลยีซิลิกอนได้รับการพัฒนาสูงมาก และเพราะซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงาน

แบบ indirect (Indirect gap semiconductor) ซึ่งสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงจะค่อยๆ เปลี่ยนไปตามความถี่ ทำให้โฟโตไดโอดที่ทำจากซิลิกอนสามารถ ตรวจจับแสงได้ในย่านกว้างและสามารถกำหนดความไวของการตอบสนองต่อแสงได้โดยการแปรค่าความกว้างของเขตปลอดพาหะ การที่ความเร็วของการตอบสนองหรือเวลาที่พาหะวิ่งผ่านโฟโตไดโอด (Carrier transit time) ก็จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดกลืนเลวลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ประสิทธิภาพการดูดกลืนพล็อตกับความกว้างของเขตปลอดพาหะและเวลาที่พาหะวิ่งผ่านโฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น ที่ทำด้วยซิลิกอน โดยมีความยาวคลื่นของแสงเป็นตัวแปร

ส่วนรูปที่ 2.5 เป็นการพล็อตตัวอย่างของประสิทธิภาพควอนตัมในฟังก์ชันของความยาวคลื่นสำหรับโฟโตไดโอดที่มีความไวสูงบางชนิด เส้นโค้งแสดง responsivity ก็ปรากฏอยู่ในรูปคล้าย จะเห็นว่าแสงในย่านอุลตราไวโอเล็ต และในย่านที่ตามนุษย์มองเห็นได้ โฟโตไดโอดแบบหัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor photodiode) จะมีประสิทธิภาพควอนตัมที่ดี ในย่านอินฟราเรด-ใกล้ (near-infrared) โฟโตไดโอดที่ทำจากซิลิกอนที่มีชั้น Antireflection จะให้ค่าประสิทธิภาพสูงมากถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่น 0.8-0.9 μm ในช่วงความยาวคลื่น 1.0-1.6 μm โฟโตไดโอดที่ทำจากเยอรมันเนียม สารประกอบกึ่งตัวนำเตอร์นารี และสารประกอบกึ่งตัวนำควอเตอร์นารีจะ



รูปที่ 2.5 ประสิทธิภาพควอนตัมและความรู้สึกต่อแสง (responsivity) ของโฟโตไดโอดแบบต่างๆ

มีประสิทธิภาพควอนตัมที่ดี สำหรับความยาวคลื่นที่ยาวกว่านี้ โฟโตไดโอดจะถูกทำให้เย็นด้วยก๊าซเหลว (เช่น ไนโตรเจนเหลวที่ 77°K) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพควอนตัมที่ดี

2.2.1.3 การพิจารณาสัญญาณรบกวน (Noise considerations)

สมรรถนะของระบบสื่อสารถูกกำหนดด้วยสัญญาณรบกวนที่ภาครับ (ที่มีตัวตรวจจับแสง) สัญญาณรบกวนจะทำให้ประสิทธิภาพของการทำงานด้อยลง การเข้าใจถึงที่มาของสัญญาณรบกวนและลักษณะสมบัติของมันมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบสื่อสาร สัญญาณรบกวนมีสาเหตุมาจากหลายประการดังนี้

- ก. สัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในบรรยากาศ ถ้าสัญญาณถูกส่งโดยใช้ใยแสง ปัญหานี้ก็จะมีไม่เกิดขึ้น
- ข. สัญญาณรบกวนเกิดจาก LED เอง
- ค. quantum noise เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของจำนวนพาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งเกิดขึ้นเสมอและเป็นตัวการสำคัญในการกำหนด sensitivity หรือ responsivity ในภาครับ

ง. สัญญาารบกวนอันเนื่องมาจากกระแสมืดและกระแสรั่วที่ผิวซึ่งสามารถทำให้ลดน้อยลงได้โดยการระมัดระวังในขั้นตอนการออกแบบและในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด

2.2.2 หลักการทํางานของโฟโตไดโอด ให้หัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการเกิดของพาหะนำไฟฟ้าอิสระในหัวต่อพี-เอ็น ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของเขตปลอดพาหะและคาปาซิแตนซ์ที่หัวต่อ (junction capacitance) ความไวของการตอบสนองซึ่งถูกกำหนดโดยเวลาที่พาหะเคลื่อนที่ในโฟโตไดโอดด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า (drift) และด้วยการแพร่ซึม (diffusion) และกระบวนการที่วัดจำนวนพาหะแบบอะวาลานซ์

2.2.2.1 การเกิดพาหะนำไฟฟ้าอิสระในหัวต่อพี-เอ็น เมื่อโฟตอนตกกระทบโฟโตไดโอดมีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำโฟโตไดโอด พลังงานโฟตอนจะถ่ายเทให้กับสารกึ่งตัวนำและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้น โฟโตไดโอดที่จัดจะถูกออกแบบให้พลังงานโฟตอนถูกดูดกลืนมากที่สุด ในเขตปลอดพาหะ เนื่องจากในเขตปลอดพาหะมีสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเองร่วมกับสนามไฟฟ้าอื่น เนื่องมาจากโฟโตไดโอดถูกไบแอสขั้ว อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะถูกกวาด (drift) ไปคนละทางโดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนจะวิ่งไปทางด้านเอ็นของหัวต่อและโฮลจะวิ่งไปทางด้านพีของหัวต่อดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนพาหะที่ถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นนอกเขตปลอดพาหะแต่ห่างออกไปไม่เกินความยาวของการแพร่ซึม (Diffusion length) จะแพร่ซึม (diffuse) เข้าหาเขตปลอดพาหะ เช่น อิเล็กตรอนในสารพีจะแพร่ซึมเข้าหาเขตปลอดพาหะและถูกกวาดไปยังด้านตรงข้ามซึ่งเป็นสารเอ็นโดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า และโฮลในสารเอ็นจะแพร่ซึมเข้าหาเขตปลอดพาหะและถูกกวาดไปยังด้านตรงข้ามซึ่งเป็นสารพีโดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าเช่นกัน พาหะนำไฟฟ้าที่ถูกแยกออกจากกันโดยสนามไฟฟ้าก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ทำให้เกิดกระแสโฟโต (photocurrent) I_p เมื่อไหลผ่านโหลดจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลดซึ่งสามารถดูรูปร่างของสัญญาณได้โดยใช้ ออสซิลโลสโคป

ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ความถี่ต่ำของโฟโตไดโอดประกอบขึ้นด้วยกระแสโฟโตอันเนื่องมาจากแสงและกระแสของไดโอด เมื่อไม่มีแสง

$$I = I_o \left(\exp \frac{qV}{nkT} - 1 \right) - I_p \quad (2.10)$$

เมื่อ I_0 คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Saturation current) หรือ กระแสมืด (Dark current) ของไดโอดเมื่อแรงดันไบแอส เป็นศูนย์

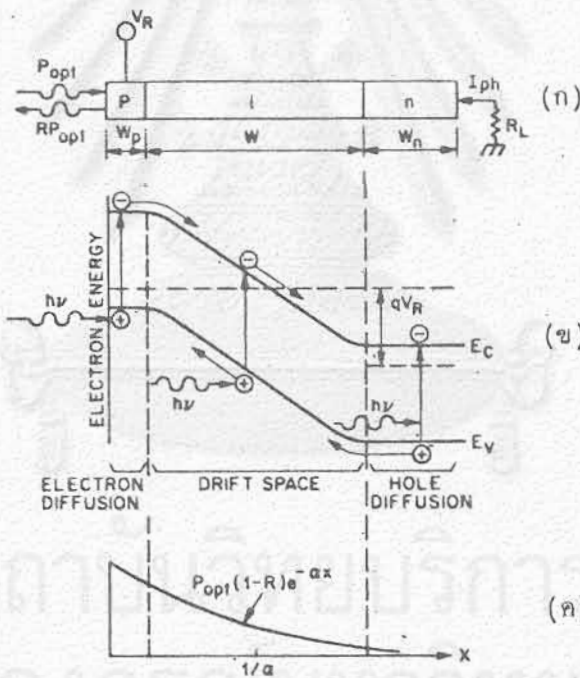
n คือ ideality factor ซึ่งมีค่าระหว่าง 1 กับ 2

k คือค่าคงที่ของ Boltzmann

T คืออุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวิน

V คือแรงดันที่บริเวณหัวต่อ

I_p คือกระแสโฟโตอันดุกกระตุ้นจากแสง



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมแสดงให้เห็นหลักการทำงานของโฟโตไดโอด 2.6 (ก) เป็นภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น 2.6 (ข) เป็นแถบพลังงานของโฟโตไดโอดที่ถูกไบแอสย้อน 2.6 (ค) เป็นการดูดกลืนแสงที่ระยะต่างๆกันในตัวโฟโตไดโอด

ถ้าแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ โฟโตไดโอดจะทำงานเหมือนเซลล์แสงอาทิตย์ และถ้าโหลดมีค่ามากหรือปล่อยไว้เป็นวงจรเปิด พหุคูณที่ถูกกระตุ้นขึ้นโดยแสงจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันคร่อมหัวต่อซึ่งมีค่า

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_p}{I_o} + 1\right) \quad (2.11)$$

ถ้าแสงมีความเข้มต่ำมากๆ คือ $I_p \ll I_o$ แรงดัน V จะแปรเป็นเชิงเส้นกับความเข้มแสง

แต่ในการทำงานของโฟโตไดโอด มันจะถูกไบแอสด้วยแรงดันค่าหนึ่งซึ่งมากพอที่จะทำให้เทอม $\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \ll 1$ ดังนั้นกระแสที่ชั่วออก I จะแปรเป็นเชิงเส้นกับความเข้มของแสง

$$I = -(I_o + I_p) \quad (2.12)$$

ภายใต้การไบแอสย้อนบริเวณหัวต่อ เขตปลอดพาหะจะกว้างขึ้น คาปาซิแตนซ์ของหัวต่อจะลดลง คู่อิเล็กทรอนิกส์-โฮลจะถูกสร้างมากขึ้นในเขตปลอดพาหะซึ่งมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นโฟโตไดโอดจะมีความไวของการตอบสนองและ sensitivity สูง

2.2.2.2 ความกว้างของเขตปลอดพาหะ (Depletion layer width) และคาปาซิแตนซ์ของหัวต่อ (Junction capacitance) ความกว้างของเขตปลอดพาหะในหัวต่อพีเอ็นขึ้นกับแรงดันไบแอส. ขนาดของการโด๊ปสารเจือปน และ profile ของสารเจือปน ในกรณีที่ profile ของหัวต่อเป็นแบบ abrupt (abrupt junction) ความกว้างของเขตปลอดพาหะ W มีค่า

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} (V_{bi} + V_R) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

- เมื่อ ϵ_s คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำโฟโตไดโอด
 V_{bi} คือแรงดันภายในที่เกิดขึ้นในสภาวะสมดุลเมื่อไม่มี V_R
 V_R คือแรงดันไบแอสย้อนที่ใส่ให้กับโฟโตไดโอด
 N_A คือความเข้มข้นของสารเจือปนแบบผู้รับ (Acceptor concentration)
 N_D คือความเข้มข้นของสารเจือปนแบบผู้ให้ (Donor concentration)

ค่าของ V_{bi} ขึ้นกับชนิดของสารและขนาดของการโด๊ปเช่น ซิลิกอนมีค่าประมาณ 0.6 V ของ GaAs มีค่าประมาณ 1.1 V จะเห็นว่า W จะมีค่ามากขึ้นถ้าให้ N_A หรือ N_D มีค่าน้อยนั่นคือโด๊ปด้วยสารเจือปนจำนวนน้อยๆ หรือให้เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ซึ่งเราเรียกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์นี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิด I เช่น ใน PIN diode เป็นต้น

คาปาซิแตนซ์ของหัวต่อจะแปรตามแรงดันไบแอสดังนี้

$$C = \frac{\epsilon_s A}{W} = A \left[\frac{2}{q\epsilon_s} (V_{bi} + V_R) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{-1/2} \quad (2.14)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ภาคตัดขวางของหัวต่อ จะเห็นว่าถ้าโด๊ปสารเจือปนน้อยๆและให้แรงดันไบแอสย้อนมากๆ C จะมีค่าน้อย

2.2.2.3 ความไวของการตอบสนอง (Speed of Response)

ความไวของการตอบสนองถูกกำหนดโดยผลรวมของสามแฟกเตอร์คือ

ก. การแพร่ซึมของพาหะนำไฟฟ้าในเขตปลอดพาหะ ซึ่งความเร็วของการแพร่ซึมช้ามากตัวอย่างเช่น การแพร่ซึมของโฮลในซิลิกอนซึ่งหนา 10 μm ต้องใช้เวลาจนถึง 40 ns

ข. การ drift ของพาหะนำไฟฟ้าในเขตปลอดพาหะซึ่งไวมากและขึ้นกับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ความเร็วสูงสุดของพาหะที่สามารถวิ่งในเขตปลอดพาหะมีค่าจำกัดซึ่งถูกกำหนดโดย Scattering-limited velocity หรือความเร็วอิ่มตัว (Saturated velocity) ซึ่งมีค่าประมาณ 10^7 cm/s ในซิลิกอน การที่ความเร็วจะ

ถึงค่าอิมพัลส์จะต้องไบแอสย้อนให้กับโฟโตไดโอดให้มีความเข้มของสนามไฟฟ้าในเขตปลอดพาหะ อย่างน้อย 2×10^4 V/cm ถ้าเขตปลอดพาหะถูกไบแอสให้อยู่ในเงื่อนไขนี้และเขตปลอดพาหะหนา 10 μm เวลาที่พาหะต้องใช้ในการวิ่งผ่านจะน้อยมากเพียง 0.1 ns เท่านั้น

ค. RC time constant ของวงจรรวบรวมประจุตัว C รวม ถึงคาปาซิแตนซ์ของตัวโฟโตไดโอดด้วย

จะเห็นว่าพาหะนำไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นนอกเขตปลอดพาหะจะต้องใช้เวลานานกว่า จะแพร่ซึมเข้าหาบริเวณหัวต่อทำให้เกิดการหน่วง (delay) ของสัญญาณขึ้น เพื่อที่จะลด การหน่วงนี้โฟโตไดโอดจะถูกออกแบบให้มีหัวต่ออยู่ใกล้กับผิวรับแสงมากที่สุด และถ้าเขตปลอด พาหะมีความกว้างมาก (ใน order เดียวกันกับความลึกของการทะลุทะลวงของแสง $1/\alpha$) โดยการไบแอสย้อนมากพอ แสงเกือบทั้งหมดจะถูกดูดกลืนในเขตปลอดพาหะแต่เขตปลอดพาหะ นี้ก็ไม่ควรกว้างเกินไป (ชิ้นสารที่ทำโฟโตไดโอดไม่ควรหนาเกินไป) เพราะจะทำให้เวลาที่ พาหะ drift นานไปทำให้การตอบสนองช้าไปด้วย และถ้าให้เขตปลอดพาหะบางไปจะทำให้ คาปาซิแตนซ์ของหัวต่อมาก มีผลต่อความไวของการตอบสนองเช่นเดียวกัน

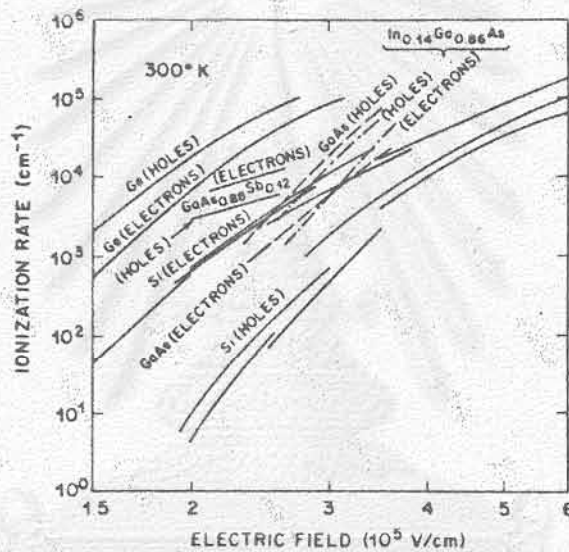
จะเห็นว่าความไวของการตอบสนองมีผลโดยตรงต่อ sensitivity ของ โฟโตไดโอดดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในการออกแบบโฟโตไดโอดจะต้องคำนึงถึงผลสองประการ นี้ให้มาก การจะเลือกความไวของการตอบสนองสูงหรือ sensitivity ที่ดีขึ้นกับชนิด ของการใช้งาน

2.2.2.4 กระบวนการทวีคูณจำนวนพาหะแบบอะวาลานซ์

เมื่อสนามไฟฟ้าในเขตปลอดพาหะที่ถูกไบแอสย้อนมีค่าสูงมาก (เกินกว่า 10^5 V/cm) อิเล็ก- ตรอนและโฮลอิสระสามารถที่จะชนกับวาเลนซ์อิเล็กตรอนทำให้เกิดไอออนในเซชัน (ionization) ขึ้นได้ ทำให้จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระเพิ่มมากขึ้น และพาหะนำไฟฟ้าอิสระที่เกิดขึ้นใหม่ อาจได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพียงพอที่จะไปทำให้เกิดไอออนในเซชันเพิ่มขึ้นอีก จนกระทั่ง ถึงเงื่อนไขที่เกิดอะวาลานซ์ของพาหะ โดยทั่วไปจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนจำกัด และเป็นสัดส่วนกับจำนวนพาหะเริ่มต้นถ้าไดโอดถูกไบแอสย้อนต่ำกว่าแรงดันพังทะลาย (Breakdown voltage V_B) อัตราการเกิดไอออนในเซชัน (Ionization rate) ซึ่งเป็นจำนวนเฉลี่ยของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นโดยพาหะหนึ่งตัว (จะเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮล ก็ได้) ต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่พาหะเคลื่อนที่ไปได้แสดงในรูปที่ 2.7⁶ จะเห็นว่าอัตราการ

เกิดอ็อนไนเซชันขึ้นกับแรงดันไบแอสมาก

ในทางทฤษฎีอะวาลานซ์โฟโตไดโอดมีสัญญาณรบกวนน้อยและมีผลคูณของอัตราขยายกับแถบความถี่ (Gain-bandwidth product) มากถ้าอ็อนไนเซชันเกิดจากพาหะชนิดเดียวกัน สำหรับที่ศึกษาในปัจจุบันเฉพาะซิลิกอนเท่านั้นที่มีอัตราของอ็อนไนเซชันอันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนและโฮลต่างกันมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสนามไฟฟ้ามีความเข้มต่ำ ไม่นานนี้ผู้ค้นพบว่าอัตราของอ็อนไนเซชันในแกลเลียมอาร์เซไนด์ขึ้นกับโครงสร้างของแถบพลังงาน



รูปที่ 2.7 อัตราการเกิดอ็อนไนเซชันของพาหะจากการทดลองที่อุณหภูมิ 300°K สำหรับซิลิกอน เยอรมันเนียม แกลเลียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

อัตราขยายที่ความถี่ต่ำหรืออัตราขยายสำหรับไฟตรงของอะวาลานซ์โฟโตไดโอดขึ้นกับอัตราการเกิดอ็อนไนเซชันของพาหะและความกว้างของบริเวณที่เกิดการทวีคูณของพาหะ และทั้งหมดนี้ขึ้นกับแรงดันไบแอสย้อน แพคเตอร์การทวีคูณที่ความถี่ต่ำ (Low-frequency multiplication factor) หรือแพคเตอร์การทวีคูณสำหรับไฟตรง (Dc multiplication factor) สามารถเขียนเป็นสูตร empirical ได้ดังนี้

$$M_o = \frac{I_M}{I_{pd}} = \frac{I}{1 - (V_J/V_B)^n} \quad (2.15)$$

- เมื่อ M_o คือแฟคเตอร์การทวีคูณที่ความถี่ต่ำ
 I_M คือกระแสที่ถูกทวีคูณทั้งหมด
 I_{pd} คือกระแสเริ่มต้นทั้งหมด
 V_J คือแรงดันประสิทธิผลที่หัวต่อเมื่อแรงดันตกมีค่าน้อยมาก
 V_B คือแรงดันพังทลายของหัวต่อเมื่อ $M_o \rightarrow \infty$
 n คือแฟคเตอร์ความฟิต (Fitting-factor)

การทำงานของไดโอดที่มีค่า V_J เท่ากับหรือมากกว่า V_B ไม่ค่อยนิยมกัน เพราะกระแสและวาลานซ์ที่ติดได้เอง (Self-sustained) มีแนวโน้มที่จะทำให้ sensitivity ของไดโอดลดลง ถ้าการทวีคูณของพาหะมีค่าสูง แรงดันตกอันเนื่องมาจากความต้านทานอนุกรมและความต้านทานที่ไหลตจะมีผลดังนั้นสมการ (2.15) จะกลายเป็น

$$M_o = \frac{I}{1 - \left(\frac{V_R - IR}{V_B} \right)^n} \quad (2.16)$$

เมื่อ V_R คือแรงดันไบแอสย้อนที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองของโฟโตไดโอด

IR คือแรงดันไฟฟ้าตกที่ความต้านทานอนุกรมและที่ไหลต

ถ้า $IR \ll V_B$ สมการ (2.16) สามารถประมาณได้เท่ากับ

$$M_o = \frac{V_B}{nIR} \quad (2.17)$$

ซึ่งค่าสูงสุดของ M_o จะได้

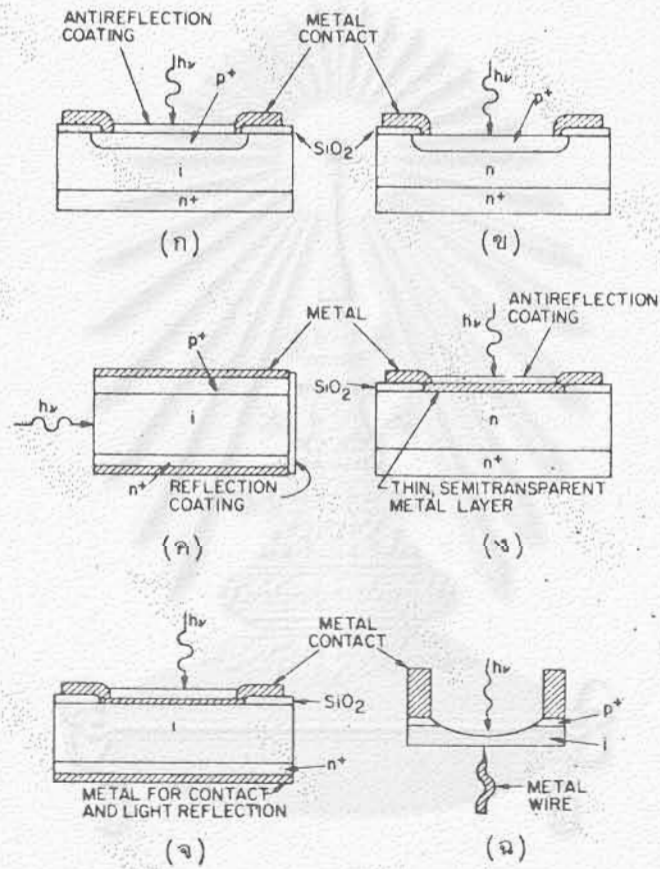
$$M_o (\max) = (V_B/nRI_{pd})^{1/2} \quad (2.18)$$

เนื่องจาก I_{pd} เป็นผลรวมของกระแสเริ่มแรกที่ถูกกระตุ้นโดยแสงและกระแสเริ่มแรกที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนหรือที่เรียกว่ากระแสมืด (dark current) เริ่มแรกจะเห็นว่ากระแสมืดเริ่มแรกจะเป็นตัวกำหนดกำลังขยายสูงสุด เช่น ในเยอรมันเนียมซึ่งมีกระแสมืดสูงเมื่อนำมาทำโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์จะมีค่า M_0 สูงสุดประมาณ 200 ขณะที่โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ที่ทำจากซิลิกอนซึ่งมีกระแสมืดต่ำจะมีค่า M_0 สูงสุดมากกว่า 10^4 สำหรับเยอรมันเนียมถ้าทำให้เย็นลงโดยใช้ก๊าซเหลวเพื่อลดกระแสมืด M_0 จะมากขึ้น

2.2.3 โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น (PIN photodiode) พี-ไอ-เอ็น

โฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจจับแสงที่ใช้กันมากเพราะว่าสามารถเลือกความหนาของชั้นเขตปลอดพาหะ (ซึ่งเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์หรือที่เรียกกันว่าชั้น I) ได้เพื่อที่จะออปติไมซ์ (optimize) ประสิทธิภาพควอนตัมและความไวของการตอบสนองได้ รูปที่ 2.6 เป็นไดอะแกรมแสดงพี-ไอ-เอ็น โฟโตไดโอด แถบพลังงานเมื่อถูกไบแอสย้อนและลักษณะสมบัติของการดูดกลืนแสง หลักการทำงานของพี-ไอ-เอ็น โฟโตไดโอดก็เหมือนกับของโฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็นที่กล่าวมาแล้วในข้อ 2.2.2 นั่นเอง ซึ่งจะไม่ขอกล่าวซ้ำอีก

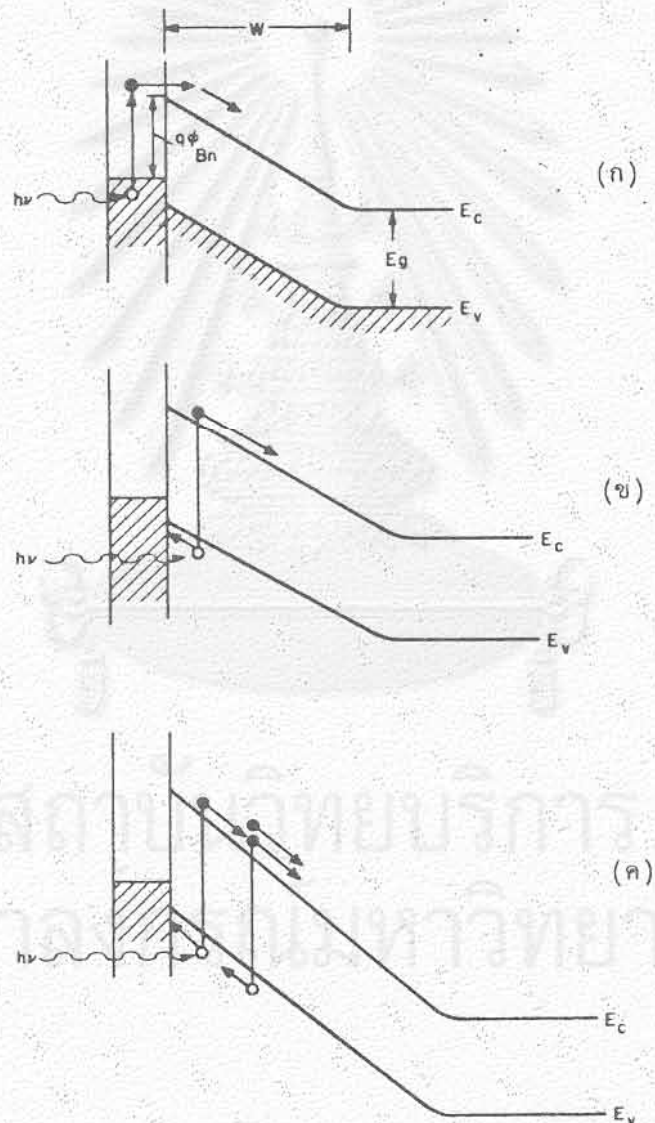
รูปที่ 2.8 เป็นโครงสร้างของโฟโตไดโอดความไวสูงแบบต่างๆ รูป (ก) เป็นพี-ไอ-เอ็น โฟโตไดโอดที่มีชั้น Antireflection คลุมผิวรับแสงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพควอนตัม ชั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (ชั้น I) เป็นชั้นเอ็นที่ถูกโด๊ปอย่างเจือจางมากซึ่งเรียกว่าบริเวณ ν หรือเป็นชั้นพีที่ถูกโด๊ปอย่างเจือจางมากซึ่งเรียกว่าบริเวณ π ความหนาของชั้น I จะถูกออกแบบให้เหมาะสมที่จะให้ได้ประสิทธิภาพควอนตัมและความไวที่ดี รูป (ข) เป็นโฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็นซึ่งชั้นเอ็นถูกโด๊ปค่อนข้างมากทำให้ชั้นนี้ไม่สามารถทำให้เป็นเขตปลอดพาหะได้หมด โดยทั่วไปแล้วโฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น จะมีความไวของการตอบสนองช้ากว่าแบบพี-ไอ-เอ็น เพราะมีกระแสแพร่ซึมเข้ามาเป็นตัวหน่วงความไว รูป (ค) เป็นพี-ไอ-เอ็น โฟโตไดโอดที่ถูกออกแบบให้รับแสงด้านข้าง โครงสร้างแบบนี้เป็นการประนีประนอมกันระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมและความไวของการตอบสนอง นอกจากนี้แสงยังสามารถฉายตกกระทบบนมุมกับผิวรับแสงทำให้เกิดการหักเหของแสงหลายครั้งภายในโครงสร้าง เป็นการเพิ่มความลึกของการทะลุทะลวงของแสงและทำให้ระยะทางที่พาหะต้องเดินทาง (transit) สั้นลง ส่วนรูป (ง) รูป (จ) และรูป (ฉ) เป็นโฟโตไดโอดแบบหัวต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของโฟโตไดโอดที่มีความไวสูงแบบต่างๆ

- | | |
|--|---|
| (ก) โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น | (ง) โฟโตไดโอดแบบหัวต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ |
| (ข) โฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น | (จ) โฟโตไดโอดแบบโลหะ-ไอ-เอ็น |
| (ค) โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็นที่ถูกฉายแสงด้านข้าง | (ฉ) โฟโตไดโอดแบบจุดสัมผัส (point contact) |

2.2.4 โฟโตไดโอดแบบหัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (Metal-Semiconductor Photodiode¹⁰) โฟโตไดโอดแบบหัวต่อโลหะสารกึ่งตัวนำสามารถใช้ทำโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพสูง โครงสร้างของมันได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.8 (ง) เพื่อลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากการดูดกลืนแสงเมื่อแสงส่องทะลุผิวสัมผัสโลหะ (Metal contact) โลหะจะต้องบางมาก (ประมาณ 100 \AA) และเพื่อลดการสะท้อนแสงจะต้องมีชั้น Antireflection coating อยู่หน้าผิวโลหะ โฟโตไดโอดแบบนี้สามารถทำงานได้ในหลายลักษณะขึ้นกับระดับพลังงานของ



รูปที่ 2.9 (ก) อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้ข้ามจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำโดย

Photoelectric emission ($E_g > hv > q\phi_{Bn}$)

(ข) การกระตุ้นแบบ band-to-band ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ($hv > E_g$)

(ค) การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลและการทวีคูณแบบอะวาลานซ์ภายใต้

การไบแอสย้อนที่มีค่ามาก ($hv > E_g$ และ $V = V_B$)

โฟตอนและเงื่อนไขการไบแอส รูป 2.9 ประกอบ

ก. สำหรับ $E_g > h\nu > q\phi_{Bn}$ และ $V < V_B$ ดังในรูป 2.9 (ก) ซึ่ง E_g คือช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและ ϕ_{Bn} คือความสูงของแถบเรียงแบบขั้วตกสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (Schottky barrier height on n-type semiconductor) อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงในโลหะสามารถที่จะกระโดดข้ามกำแพงพลังงานศักย์เข้าไปยังสารกึ่งตัวนำได้ กระบวนการเช่นนี้ถูกนำไปใช้ในการศึกษาหาความสูงของขั้วตก-แถบเรียง และศึกษาการถ่ายเทของอิเล็กตรอนร้อน (Hot-electron transport) ในฟิล์มของโลหะ

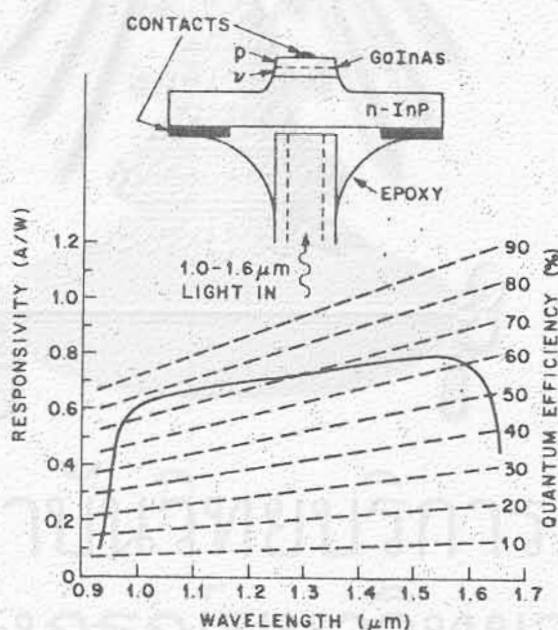
ข. สำหรับ $h\nu > E_g$ และ $V < V_B$ ดังในรูป 2.9 (ข) พลังงานแสงจะกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในสารกึ่งตัวนำและลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดแบบนี้ก็จะคล้ายกับแบบพี-ไอ-เอ็น และประสิทธิภาพควอนตัมก็เป็นไปตามสูตรในสมการ (2.7)

ค. สำหรับ $h\nu > E_g$ และ $V \approx V_B$ (แรงดันไบแอสย้อนมาก) ดังในรูป 2.9 (ค) ไดโอดจะทำงานคล้ายกับอะวาลานซ์โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดแบบหัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีประโยชน์ใช้งานมากในย่านความถี่แสงที่ตามองเห็นและในย่านอุลตราไวโอเล็ต เพราะว่าแสงในย่านนี้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำเกือบทั้งหมดจะมีค่าสูงมาก ($\alpha \approx 10^5 \text{ cm}^{-1}$ หรือมากกว่า) ซึ่งเทียบได้กับความลึกของการทะลุทะลวง $1/\alpha \approx 0.1 \mu\text{m}$ หรือน้อยกว่า จึงเป็นไปได้ที่จะเลือกโลหะที่เหมาะสมและชนิดของสารที่ทำชั้น Antireflection ที่เหมาะสมเพื่อให้แสงที่ตกกระทบส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนใกล้กับผิวของสารกึ่งตัวนำ

2.2.5 โฟโตไดโอดแบบ Heterojunction โฟโตไดโอดแบบนี้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Heterojunction ซึ่งเป็นหัวต่อที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานแตกต่างกัน ข้อดีของโฟโตไดโอดแบบนี้ก็คือประสิทธิภาพควอนตัมไม่จำเป็นต้องขึ้นกับระยะทางของหัวต่อจากผิวรับแสง เพราะว่าสามารถใช้วัสดุที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างเป็นหน้าต่าง (window) สำหรับส่งผ่านกำลังงานของแสง นอกจากนี้ Heterojunction ยังสามารถเลือกใช้วัสดุต่างกันเพื่อทำหัวต่อที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพควอนตัมและความไวของการตอบสนองที่ความถี่ใช้งานในเวลาเดียวกันอีกด้วย

เพื่อให้ได้ Heterojunction ที่มีกระแสรั่วต่ำ ค่าคงที่แลตติซ (Lattice constant) ของสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่มาประกอบกันจะต้องแมตช์ (match) กันมาก สารประกอบกึ่งตัวนำเตอรันาริแบบ III-V ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) ที่ถูกปลูกแบบอีพิแทกเซียล (epitaxial) บน GaAs ประกอบขึ้นเป็น Heterojunction ที่มีค่าคงที่แลตติซแมตช์ กันอย่างสมบูรณ์ (ค่าคงที่แลตติซ 5.635 \AA) โฟโตไดโอดพวกนี้มีความสำคัญมากในช่วงคลื่น 0.65 ถึง $0.85 \mu\text{m}$ โฟโตไดโอดแบบ Double heterojunction ($\text{n-Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As/p-GaAs/p-Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$) ที่มีชั้น Antireflection และทำงานที่ความยาวคลื่น $0.8075 \mu\text{m}$ มีประสิทธิภาพควอนตัมสูงถึง 92 เปอร์เซ็นต์

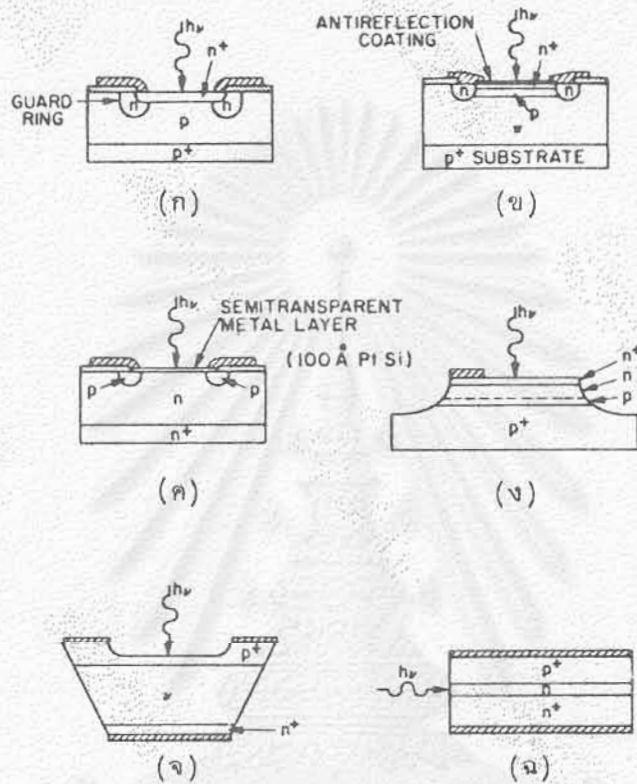


รูปที่ 2.10 ความรู้สึกต่อแสงและประสิทธิภาพควอนตัมของพี-ไอ-เอ็น โฟโตไดโอดที่ทำจากแกเลเลียมอินเดียมอาร์เซไนด์ (GaInAs) ที่มีหัวต่อแบบ Heterojunction¹⁰

ที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นไปอีก (1-1.6 μm) สารประกอบกึ่งตัวนำเทอร์นารีเช่น $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ($E_g = 0.73 \text{ eV}$) และสารประกอบกึ่งตัวนำควอเทอร์นารี เช่น $\text{Ga}_{0.27}\text{In}_{0.73}\text{As}_{0.63}\text{P}_{0.37}$ ($E_g = 0.95 \text{ eV}$) ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้มีแลตติซที่แม่ทซ์กับ InP ดีมาก รูปที่ 2.10 แสดงถึงโครงสร้างแบบเมส่า 10^3 (mesa) ของ $\text{p-Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As/v-Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As/n}^+-\text{InP}$ ที่มีผิวรับแสงด้านหลังจะเห็นว่าค่าความรู้สึกต่อแสง (Responsivity or Sensitivity) มีค่าเกือบคงที่ในช่วงสเปกตรัมของแสง จาก 1.0 ถึง 1.5 μm และมีค่าเกินกว่า 0.6 A/W คาดกันว่าสิ่งประดิษฐ์นี้มีสมรรถนะเหนือกว่าโฟโตไดโอดที่ทำจากเยอรมันเนียม เพราะมีโครงสร้างผลึกแบบ direct band gap ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูงที่ขอบของการดูดกลืน (Absorption edge ซึ่งเท่ากับความยาวคลื่นวิกฤต) ทำให้สามารถทำเขตปลอดพาหะให้บางได้เพื่อเพิ่มความไวของการตอบสนอง

2.2.6 อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiode) อะวาลานซ์โฟโตไดโอดถูกสร้างขึ้นให้สามารถทนต่อแรงดันไบแอสย้อนสูง และทำให้เกิดการทวีคูณของพาหะนำไฟฟ้าขึ้น ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อ 2.2.2.4 การทวีคูณของพาหะทำให้เกิดการขยายของกระแสภายในโครงสร้าง และผลคูณของอัตราขยายกระแสกับแถบความถี่อาจมีค่าถึง 100 GHz ทำให้โฟโตไดโอดสามารถตอบสนองต่อแสงที่ถูกผสมคลื่น (modulate) ที่ความถี่ไมโครเวฟได้ กฎเกณฑ์ที่ใช้กับอะวาลานซ์โฟโตไดโอดในส่วนที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพควอนตัมและความไวของการตอบสนองก็เป็นเช่นเดียวกับกับโฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์อะวาลานซ์อีกด้วย

รูปที่ 2.11 แสดงถึงโครงสร้างบางแบบของโฟโตไดโอดแบบนี้ โครงสร้างที่มี Guard-ring จะต้องมีความลาดของสารเจือปนตัวที่หัวต่อเอ็น-พีที่มี Guard-ring และต้องมีรัศมีความโค้งที่หัวต่อมากพอทำให้หัวต่อ n^+p แบบ abrupt ที่ตรงกลางเกิดการพังทะลายก่อนที่จะเกิดขึ้นที่หัวต่อที่มี Guard-ring (รูปที่ 2.11 ก) Guard-ring สามารถใช้กับโครงสร้างที่ยุงยากเช่น $\text{n}^+-\text{p}-\text{n}^+-\text{p}^+$ (รูปที่ 2.11 ข) สำหรับอะวาลานซ์โฟโตไดโอดแบบหัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำใช้ Guard-ring ช่วยในการกำจัดสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 โครงสร้างแบบต่างๆของอะวาลานซ์โฟโตไดโอด

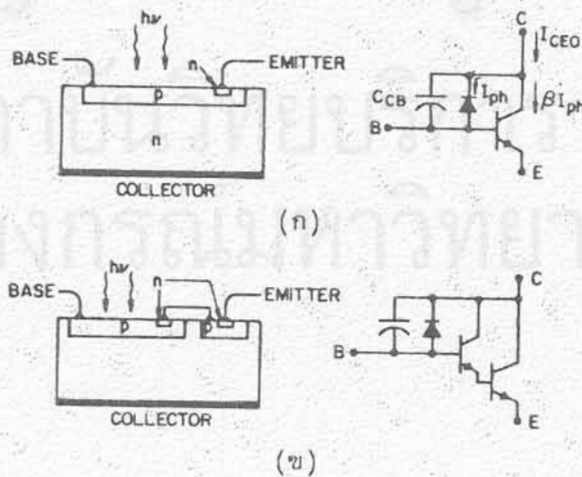
- (ก) โครงสร้างที่มี Guard-ring
- (ข) โครงสร้างที่มี Guard-ring แบบ n⁺-p-n⁺
- (ค) โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ
- (ง) โครงสร้างแบบเมสา
- (จ) โครงสร้างพี-ไอ-เอ็นที่ถูกบาก
- (ฉ) โครงสร้าง p⁺-n-n⁺ แบบเมสาที่ผิวรับแสงอยู่ด้านข้าง

ความเข้มสูงที่บริเวณรอบๆผิวสัมผัส (รูป 2.11 ค) โครงสร้างเมสา (mesa) หรือโครงสร้างที่ถูกบาก (beveled structure) มีสนามไฟฟ้าคร่อมหัวต่อที่ผิวต่ำ และการพังทะลายแบบอะวาลานซ์จะเกิดอย่างสม่ำเสมอภายในตัวไดโอด (รูป 2.11 ง และรูป 2.11 จ) เพื่อตรวจจับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับขอบของการดูดกลืน (Absorption edge) แสง

จะถูกฉายที่ด้านข้างทำให้ประสิทธิภาพควอนตัมและอัตราส่วนของสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) ดีขึ้น (รูป 2.11 ฉ)

2.3 โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) ทรานซิสเตอร์ทั้งแบบไบโพลาร์ (Bipolar transistor) และแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar transistor) สามารถใช้ทำตัวตรวจจับแสงได้ โฟโตทรานซิสเตอร์มีอัตราขยายสูงเนื่องจากเกิด transistor action แต่การสร้างมีความยุ่งยากมากกว่าการสร้างโฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น และเนื่องจากการสร้างทรานซิสเตอร์ต้องใช้เนื้อที่มาก ทำให้สมรรถนะการทำงานที่ความถี่สูงเลว

โฟโตทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์พร้อมทั้งแบบจำลองวงจรได้แสดงไว้ในรูป 2.12 ก ความแตกต่างจากทรานซิสเตอร์ทั่วไปก็คือ โฟโตทรานซิสเตอร์มีหัวต่อเบส-คอลเลคเตอร์กว้างเพื่อใช้เป็นที่รวบรวมแสง (แทนได้ด้วยไดโอดและคาปาซิเตอร์ขนานกัน) สิ่งประดิษฐ์แบบนี้มีประโยชน์ในการใช้งานด้าน Opto-isolator เพราะว่าให้ค่า Current-transfer ratio (คืออัตราส่วนของกระแสของโฟโตไดโอดที่หัวออกต่อกระแสของ LED ที่หัวเข้า) สูงประมาณ 50 เปรอ์เซ็นต์หรือมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดตัวอย่างที่มี current transfer ratio เพียง 0.2 เปรอ์เซ็นต์ เมื่อขั้วเบสถูกปล่อย



รูปที่ 2.12 (ก) โฟโตทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์และแบบจำลองวงจร
(ข) โฟโต-คาร์ลิงตันและแบบจำลองวงจร

ให้ลอย พาหะที่ถูกกระตุ้นโดยแสงจะทำให้เกิดเป็นกระแส I_{ph} ในคอลเลคเตอร์ นอกจากนี้ โชนที่ถูกสร้างขึ้นที่เบสและที่ถูกรวบรวมขึ้นที่คอลเลคเตอร์ซึ่งถูกกวาดเข้ามายังเบสจะทำให้กำแพงพลังงานศักย์ระหว่างเบส-อิมิตเตอร์ลดลง ดังนั้นอิเล็กตรอนจะถูกฉีด (inject) ข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งหมดมีค่า

$$I_{CEO} = I_{ph} + h_{FE} I_{ph} = (1 + h_{FE}) I_{ph} \quad (2.19)$$

เมื่อ h_{FE} คือ dc common-emitter current gain ซึ่งอาจมีค่ามากกว่า 1 มากๆ และประสิทธิภาพควอนตัมประสิทธิภาพจะมีค่า $(1 + h_{FE})$ เท่าของเบส-คอลเลคเตอร์โฟโตไดโอด

โฟโตทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์สามารถนำมารวมกับสิ่งประดิษฐ์อื่นๆได้ ถ้าเอามารวมกับทรานซิสเตอร์ตัวที่สอง จะได้โฟโต-คาร์ลิงตัน (Photo-Darlington) ซึ่งมี transfer ratio สูงยิ่งขึ้น (รูป 2.12 ข) ผลตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response) ของโครงสร้างแบบนี้ถูกจำกัดโดย

- คาปาซิแตนซ์ระหว่างเบส-คอลเลคเตอร์ซึ่งมีค่าสูง
- อัตราขยายของตัวตรวจจับแสงเนื่องมาจากผลของการป้อนกลับ

เวลาของการตอบสนองตัวอย่างของโฟโตไดโอดมีค่าประมาณ 0.01 μ s ขณะที่ มีค่าประมาณ 5 μ s สำหรับโฟโตทรานซิสเตอร์ และมีค่า 50 μ s สำหรับโฟโต-คาร์ลิงตัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3 การเตรียมงานและสร้างโฟโตไดโอด

วิธีการวิจัยได้ถูกแบ่งออกเป็นห้าขั้นตอนใหญ่ๆด้วยกัน คือ

- การเตรียมอุปกรณ์และวัสดุวิจัย
- การสร้างโฟโตไดโอดแบบต่างๆ
- วิธีการวิเคราะห์ผลของโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้น
- ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดที่ขายในท้องตลาด
- การนำโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นไปประยุกต์ใช้งาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงสองหัวข้อแรกเท่านั้น ส่วนสามหัวข้อหลังจะกล่าวถึงในบทต่อไป

3.1 การเตรียมอุปกรณ์และวัสดุวิจัย วัสดุเริ่มแรกที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ แวนผลึกซิลิกอน (Silicon wafer) ซึ่งบางส่วนห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ก็มีอยู่แล้ว แต่บางส่วนก็จำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศเช่นได้แก่ แวนผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีความบริสุทธิ์สูง (hyper pure n-type silicon) นอกจากนี้ยังได้สั่งซื้ออินเดียมบริสุทธิ์ (99.999 %) จากต่างประเทศเพื่อติดโฟโตไดโอดที่สร้างเสร็จแล้วบน header เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล นอกจากนี้แวนผลึกซิลิกอนกับโลหะบริสุทธิ์แล้วงานวิจัยต้องใช้ก๊าซบริสุทธิ์และสารเคมีบริสุทธิ์ซึ่งสามารถหาซื้อได้ภายในประเทศ และผู้วิจัยยังได้ออกแบบ mask เพื่อทำเป็นอิเล็กทรอนิกส์ด้านหน้าเองอีกด้วย

3.2 การสร้างโฟโตไดโอดแบบต่างๆ ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างโฟโตไดโอดแบบต่างๆกันขึ้นสี่แบบด้วยกันเพื่อผลในการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่

- โฟโตไดโอดหัวต่อพี-เอ็น (P-N junction photodiode)
- โฟโตไดโอดแบบเอ็น-ไอ-พี (NIP photodiode)
- โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น (PIN photodiode) ซึ่งในแบบนี้ผู้วิจัยยังได้แบ่งโครงสร้างของโฟโตไดโอดออกเป็น 2 โครงสร้างย่อยซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

3.2.1 โฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น วิธีดำเนินการทำโฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น มีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

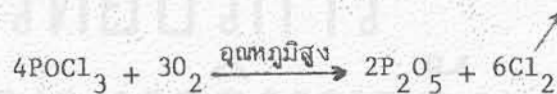
3.2.1.1 การเตรียมแวนผลึก วัสดุเริ่มแรกทำด้วยผลึกเดี่ยว

ของซิลิกอนชนิดพี ซึ่งมีทิศทางผลึก <111> และความต้านทานจำเพาะ 5 โอห์ม-ซม. ผู้วิจัยได้ทำการล้าง (cleaning) และขัดผิว (Polishing) ด้วยกระบวนการมาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการฯ ซึ่งเป็นวิธีเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (ภาคผนวก ก) ตัวแผ่นผลึกหนาประมาณ 300 μm

3.2.1.2 Thermal Oxidation (ภาคผนวก ข) เพื่อใช้เป็นแบบป้องกันการแพร่ซึม อุณหภูมิเตา 1050 $^{\circ}\text{C}$ แก๊สออกซิเจน bubble ผ่านน้ำซึ่งอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}\text{C}$ เวลาที่ใช้ในการทำออกไซด์นาน 1 ชม. ได้ความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) 4000 \AA โดยประมาณ หลังจากเอาออกจากเตาออกซิเดชันแล้วกัดเอาออกไซด์ที่ด้านหน้าออกด้วย Buffered HF เตรียมพร้อมสำหรับการแพร่ซึมสารเจือปน

3.2.1.3 Phosphorus Diffusion (ภาคผนวก ค) การแพร่ซึมสารเจือปน (Diffusion) นี้ใช้ POCl_3 เป็นแหล่งของสารเจือปน อุณหภูมิของเตาแพร่ซึม 1000 $^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิของ POCl_3 ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสารเจือปนในสภาวะของเหลวใญ่สุญญากาศไว้ที่ 24 $^{\circ}\text{C}$ เอาแผ่นผลึกซิลิกอนจากข้อ 3.2.1.2 เข้าเตาแล้วปล่อยแก๊สไนโตรเจนให้ bubble ผ่าน POCl_3 ด้วยอัตรา 0.19 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที ในขณะที่เดียวกันก็ผ่าน $\text{O}_2 + \text{N}_2$ เข้าเตาด้วย ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นแบ่งเป็นสองขั้นตอนดังนี้

ก. ภายในเตา POCl_3 ที่เกาะมาอยู่กับแก๊สไนโตรเจนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนดังนี้



ข. ไอของ P_2O_5 จะทำปฏิกิริยาที่ผิวของซิลิกอนได้ P ซึ่งจะแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อของซิลิกอนดังนี้



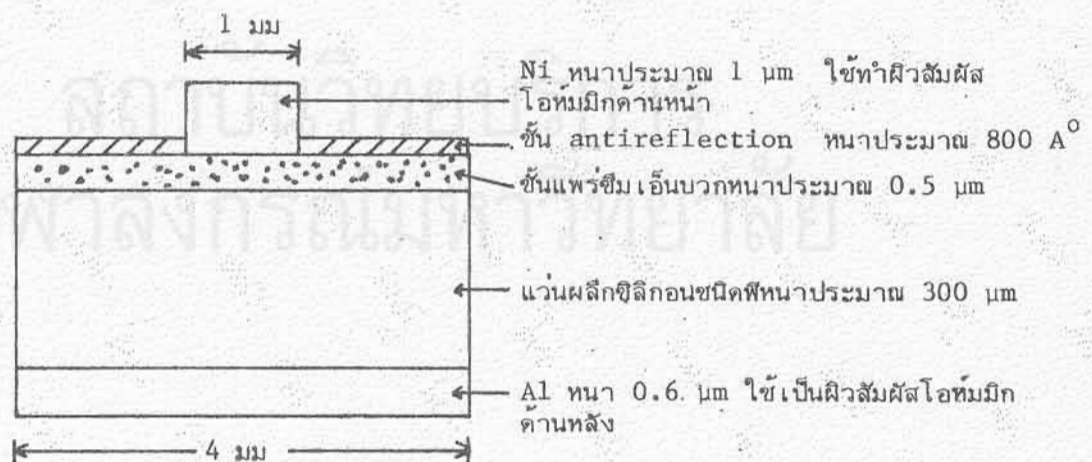
ฟอสฟอรัสที่แพร่ซึมเข้าไปในเนื้อซิลิกอนจะสร้างขึ้นเอ็นชันเกิดเป็นหัวต่อพี-เอ็น ซึ่งในกรณีนี้มีความลึกของหัวต่อประมาณ 0.5 μm

3.2.1.4 Antireflection ก่อนทำชั้น Antireflection ผู้วิจัยได้ล้างชั้นออกไซด์ที่ยังมีหลงเหลือจากการแพร์ซึมออกเสียก่อนเนื่องจากออกไซด์ที่หลงเหลือนี้ค่อนข้างสกปรก หลังจากนั้นจึงเอาตัวอย่าง (samples) เข้าเตาออกซิเดชันอีกครั้งหนึ่ง อุณหภูมิเตายังคงเป็น 1050°C แต่อุณหภูมิของน้ำลดลงเหลือเพียง 55°C เวลาที่ใช้ทำออกไซด์ 14 นาที ได้ออกไซด์หนาประมาณ 800 \AA

3.2.1.5 ทำผิวสัมผัส (contact) ด้านหลัง หลังจากกัดออกไซด์ด้านหลังออกแล้ว ทำการฉาบไออลูมิเนียม (Aluminium evaporation) ที่ผิวด้านหลังในสูญญากาศความหนาประมาณ 6000 \AA แล้วจึงไปแอนนิล (Anneal) ที่อุณหภูมิ 577°C ในบรรยากาศของไนโตรเจนเป็นเวลา 4 นาที

3.2.1.6 ทำผิวสัมผัสด้านหน้า กัดออกไซด์ด้านหน้าด้วยกระบวนการ photomasking ให้เป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม^2 และจุดศูนย์กลางของวงกลมห่างกัน 4 มม แล้วนำไปชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า (electroless nickel plating) หนาประมาณ $1 \text{ }\mu\text{m}$ ดูรายละเอียดในภาคผนวก จ

3.2.1.7 ตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นเล็กๆขนาด $4 \times 4 \text{ มม}^2$ นำขึ้นติดบน header โดยอาศัยอินเดียม และเชื่อมต่อสายโดยใช้ ultrasonic bonding โครงสร้างโฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็นมีลักษณะดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างโฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น

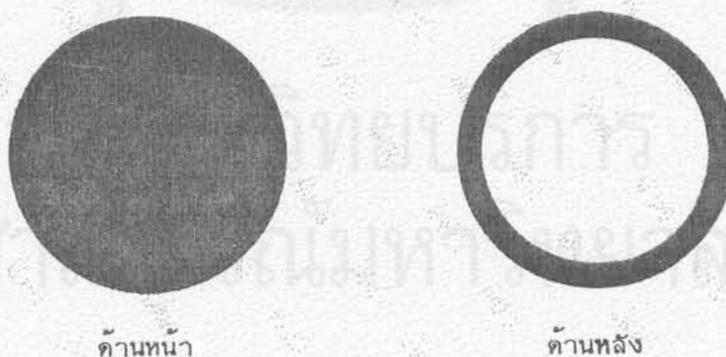
3.2.2 โฟโตไดโอดแบบเอ็น-ไอ-พี (NIP photodiode) กระบวนการทำโฟโตไดโอดแบบเอ็น-ไอ-พี มีรายละเอียดดังนี้

3.2.2.1 การเตรียมแว่นผลึก แว่นผลึกที่ใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นทำด้วยผลึกเดี่ยวของซิลิกอนชนิดพีซึ่งเป็นของบริษัท WACKER-CHEMITRONIC ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงมาก (hyperpure Si) รายละเอียดเทคนิคของแว่นผลึกมีดังนี้

เส้นผ่าศูนย์กลาง	23.5	mm
ความหนาของแว่นผลึก	240	μm
ทิศทางผลึก (orientation)	1-1-1	
Edge pit density/cm ² (EPD/cm ²)	< 30000	
ได้ด้วยโบรอนมีความต้านทานจำเพาะ	7500	$\Omega\text{-cm}$

ผิวทั้งสองด้านของแว่นผลึกเป็นแบบ lapped (ไม่ขัดมัน) แว่นผลึกถูกล้างและขัดผิวด้วยกระบวนการมาตรฐานดังปรากฏในภาคผนวก ก

3.2.2.2 Thermal oxydation ใช้กระบวนการเดียวกับข้อ 3.2.1.2 เมื่อเอาออกจากเตาออกซิเดชันแล้วใช้ wax ทาทั่วผิวด้านหน้า และผิวด้านหลังใช้ wax ทาเป็นวงแหวนที่ขอบรอบนอกดังรูป 3.2

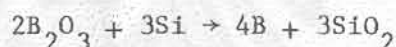


รูปที่ 3.2 แสดงการทำ wax ที่แว่นผลึก

หลังจากนั้นกัดเอาออกไซด์ส่วนที่ไม่มี wax ป้องกันออกเพื่อเตรียมสำหรับการแพร่ซึม (Diffusion) เข้าผิวด้านหลัง แล้วล้าง wax ออก

3.2.2.3 Back Surface Diffusion ขั้นตอนนี้เป็นการแพร่ซึมสารเจือปนชนิดพีเพื่อสร้างชั้นพีบวกชั้นที่ผิวด้านหลัง แหล่งกำเนิดสารเจือปนได้แก่ โบรอน ไนไตรต์ (BN) ซึ่งเป็น planar diffusion source เกรด BN-1250 หลังจาก oxidized และ stabilized BN แล้วจึงใส่แว่นผลึกซิลิกอนที่ได้จากขั้นตอน 3.2.2.2 ไว้ ระหว่าง BN (ดูภาพประกอบในภาคผนวก ง) อุณหภูมิเตา 1100°C เวลาที่ใช้ในการแพร่ซึม 50 นาที ให้ความหนาของหัวต่อประมาณ 1 μm ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

- ก. ตอน oxidized ด้านนอกของ BN จะเปลี่ยนไปเป็น B_2O_3
- ข. เมื่อเอาแว่นผลึกเข้าเตาแพร่ซึม ไอของ B_2O_3 จะทำปฏิกิริยากับ Si ได้ B



3.2.2.4 Oxide Growth ก่อนจะปลุกออกไซด์ต้องกักออกไซด์ที่เหลืตกค้างจากการแพร่ซึมโบรอนก่อน แล้วใช้เงื่อนไขเดียวกับข้อ 3.2.2.2 เพื่อปลุกออกไซด์ กักออกไซด์ด้านหน้าออกเพื่อให้สารเจือปนชนิดเอ็นแพร่ซึมเข้าด้านนี้ ส่วนออกไซด์ที่ผิวด้านหลังยังคงปล่อยทิ้งไว้เพื่อป้องกันการแพร่ซึม

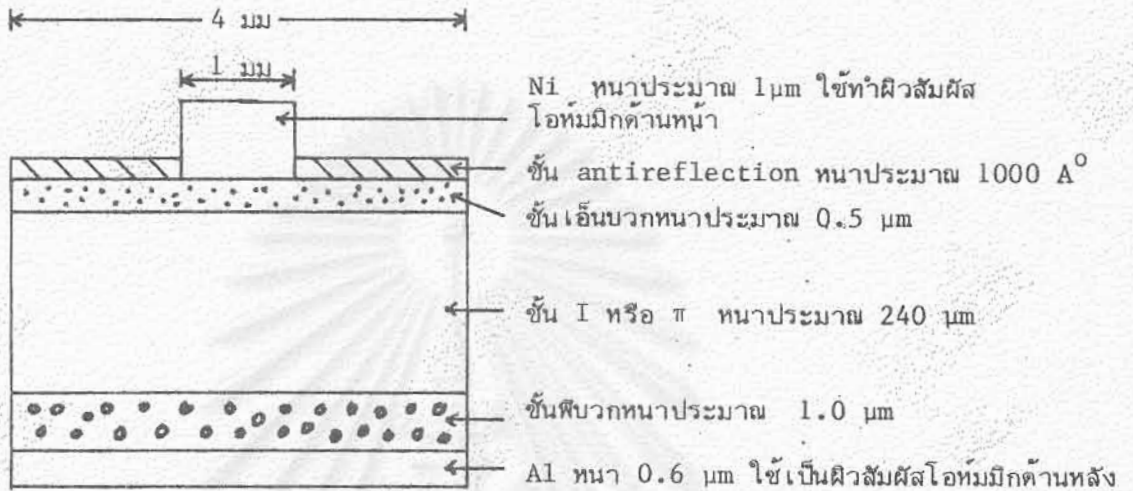
3.2.2.5 Front Surface Diffusion ขั้นตอนนี้เพื่อแพร่ซึมชั้นเอ็นบวกเข้าไปที่ผิวหน้าของแว่นผลึก แหล่งกำเนิดสารเจือปนได้แก่ POCl_3 รายละเอียดเทคนิคของขั้นตอนนี้เหมือนกับข้อ 3.2.1.3 ทุกประการ

3.2.2.6 สร้างชั้น Antireflection เอาแว่นผลึกเข้าเตาออกซิเดชันอีกครั้งหนึ่งเพื่อทำชั้น antireflection ที่อุณหภูมิ 1050°C อุณหภูมิของน้ำที่ใส่ 80°C ให้ความหนาของออกไซด์ประมาณ 1000 \AA

3.2.2.7 ทำผิวสัมผัสด้านหลัง หลังจากกักออกไซด์ด้านหลังออกแล้ว ทำการฉาบไอของอลูมิเนียมบนผิวด้านหลังภายใต้สุญญากาศ ความหนาประมาณ 6000 \AA แล้วเอาไปแอนเนลที่อุณหภูมิ 577°C เป็นเวลา 4 นาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน เพื่อให้เป็นผิวสัมผัสโอห์มมิก

3.2.2.8 ทำผิวสัมผัสด้านหน้า รายละเอียดของขั้นตอนนี้เหมือนกับข้อ 3.2.1.6

3.2.2.9 ตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาด 4×4 มม² นำขึ้นติดบน header โดยใช้อินเดียมและเชื่อมต่อสายโดยใช้ ultrasonic bonding โครงสร้างของ NIP photodiode มีดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างโฟโตไดโอดแบบเอ็น-ไอ-พี

3.2.3 โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น (PIN photodiode) โฟโตไดโอดแบบนี้สร้างขึ้นโดยใช้กระบวนการผลิตที่อุณหภูมิต่ำเพื่อรักษาเวลาชีวิต (lifetime) ของพาหะนำไฟฟ้า เพื่อให้ไดโอดที่สร้างขึ้นมีความไวต่อการตอบสนอง (speed of response) ดีขึ้น รายละเอียดกระบวนการผลิตมีดังต่อไปนี้

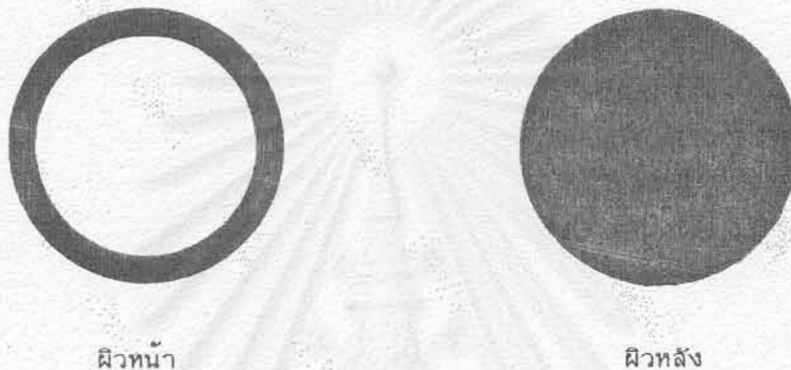
3.2.3.1 การเตรียมแว่นผลึก แว่นผลึกที่ใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นทำด้วยผลึกเดี่ยวของซิลิกอนชนิดเอ็นซึ่งเป็นของบริษัท Komatsu Electronic Metals Co;Ltd รายละเอียดเทคนิคของแว่นผลึกมีดังนี้

เส้นผ่าศูนย์กลาง	50 ± 1 mm
ความหนาของแว่นผลึก	210 μm
ทิศทางผลึก (orientation)	(111) ± 2°
EPD/cm ²	< 0.5 × 10 ³ / cm ²
ความต้านทานจำเพาะ	3000 Ω-cm
โด๊ปด้วย	ฟอสฟอรัส
ผิวหน้า	ขัดมัน (polished)
ผิวหลัง	ไม่ขัดมัน (lapped)

แว่นผลึกถูกล้างและขัดผิวด้วยกระบวนการมาตรฐานตามภาคผนวก ก

3.2.3.2 Thermal Oxidation อุณหภูมิของเตาออกซิเดชัน

900°C ปล่อยก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ให้ bubble ผ่านน้ำปราศจากอิออน (Deionized water) ซึ่งอุ่นให้ร้อนด้วยอุณหภูมิคงที่ที่ 90°C แล้วปล่อยผ่านเข้าเตาที่มีแวนผลึกซิลิกอนอยู่เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง 40 นาที ได้ออกไซด์หนา 0.4 μm เอาแวนผลึกออกจากเตา ทา wax ทิ้งผิวหลัง ส่วนผิวน้ำทาเป็นรูปวงแหวนดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการทา wax ที่แวนผลึก

กัดออกไซด์บริเวณที่ไม่มี wax คลุมออก แล้วจึงล้าง wax ออก

3.2.3.3 Front Surface Diffusion ขั้นตอนนี้เป็นการแพร่ซึม

สารเจือปนชนิดที่เพื่อสร้างชั้นบางขึ้นที่ผิวด้านหน้า แหล่งกำเนิดสารเจือปนได้แก่ โบรอน ในไตรด์เกรด BN-975 หลังจาก oxidized และ stabilized (ดูภาคผนวก ง) แล้วจึงใส่แวนผลึกซิลิกอน ไว้ระหว่าง BN อุณหภูมิของเตาแพร่ซึมโบรอน 950°C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเตาเหมือนกับในข้อ 3.2.2.3 ทุกประการเพียงแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่าเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำ เวลาที่ใช้ในการแพร่ซึม 4 ชั่วโมง ได้ความลึกของหัวต่อ (junction) ประมาณ 0.6 μm

3.2.3.4 Oxide Growth กัดออกไซด์ที่เหลือตกค้างบนแวนผลึก

ออกให้หมดเสียก่อน แล้วจึงนำเข้าเตาออกซิเดชัน อุณหภูมิเตา 900°C การปลูกชั้นออกไซด์ในขั้นตอนนี้ออกออกเป็นสามขั้นตอนย่อยติดต่อกันคือ

ก. ปลูกออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแห้ง (dry oxidation)

โดยการผ่านก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าเตาโดยตรงไม่ต้อง bubble ผ่านน้ำเป็นเวลา 10 นาที

ข. ปลุกออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันเปียก (wet oxidation) โดยการ bubble ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านน้ำปราศจากอ็อกซิเจนที่มีอุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 15 นาที

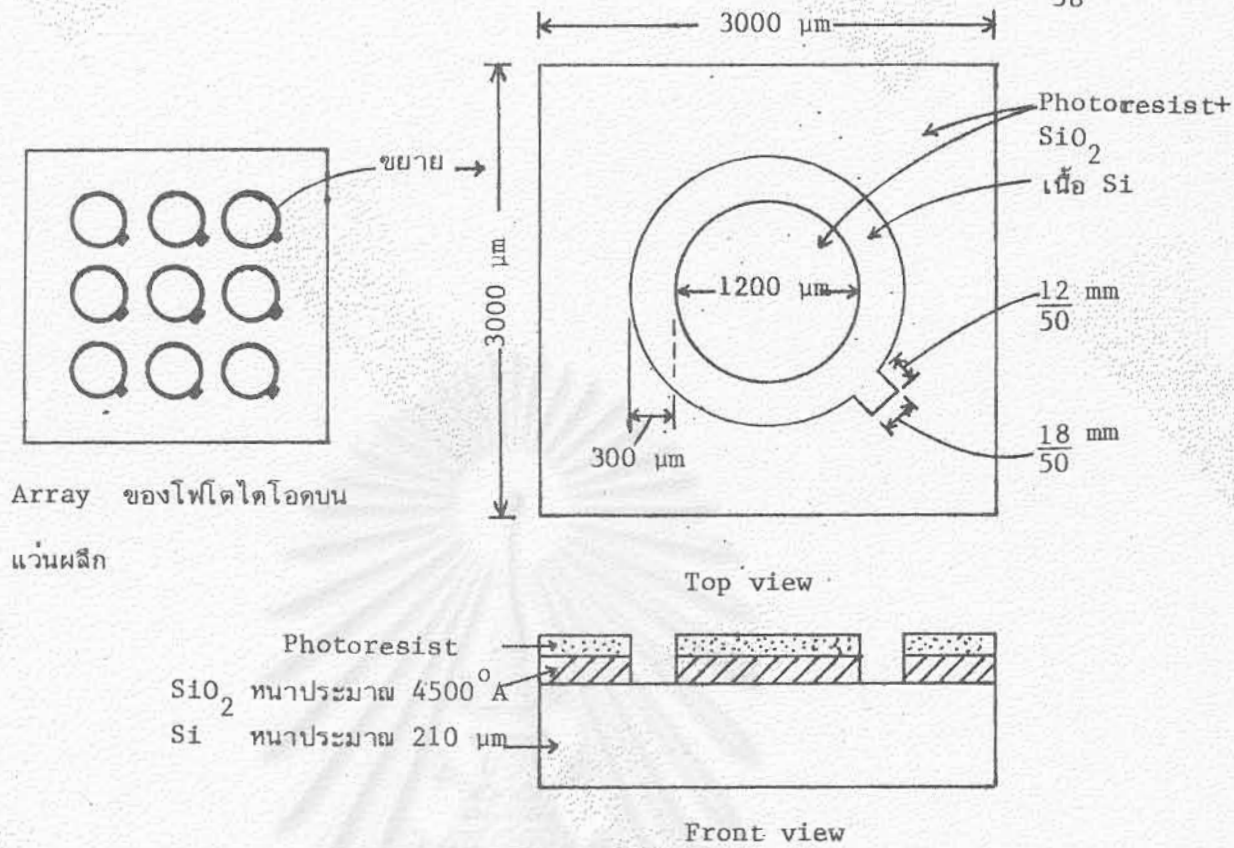
ค. ทำซ้ำข้อ ก

การปลุกออกไซด์ทั้งสามขั้นตอนนี้ให้ความหนาของออกไซด์ประมาณ 4500 \AA แล้วกัดออกไซด์ด้านหลังออกโดยใช้ Buffered HF เพื่อที่จะแพร่ซึมสารเจือปนแบบเอ็นที่ด้านหลังในขั้นตอนต่อไป

3.2.3.5 Back Surface Diffusion อุณหภูมิเตา 800°C แหล่งกำเนิดสารเจือปนได้แก่ POCl_3 ที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิตั้งที่ 24°C ให้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ bubble ผ่าน POCl_3 ด้วยอัตรา 0.19 l/min ขณะเดียวกันก็ผ่านก๊าซ N_2+O_2 เข้าเตาอีกทางหนึ่งด้วยในเวลาเดียวกัน เวลาที่แวนผลึกอยู่ในเตาแพร่ซึม 5 นาที ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเหมือนกับในข้อ 3.2.1.3 ทุกประการ เพียงแต่ปฏิกิริยาเกิดช้ากว่าเพราะทำที่อุณหภูมิต่ำ ฟอสฟอรัสแพร่ซึมเข้าไปลึกประมาณ $0.07 \mu\text{m}$ กัดออกไซด์ที่หลงเหลืออยู่ด้วย Buffered HF

3.2.3.6 แบ่ง sample ที่ได้ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งไม่ทำ antireflection coating (AR coating) ส่วนที่สองทำ antireflection coating เหตุที่ต้องทำเช่นนี้ก็เพื่อศึกษาถึง sensitivity ของโฟโตโคโอดต่อแสงความถี่ต่างๆกัน เมื่อมี AR coating และเมื่อไม่มี AR coating ส่วนที่ต้องการชั้น AR coating นำเข้าเตาออกซิเดชันเพื่อปลุกออกไซด์หนา 1400 \AA โดยกระบวนการออกซิเดชันเปียก โดยมีอุณหภูมิของน้ำปราศจากอ็อกซิเจน 90°C เป็นเวลานาน 30 นาที

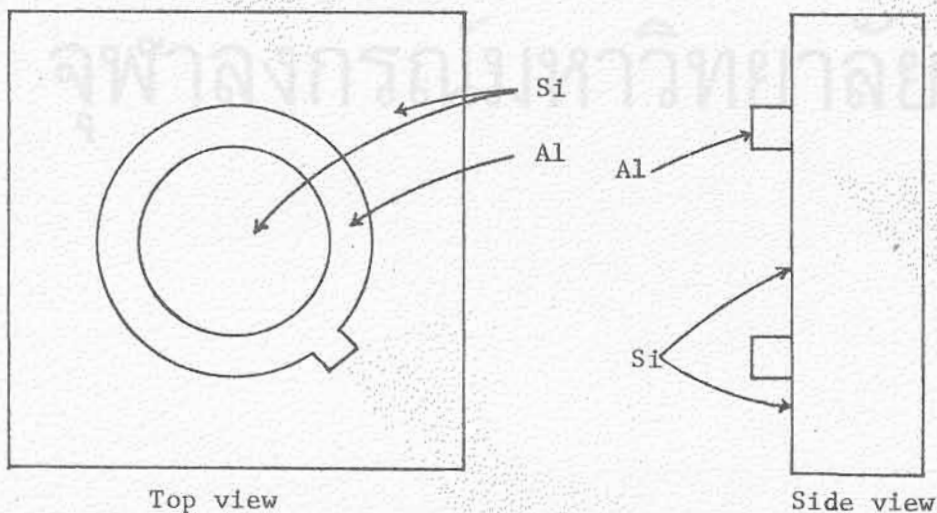
นำ sample ที่มี AR coating มากัดออกไซด์ด้านหลังออก ส่วนด้านหน้าใช้วิธีการถ่ายแบบ (photolithography) โดยใช้ mask ที่ทำขึ้นเองเพื่อกัดออกไซด์ด้านหน้าให้เป็นรูปร่างแวนดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Sample ที่มี AR coating ที่ผ่านกระบวนการ Photolithography แล้ว

3.2.3.7 ทำผิวสัมผัสด้านหน้า นำ sample ทั้งสองส่วนมาฉาบ

ไออลูมิเนียมที่ผิวด้านหน้าภายใต้ความดันบรรยากาศประมาณ 10^{-5} Torr โดยให้ชั้นอลูมิเนียม
หนาประมาณ 4000 Å sample ส่วนที่หนึ่งซึ่งไม่มีออกไซด์คลุมอยู่ นำไปกัดอลูมิเนียมส่วน
ที่ไม่ต้องการออกเหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการให้เป็นผิวสัมผัสรูปร่างแหวน (รูปที่ 3.6) สาร
เคมีที่ใช้กัดอลูมิเนียมประกอบด้วย



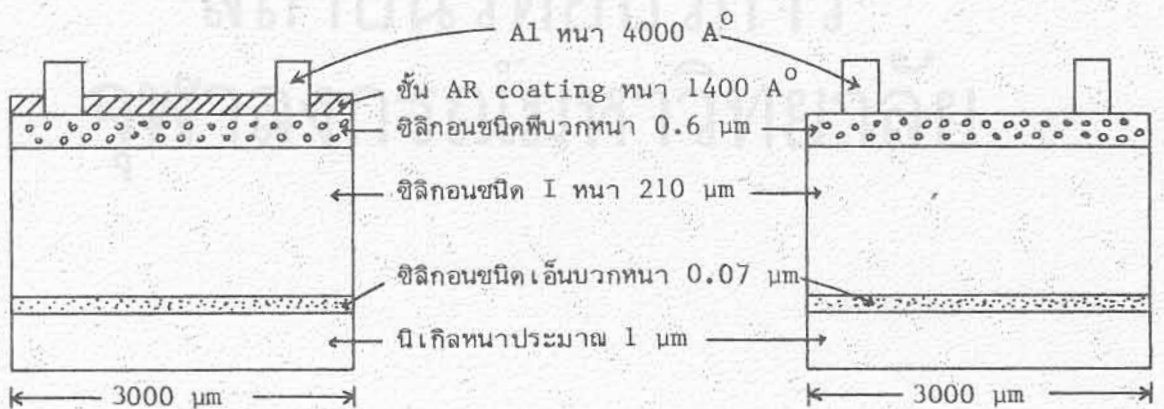
รูปที่ 3.6 Sample ที่ไม่มี AR coating ที่ผ่านการทำผิวสัมผัสโหนดมิกด้านหน้าแล้ว

H_3PO_4	200	ml
HNO_3	25	ml
H_2O (DI)	35	ml

ส่วน sample ส่วนที่ 2 ที่มี AR coating นำมาแช่ใน Acetone ซึ่ง photoresist จะถูกละลายด้วย Acetone ทำให้อลูมิเนียมที่อยู่บน photoresist หลุดออกไปด้วย วิธีการแบบนี้เรียกว่า Lift-off metallization หลังจากนั้นจึงนำไปกัดออกไซด์ออกด้วย Buffered HF เสร็จแล้วนำเอา sample ทั้งสองส่วนไปแอนเนลที่อุณหภูมิ $577^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนเป็นเวลา 4 นาที เพื่อทำให้เป็นผิวสัมผัสโอห์มมิก

3.2.3.8 ทำผิวสัมผัสด้านหลัง นำ sample ทั้งสองส่วนไปชุบ Ni ที่ผิวด้านหลังด้วยวิธีชุบนิเกิลแบบโรไฟฟ้า (ดูภาคผนวก จ) เพื่อให้ได้นิเกิลหนาประมาณ $1\ \mu m$ แล้วนำไปแอนเนลที่อุณหภูมิ $150^{\circ}C$ เป็นเวลาประมาณ 1 วัน เพื่อให้เป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก

3.2.3.9 เอา sample ทั้งสองส่วนมาแบ่งเป็นชั้นย่อยๆ นำขึ้นติดบน header โดยใช้อินเดียมและต่อเชื่อมสายโดยใช้ ultrasonic bonding โครงสร้างของโพโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น ที่มี AR และไม่มี AR coating แสดงในรูปที่ 3.7 (ก) และรูป 3.7 (ข)



รูป 3.7 (ก) พี-ไอ-เอ็นไดโอดที่มี
AR coating

รูป 3.7 (ข) พี-ไอ-เอ็นไดโอดที่ไม่มี
AR coating

4 วิธีการวิเคราะห์โฟโตไดโอด

การวิเคราะห์ผลของโฟโตไดโอดแบ่งออกเป็น สี่ข้อใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

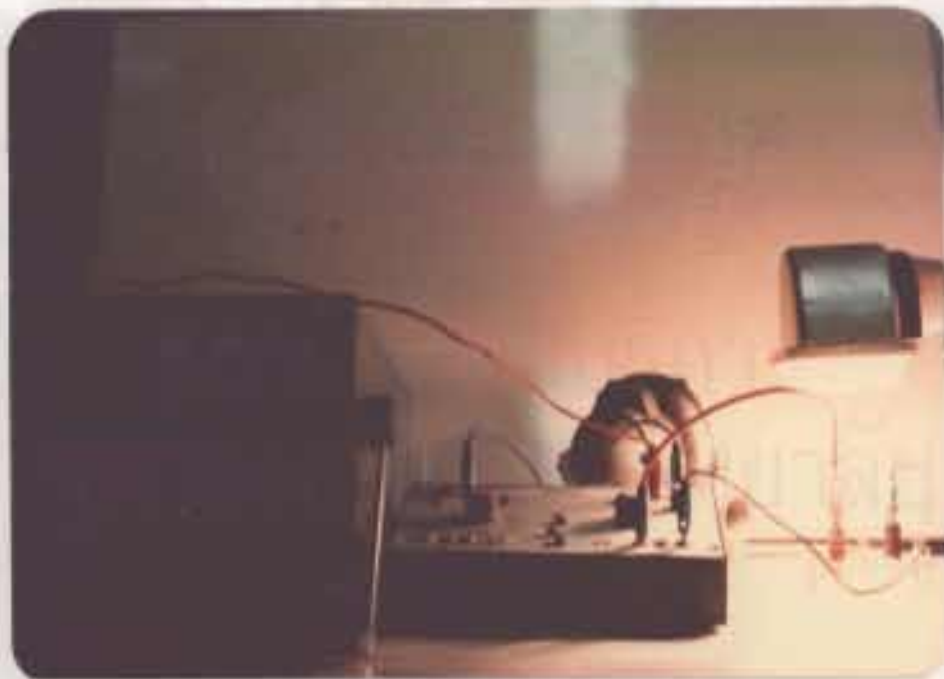
- การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน
- การหาความรู้สึกต่อแสง (Sensitivity) ที่ความถี่ต่างๆกัน
- การหาความไวของการตอบสนอง (Speed of Response) ต่อแสงอินฟราเรด
- การหาผลตอบสนองสัมพัทธ์ (Relative Spectral Response) ต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆกัน

ส่วนการหา Frequency response จะกล่าวถึงในตอนท้ายของบทนี้ ต่อจากนี้ไปบางครั้งจะเรียกโฟโตไดโอดแบบหัวต่อพี-เอ็น โฟโตไดโอดแบบเอ็น-ไอ-พี โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น ที่มี AR coating และ โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็น ที่ไม่มี AR coating ว่าโฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 รุ่นที่ 2 รุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 ตามลำดับเพื่อความสะดวก

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในการวิเคราะห์นี้ใช้หลักการเดียวกันกับการวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้แสงที่ได้จากไส้หลอดทังสเตนซึ่งปรับระยะทางระหว่างไส้หลอดกับตัวโฟโตไดโอดให้เหมาะสม โดยให้แสงที่ตกกระทบผิวหน้าของโฟโตไดโอดมีความเข้ม 100 mW/cm^2 ซึ่งเท่ากับความเข้มของแสงอาทิตย์ 1 Sun ที่สภาวะ AM 1 ความเข้มของแสง 1 Sun นี้ได้จากการเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ห้องปฏิบัติการฯ มีการตรวจดูลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันนี้ทำให้สามารถทราบได้ว่าโฟโตไดโอดแต่ละตัวหรือแต่ละรุ่นมีกระแสรั่วอันอาจจะเกิดจากการรั่วที่หัวต่อ (junction) หรือเกิดจากการรั่วที่ผิว (surface leakage) ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาในการทำโฟโตไดโอดรุ่นต่อไป แผนผังแสดงเครื่องมือที่ใช้ และภาพถ่ายของเครื่องมือที่ใช้ในการหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน มีแสดงในรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของไฟโตไดโอด



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของไฟโตไดโอด

4.2 การหาความรู้สึกลดแสง (Sensitivity) โฟโตไดโอดมีความรู้สึกลดแสงที่ความถี่ต่างกันไม่เท่ากัน ในการวิเคราะห์ที่มีผู้วิจัยได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงสองแหล่งคือ จากไส้หลอดทังสเตนซึ่งให้แสงในย่านที่ตามองเห็นได้ และแสงจาก LED (light emitting diode) เบอร์ TIL 31 ซึ่งเปล่งแสงความเข้มสูงสุดที่ $0.94 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นแสงอินฟราเรด การที่ใช้แสงสองความถี่ก็เพื่อที่จะชี้ให้เห็นอิทธิพลของชั้น Antireflection ที่มีต่อความรู้สึกลดแสงที่ความถี่ต่างๆกันของโฟโตไดโอด

4.2.1 การหาความรู้สึกลดแสงอินฟราเรดแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนดังนี้

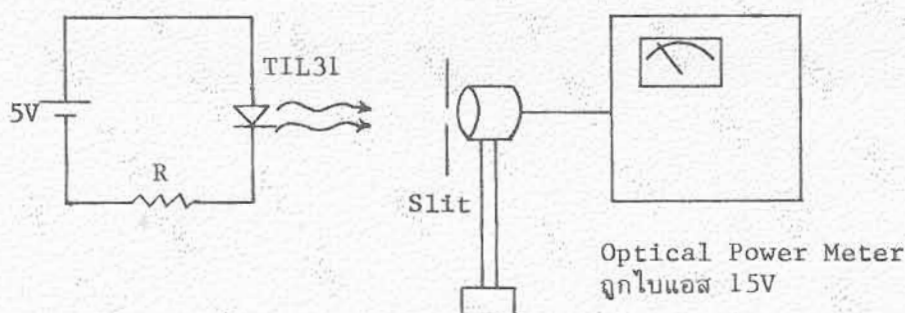
ขั้นตอนที่ 1 หากกำลังงานของแหล่งกำเนิดแสงที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงพอสมควรเพื่อที่จะประมาณได้ว่าแสงที่ได้เป็นลำแสงขนานบนพื้นที่ที่เท่ากับขนาดผิวรับแสงของโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นซึ่งมีสองขนาดคือ รุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 มีผิวรับแสง $4 \times 4 \text{ mm}^2$ และรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 มีผิวรับแสง $3 \times 3 \text{ mm}^2$ กำลังงานของแสงนี้ทำได้โดยการเจาะช่องขนาด $4 \times 4 \text{ mm}^2$ และ $3 \times 3 \text{ mm}^2$ บนแผ่นทองแดงบางๆ ปิดไว้หน้า Optical Power Meter ซึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรง 15 V และวางห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 8 cm โดยแหล่งกำเนิดแสง (TIL 31) ถูกไบแอส ด้วยแรงดันคงที่ 5 V วัดกำลังงานของแสงที่ผ่านช่องที่เจาะเอาไว้ได้ดังนี้

ช่องที่เจาะเอาไว้ $4 \times 4 \text{ mm}^2$ วัดกำลังของแสงได้ 22.5 μW

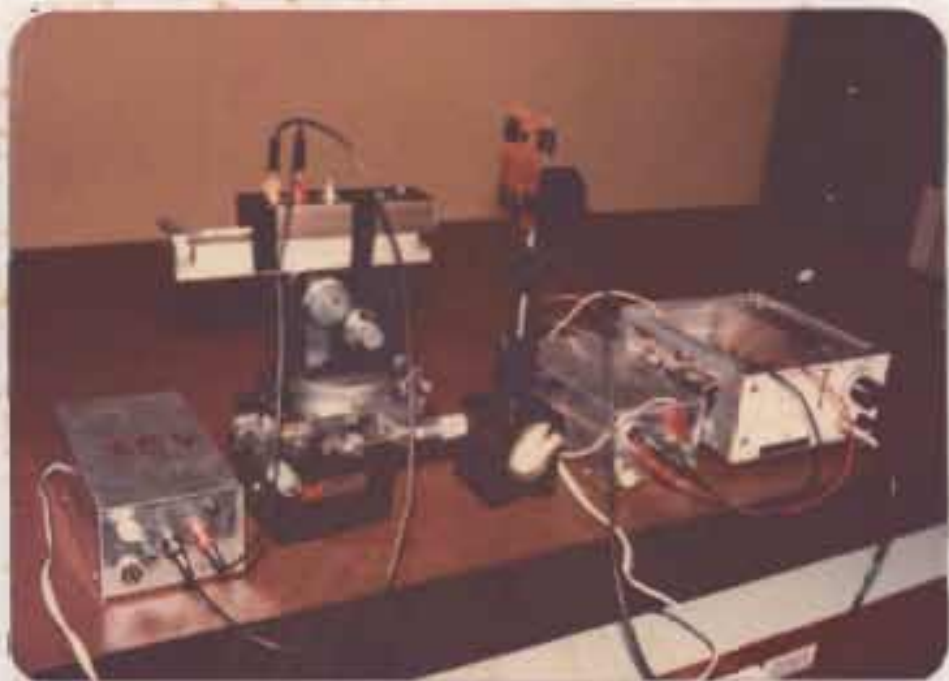
ช่องที่เจาะเอาไว้ $3 \times 3 \text{ mm}^2$ วัดกำลังของแสงได้ 14.5 μW

ขั้นตอนที่ 2 เอาโฟโตไดโอดรุ่นต่างๆไปวางแทนที่ Optical power meter โดยที่ TIL 31 ยังคงไบแอส 5 V คงที่ตามเดิม วัดกระแสลัดวงจรที่ได้จากโฟโตไดโอดก็จะได้ความรู้สึกลดแสงที่ความถี่นั้นในหน่วยของ A/W

แผนผังแสดงเครื่องมือในการหากำลังงานของแสงและภาพถ่ายเครื่องมือแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ

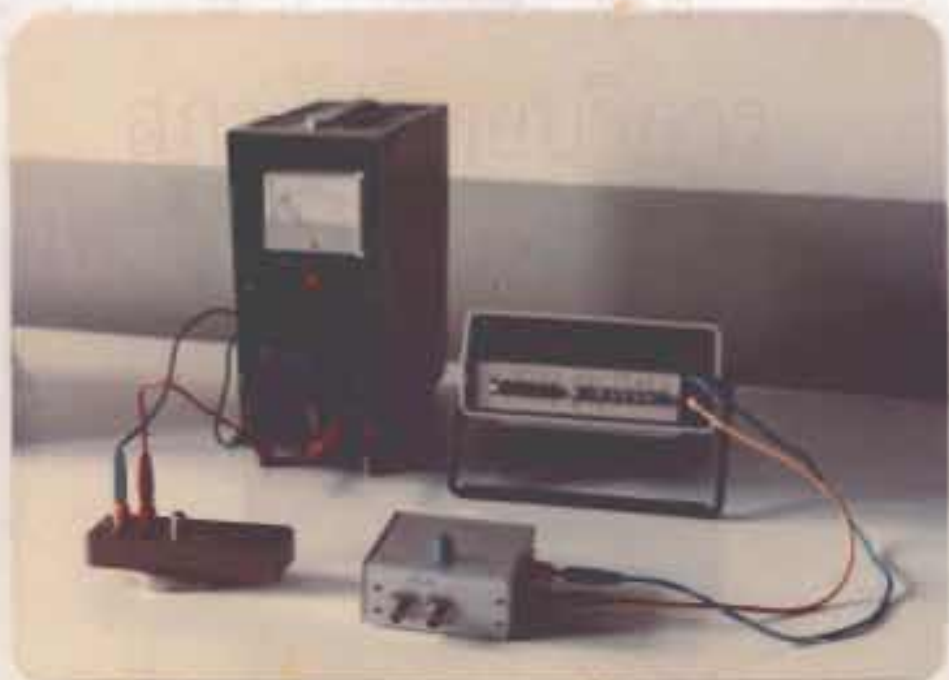


รูปที่ 4.3 แผนผังแสดงการจัดเครื่องมือเพื่อวัดกำลังงานของแสง



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายแสดงการปักเครื่องมือเพื่อวัดกำลังงานของแสง

ส่วนรูปที่ 4.5 เป็นภาพถ่ายแสดงการหากระแสสวิตซ์วงจร เมื่อใช้โพลีโพลีโกลดตามด้วยแสงอินฟราเรดจาก TIL 31 ที่ระยะทาง 8 ซม.



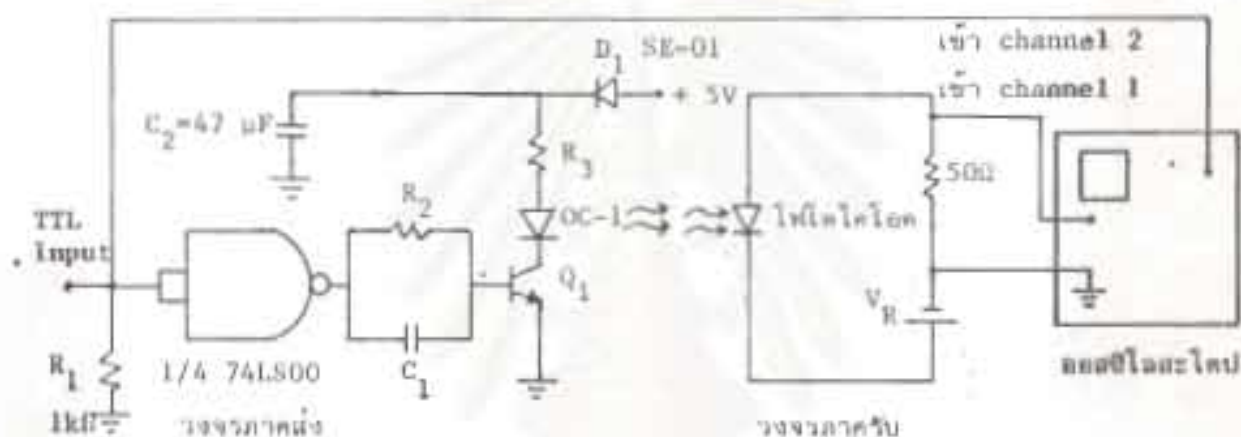
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายแสดงการหากระแสสวิตซ์วงจร เมื่อถูกฉายด้วยแสงอินฟราเรด

4.2.2 การหาความถี่สีก่อนแสงที่ได้จากไม้ทอกลึงสะเดา กรณีนี้การ
 หมายเพียงชั้นคอนเวกเตอร์โดยที่ปรับระยะระหว่างหลอดไฟกับตัวโฟโตไดโอดให้ความเข้มแสง
 100 mW/cm^2 แล้ววัดกระแสที่วงจรตั้งรูปก็สามารถหาความถี่สีก่อนแสงได้ทันที โดยที่โฟ-
 โตไดโอดรุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 มีกำลังงานของแสงตกที่ผิวรับแสงเท่ากับ 16 mW และโฟโต-
 ไดโอดรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 มีกำลังงานของแสงตกที่ผิวรับแสงเท่ากับ 9 mW รูปที่ 4.6
 แสดงภาพถ่ายการหาความถี่สีก่อนแสงที่ได้จากทอกลึงสะเดา

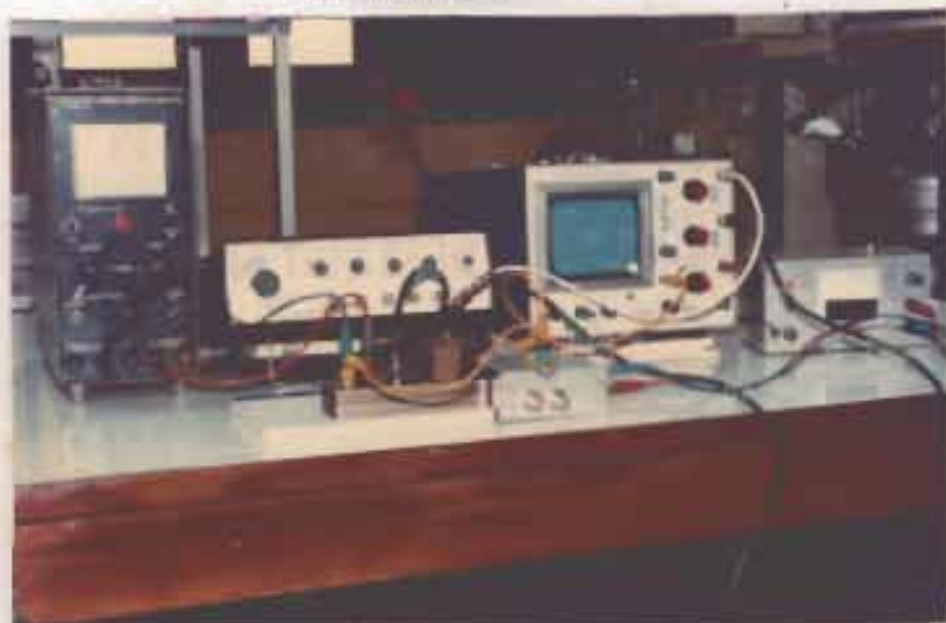


4.3 การหาความเร็วของการตอบสนอง (Speed of Response) ของแสง
อินฟราเรด แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ไดโอด LED OC-1 ซึ่งมีความเข้มของแสงที่เปล่งออก
 มาสูงที่สุดที่ความยาวคลื่น 0.85 m มีกำลังงานออกประมาณ 4 mW แหล่งกำเนิดแสง
 OC-1 นี้ได้ถูกออกแบบเพื่อใช้ในด้านการศึกษาโดยมีชุดการที่เปล่งออกเป็นแบบดิจิทัลซึ่งได้
 ขอลิขิตมาจาก วศ.ดร. อิมพิศ โรจน์ธาวานนท์ ห้องปฏิบัติการสื่อสาร ภาควิชาวิศวกรรม-
 ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนวงจรตัวตรวจจับแสงอินดิค
 โฟโตไดโอดผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรขึ้นเอง เมื่อส่งสัญญาณ TTL หรือสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม
 ให้กับตัวเข้าของภาคส่งอินดิคทั้งวงจรที่ประกอบด้วย OC-1 แสงที่ OC-1 เปล่งออกไป
 ก็จะมี ความเข้มแปรตามลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนเข้าที่ตัวเข้า เมื่อเอาโฟโตไดโอดที่
 ถูกใบและขั้วอินดิคที่ขยายแสง และถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนสูงเกินกว่าที่ส่งเข้าจนครบพลัง
 งานของอินดิคที่ไว้ทำเป็นโฟโตไดโอด พลังงานโฟตอนจะถูกดูดกลืนและกระจายขึ้นให้เกิด

ทวนแผลไฟลัดวงจรขึ้น ซึ่งขนาดของทวนแผลจะมากหรือน้อยขึ้นกับความเข้มของแสงและพื้นที่ผิวรับแสง ให้ทวนแผลลัดวงจรไหลผ่านความต้านทานค่าน้อยๆ เพื่อไม่ให้ time constant ของภาครับสูงเกินไป ในการวิเคราะห์ที่ใช้ความต้านทาน 50 โอห์ม จึงมีสัญญาณแรงดันที่หัวแมศความต้านทานเข้าออสซิลอโคปเพื่อตรวจรูปร่างของสัญญาณไฟฟ้าที่รับได้ และเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับภาคส่งอันประกอบด้วย OC-1 แผลดังแผลวงจรภาคส่งและภาครับของการหาความไวของการตอบสนองแผลงในรูปที่ 4.7 ส่วนรูปที่ 4.8 เป็นภาพถ่ายแผลงเครื่องมื่อที่ใช้รวมทั้งสัญญาณที่ส่งและรับแบบพัลลอคความถี่ 1 MHz



รูปที่ 4.7 แผลดังแผลวงจรภาคส่งและภาครับของการหาความไวของการตอบสนอง



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายแผลงเครื่องมื่อในรูป 4.7

จากการวัดเราสามารถวัดข้อมูลต่างๆออกมาได้ 4 ตัว คือ

ก t_r (rise time) คือระยะเวลาที่สัญญาณซึ่งรับได้ที่โฟโตไดโอด เปลี่ยนจาก 10 เปอร์เซ็นต์ไปเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุด เมื่อสัญญาณที่ส่งเป็น แบบขั้นบันไดหรือสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

ข t_f (fall time) คือระยะเวลาที่สัญญาณซึ่งรับได้ที่โฟโตไดโอด เปลี่ยนจาก 90 เปอร์เซ็นต์ไปเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุด เมื่อสัญญาณที่ส่งเป็น แบบขั้นบันไดหรือสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

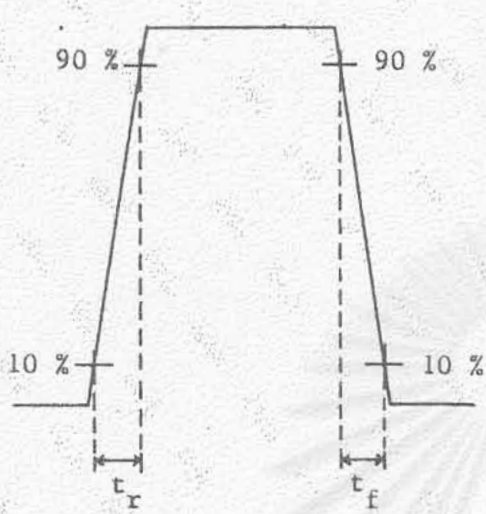
ค t_{PLH} (propagation delay time, low-to-high-level output) คือช่วงเวลานับจุดที่กำหนดสองจุดบนสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่เป็นแรงดันไฟฟ้า (โดยทั่วไปมักจะใช้ค่าเฉลี่ยระหว่างระดับแรงดันสูงและระดับแรงดันต่ำของสัญญาณเข้าและ ออกเป็นจุดที่กำหนด) โดยที่สัญญาณออกเปลี่ยนจากระดับแรงดันต่ำที่จุดกำหนดไปเป็นระดับ แรงดันสูงที่จุดกำหนด

ง t_{PHL} (propagation delay time, high-to-low-level output) คือช่วงเวลานับจุดที่กำหนดสองจุดบนสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่เป็นแรงดันไฟฟ้า (โดยทั่วไปมักจะใช้ค่าเฉลี่ยระหว่างระดับแรงดันสูงและระดับแรงดันต่ำของสัญญาณเข้าและ สัญญาณออกเป็นจุดที่กำหนด) โดยที่สัญญาณออกเปลี่ยนจากระดับแรงดันสูงที่จุดกำหนดไปเป็น ระดับแรงดันต่ำที่จุดกำหนด

ข้อมูล ก และ ข คือ rise time และ fall time ใช้กันมาก ทางด้านการสื่อสารทางแสง ส่วนข้อมูล ค และ ง มีใช้บ้างแต่น้อยมากมักจะใช้กับวงจร ไอซีมากกว่าแต่ก็นำมาเปรียบเทียบให้อู่ในการวิเคราะห์นี้ รูป 4.9 ก แสดงถึงการหา rise time และ fall time ของสัญญาณ ส่วนรูป 4.9 ข แสดงถึงการหา t_{PLH} และ t_{PHL} ของสัญญาณ

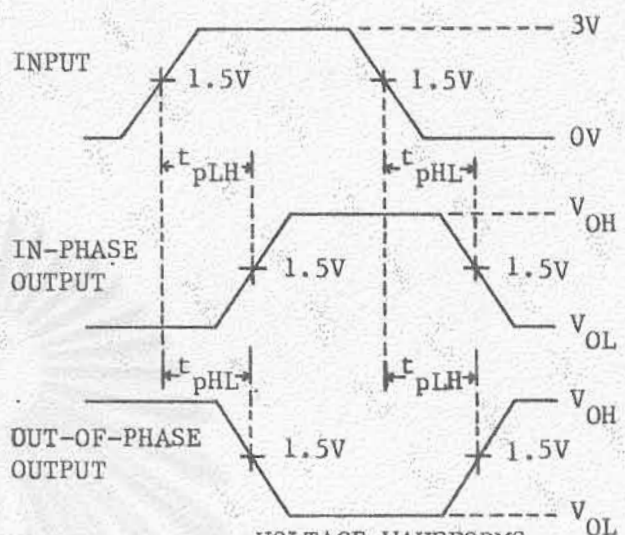
4.4 การหาผลตอบสนองสัมพัทธ์ (Relative Spectral Response)

ต่อแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆกัน การหาผลตอบสนองสัมพัทธ์นี้ทำได้ง่าย ๆ โดยใช้หลอดทัง- สเตนซึ่งสามารถปรับความเข้มแสงได้โดยใช้วารีแอค (variac) และมีตัวสะท้อนแสง (reflector) เพื่อให้แสงออกมาทางเดียว ใช้เลนซ์นูน 2 อัน โฟกัสแสงให้ตกยัง รูเข้า (input slit) ของ Monochromator รุ่น H 25 ของ JOBIN YVON



VOLTAGE WAVEFORM

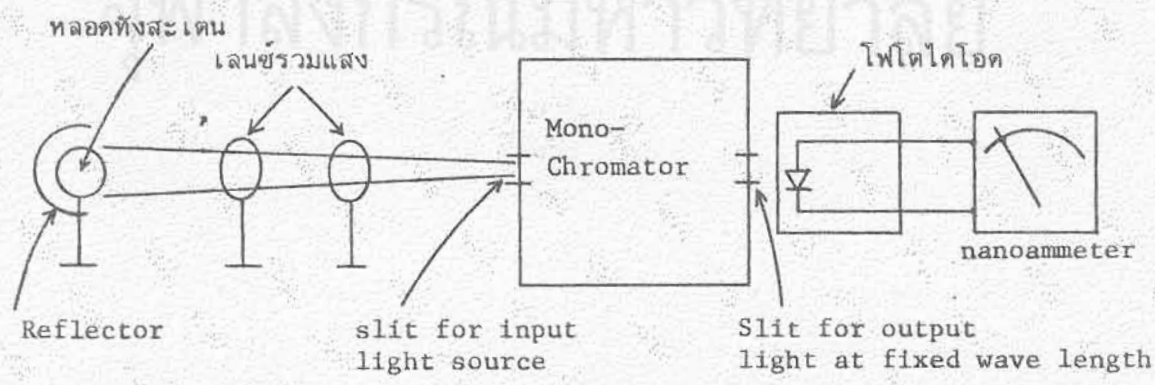
รูปที่ 4.9 ก แสดงการหา t_r และ t_f



VOLTAGE WAVEFORMS PROPAGATION DELAY TIMES

รูปที่ 4.9 ข แสดงการหา t_{pLH} และ t_{pHL}

ซึ่งสามารถปรับให้แสงที่รูออก (output slit) มีค่าตั้งแต่ 0-1200 nm อย่างต่อเนื่องกันโดยใช้ grating ที่รูออกของ Monochromator ใช้โฟโตไดโอดรุ่นต่างๆ ที่ต้องการหาผลตอบสนองสัมพัทธ์มารับแสง และอ่านค่าผลตอบสนองสัมพัทธ์ได้โดยตรงในหน่วยของกระแสโดยใช้ Nanoampere meter เนื่องจากความเข้มของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ไม่เท่ากัน จึงจำเป็นต้องปรับค่ากระแสที่อ่านได้ให้แปรไปตามความเข้มแสง ซึ่งความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างกันนี้ทำได้โดยใช้ Photomultiplier tube ของ Hamamatsu TV Co., Ltd เบอร์ S-1 แผนผังเครื่องมือที่ใช้แสดงในรูปที่ 4.10 และภาพถ่ายเครื่องมือแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 แผนผังเครื่องมือที่ใช้ในการหาผลตอบสนองสัมพัทธ์



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายแสดงเครื่องมือที่ใช้หาคอมพลกซ์ของวงจร

ส่วนการหา frequency response นั้นมีอุปกรณ์ของประเภทคือ ประเภทแรกคือพวกแหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถจ่ายสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่สูงๆ ตั้งแต่สิบกว่าเมกะเฮิรตซ์ขึ้นไปและต้องมีการใส่และใส่ที่มีความถี่สูงด้วย อุปกรณ์ที่สามารถที่จะบอกได้ไม่มากนัก ส่วนอีกประเภทที่อาจจะทำได้ไม่สามารถหา frequency response ได้โดยตรงก็คือ แหล่งกำเนิดแสงซึ่งสามารถที่จะใช้การสื่อสารส่งสัญญาณแสงเป็นแบบดิจิทัล ซึ่งการหา frequency response นั้นแหล่งกำเนิดแสงก็สามารถส่งสัญญาณเป็นแบบอนาล็อกได้และสัญญาณที่ใช้คือจะเป็นรูปขบวน อย่างไรก็ตามความถี่ที่ใช้ได้จะเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก 2 MHz ใกล้เคียงกับสัญญาณที่ส่งพบว่ามีการบิดเบือน (distortion) น้อยมาก และเมื่อเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่ 10 MHz สัญญาณที่รับได้ก็ยังคงสภาพเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมอยู่และแสดงให้เห็นว่า โฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นสามารถรับข่าวสารที่ส่งมาได้โดยไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นๆ เท่าที่กล่าวถึงข้างต้นที่พูดถึง 10 MHz ขึ้นไป

5 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลของโฟโตโวลตาอิก

ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ว่าโฟโตโวลตาอิกถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษา 4 รุ่น

- รุ่นที่ 1 คือ โฟโตโวลตาอิกแบบซิลิคอน-แอมอร์ฟัส
- รุ่นที่ 2 คือ โฟโตโวลตาอิกแบบซิลิคอน-โพลีคริสตัลไลน์
- รุ่นที่ 3 คือ โฟโตโวลตาอิกแบบฟิล์มบางชนิด Perovskite AR coating
- รุ่นที่ 4 คือ โฟโตโวลตาอิกแบบฟิล์มบางชนิด Perovskite AR coating

แต่ละรุ่นมีโฟโตโวลตาอิกจำนวนมากกว่า แต่ถูกเชื่อมกับแผง header เพื่อ

วิเคราะห์เพื่อจะดูว่าไม่มีความเสียหาย header จำนวนจำกัดดังนี้

- รุ่นที่ 1 มีแผง header 6 แผง
- รุ่นที่ 2 มีแผง header 11 แผง
- รุ่นที่ 3 มีแผง header 10 แผง
- รุ่นที่ 4 มีแผง header 10 แผง

รูปที่ 5.1 แผงของโฟโตโวลตาอิกที่เชื่อมกับแผง header จำนวนที่พร้อมที่จะ

โฟโตโวลตาอิก 2 เซลล์ที่มีภายในห้องความดันบรรยากาศเปรียบเทียบซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 6 ต่อไป



รูปที่ 5.1 กลุ่มของโฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นและโฟโตโวลตาอิกที่มีภายในห้องความดัน 2 เซลล์

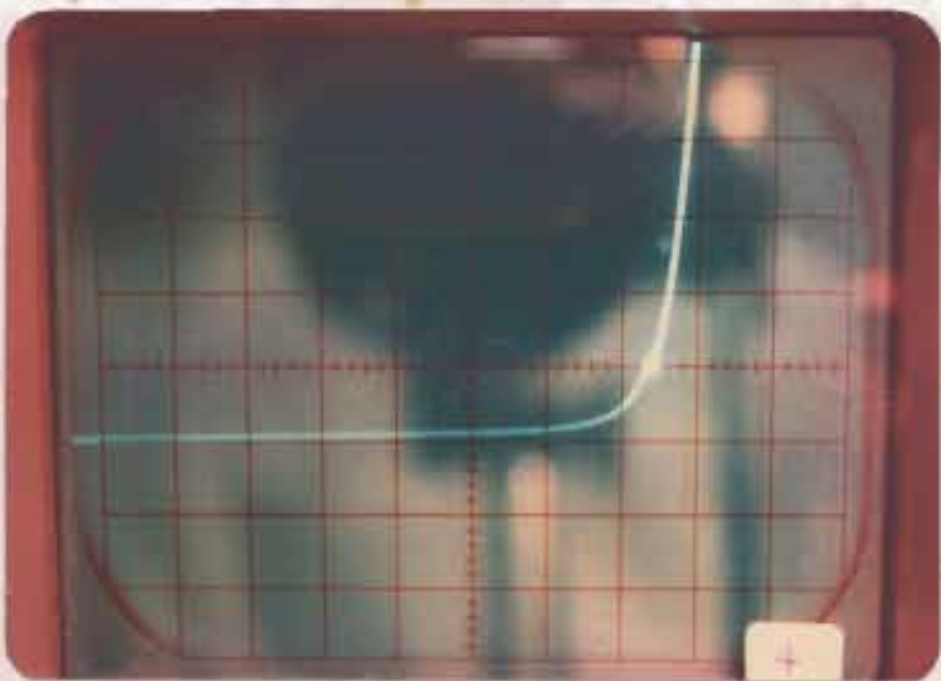


โฟโตไดโอดทุกตัวผ่านทราวิเคราะห้ผลสามข้อแรกทีกล่าวถึงในบทที่ 4 ยกเว้นข้อสุดท้ายคือ การวิเคราะห์ผลตอบสนองฉับพลันซึ่งโฟโตไดโอดแต่ละรุ่นถูกเลือกขึ้นมาศึกษาเพียงรุ่นละ 2 ตัว เท่านั้นเนื่องจากการวัดต้องใช้เวลาาก โฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 ซึ่งมีผิวรับแสง 16 mm^2 เมื่อสักส่วนที่เป็นซิลิโคนโรครโตะวงกลมออกจะ เหลือพื้นที่ผิวรับแสงประสิทธิผลเพียง 15.2 mm^2 เท่านั้น ส่วนโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 ซึ่งมีผิวรับแสง 9 mm^2 เมื่อสัก ส่วนที่เป็นซิลิโคนโรครโตะแนววงแหวนออกจะ เหลือพื้นที่ผิวรับแสงประสิทธิผลเพียง 7.5 mm^2

5.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน รูปที่ 5.2 รูปที่ 5.3

รูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 เป็นภาพถ่ายลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอดทั้งสี่รุ่นตามลำดับ เมื่อแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดทังสแตนและปรับระยะให้มีความเข้มแสงที่ผิวรับแสงของโฟโตไดโอด 100 mW/cm^2 ผลของการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็นสองหัวข้อย่อยคือ แรงดันวงจรเปิด V_{oc} กับกระแสลัดวงจร I_{sc} และกระแสรั่ว

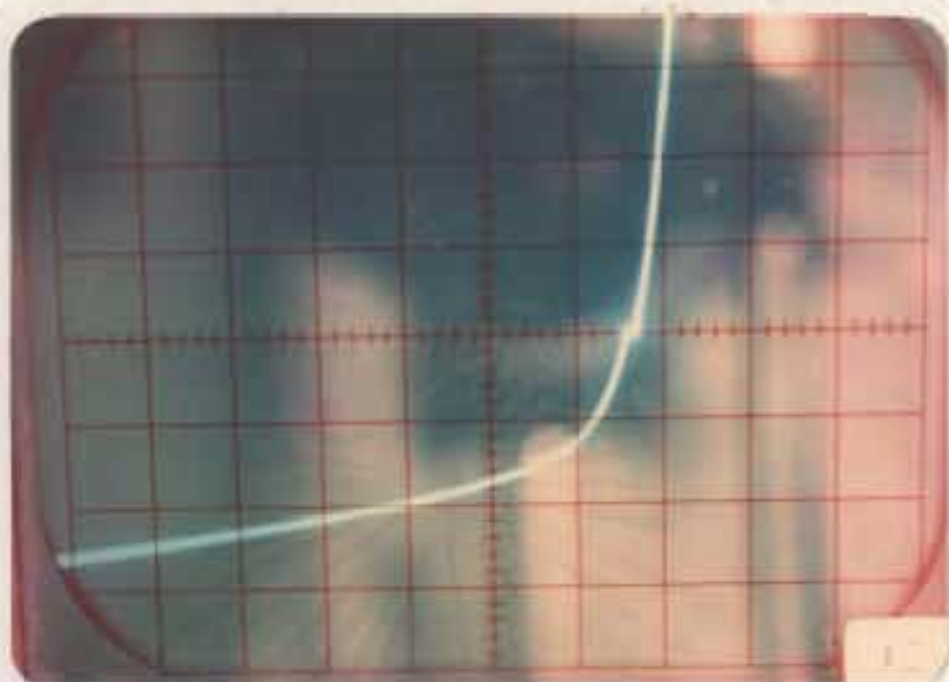
5.1.1 แรงดันวงจรเปิด จะเห็นได้ชัดว่าแรงดันวงจรเปิดของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 มีค่ามากกว่าของรุ่นอื่นๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้แรงดันวงจรเปิดจะแปรตาม



รูปที่ 5.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 หมายเลข 4

แกน X : 0.2 V/DIV. แกน Y : 5 mA/DIV.

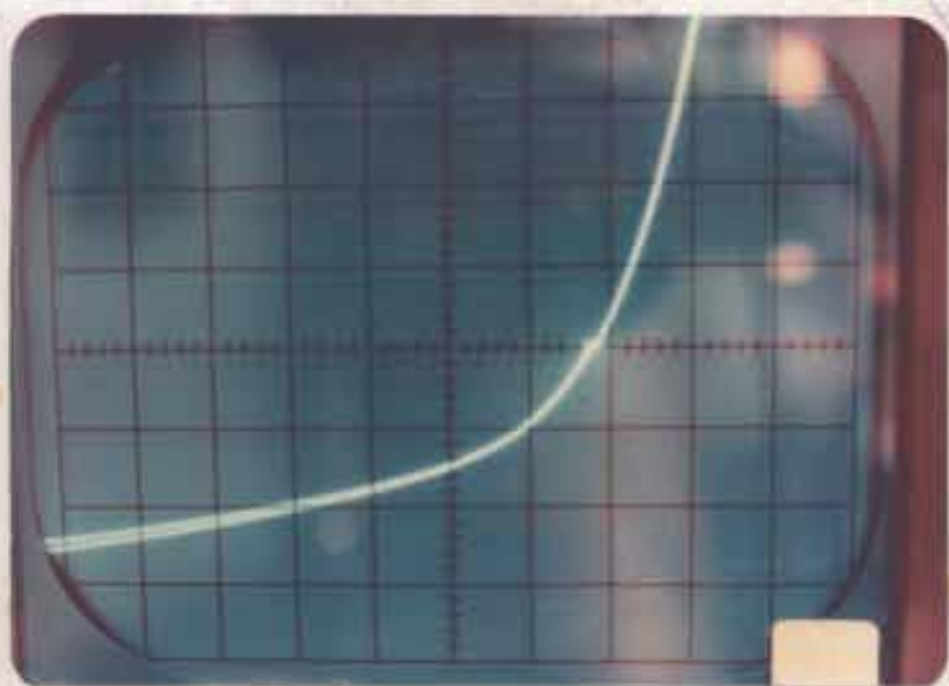
$V_{oc} = 0.49 \text{ V}$ $I_{sc} = 29.6 \text{ mA/cm}^2$



รูป 5.3 ลักษณะกราฟกระแส-แรงดันของโพลีโอดชนิดที่ 2 หมายเลข 12

แกน X : 0.2 V/DIV. แกน Y : 0.5 mA/DIV.

$V_{oc} = 0.34 \text{ V}$ $I_{sc} = 5.59 \text{ mA/cm}^2$



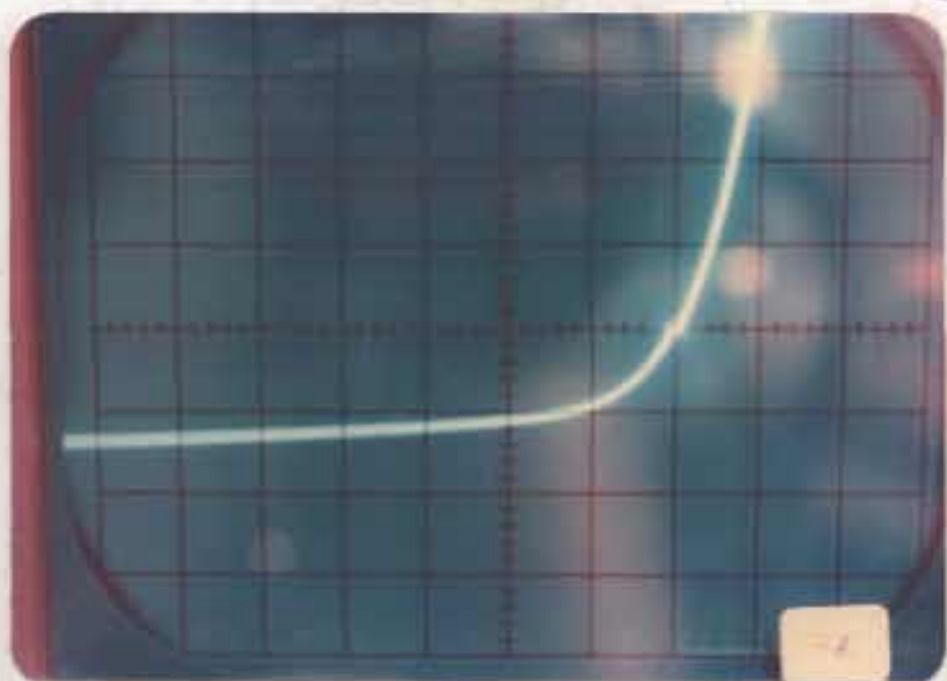
รูป 5.4 ลักษณะกราฟกระแส-แรงดันของโพลีโอดชนิดที่ 3 หมายเลข 22

แกน X : 0.2 V/DIV. แกน Y : 1 mA/DIV.

$V_{oc} = 0.36 \text{ V}$ $I_{sc} = 19.3 \text{ mA/cm}^2$

built-in voltage V_{bi} ของตัวต่อ และ V_{bi} ของตัวต่อจะแปรผกผันกับความหนาแน่นของพาหะ¹⁴ และโฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 มีความหนาแน่นของพาหะสูงกว่ารุ่นอื่นๆ ในลักษณะเดียวกันจะเห็นว่าแรงดันวงจรเปิดของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 สูงกว่าของรุ่นที่ 2

5.1.2 กระบวนการสร้างกระแส จะเห็นว่ากระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 (รูปที่ 5.2) มีค่ามากกว่ารุ่นอื่นๆค่อนข้างมาก เนื่องจากว่าชั้น antireflection ของมันถูกออกแบบให้พอเหมาะกับการสะท้อนและแสงจากหลอดสังกะสี ทำให้พลังงานโฟตอนถูกสะท้อนกลับน้อย การที่โฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 มีกระแสลัดวงจรน้อยมากก็เนื่องจากว่าชั้นออกไซด์ระหว่างสารกึ่งตัวนำเกิดแตกหัก ทำให้มีชั้นบางๆคลุมอยู่บนชั้นออกไซด์ที่หน้าที่เป็น AR coating ชั้นบางๆของมันก็เลยสะท้อนแสงปล่อยให้พลังงานโฟตอนทะลุเข้ามาถึงเนื้อซิลิกอนน้อยทำให้การสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลน้อยตามไปด้วย ส่วนโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 ชั้น AR coating ถูกออกแบบให้ใช้กับแสงที่มีความยาวคลื่นสูงในย่านอินฟราเรด มันปล่อยให้แสงจากหลอดสังกะสีทะลุเข้ามาได้น้อยกว่ารุ่นที่ 1



รูปที่ 5.5 ลักษณะของกราฟกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 4 หมายเลข 36

แกน X : 0.2V/DIV. แกน Y : 2mA/DIV.

$V_{oc} = 0.4V$ $I_{sc} = 29.3 \text{ mA/cm}^2$

มาพิจารณาถึงกระแสรั่วจะเห็นว่าโฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 และรุ่นที่ 3 (รูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4) มีกระแสรั่วมาก อาจจะเป็นได้จากหลายสาเหตุหลายประการเช่น

- มีโครงสร้างต่างกัน โฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 มีโครงสร้างง่ายและขั้นตอนการสร้างสั้น ทำให้บริเวณหัวต่อมีความสมบูรณ์กว่ารุ่นอื่นๆ กระแสรั่วจึงมีค่าน้อย
- สภาพของเครื่องมือและน้ำปราศจากอ็อกซิเจนและก๊าซต่างกัน โฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 ถูกสร้างขึ้นก่อนหลังจากที่ได้บำรุงรักษาทำความสะอาดเตา และเครื่องทำน้ำปราศจากอ็อกซิเจน regenerate ใหม่ ทำให้น้ำที่ใช้ในการสร้างไดโอดมีความบริสุทธิ์สูง ย่อมทำให้สิ่งประดิษฐ์ที่ได้มีกระแสรั่วต่ำ ส่วนโฟโตไดโอดรุ่นอื่นๆถูกสร้างขึ้นหลังจากรุ่นแรกเป็นเวลากว่าหลายเดือน น้ำที่ใช้มีความบริสุทธิ์ต่ำลง เมื่อใช้ล้างแวนผลึกในขั้นตอนต่างๆย่อมทำให้แวนผลึกไม่สะอาดพอ นอกจากนี้ น้ำปราศจากอ็อกซิเจนยังใช้ทำออกไซด์ซึ่งเป็นชั้น AR coating เมื่อน้ำไม่บริสุทธิ์พอชั้นออกไซด์ที่ได้อาจสามารถนำไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดกระแสรั่วที่ผิวผ่านชั้นออกไซด์จากอิเล็คโทรดด้านหน้าไปยังอิเล็คโทรดด้านหลัง ซึ่งกระแสรั่วที่ผิวนี้ จะเห็นได้ชัดในโฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 และรุ่นที่ 3 ส่วนรุ่นที่ 4 ไม่มี AR coating กระแสรั่วจะน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด

5.2 ผลการวิเคราะห์ความรู้สึกต่อแสง (Sensitivity or Responsivity)

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้หาความรู้สึกต่อแสงมี 2 แหล่งคือ

- LED TIL31 ซึ่งมีความเข้มสูงสุดของการเปล่งแสงที่ $0.94 \mu\text{m}$ จากบทที่ 4 หากกำลังงานของแสงที่ตกบนผิวรับแสงของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 รุ่นที่ 2 ได้ $22.5 \mu\text{W}$ และกำลังงานของแสงที่ตกบนผิวรับแสงของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 รุ่นที่ 4 ได้ $14.5 \mu\text{W}$ แต่เนื่องจากว่าผิวรับแสงต้องมีขั้วโลหะทำเป็นอิเล็คโทรด ดังนั้นผิวรับแสงประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดรุ่นต่างๆจะน้อยลง ทำให้กำลังงานของแสงประสิทธิภาพที่ถูกชดเชยลดลงน้อยลงไปเป็นสัดส่วนกัน ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการหาค่ากำลังงานของแสงประสิทธิภาพ

	พื้นที่ผิวรับแสง	กำลังงานแสงที่วัดได้	พื้นที่ผิวรับแสงประสิทธิภาพ	กำลังงานแสงประสิทธิภาพ
โฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 และ 2	16 มม^2	$22.50 \mu\text{W}$	15.21 มม^2	$21.38 \mu\text{W}$
โฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 และ 4	9 มม^2	$14.50 \mu\text{W}$	7.50 มม^2	$12.08 \mu\text{W}$

* หมายเหตุ กำลังงานของแสงไม่ได้แปร เป็น เชิง เส้นกับพื้นที่รับแสง

- แสงจากหลอดทั้งสี่ เต็มซึ่งปรับให้มีความเข้มแสงที่ผิวรับแสงของโฟโตไดโอดเท่ากับ 100 mW/cm^2 เมื่อหักอิเล็กทรอนิกส์ทรูดอกจะทำให้กำลังงานแสงประสิทธิผลที่ตกกระทบตัวโฟโตไดโอดมีค่าดังนี้

โฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 และ 2 มีกำลังตกกระทบประสิทธิผล = 15.21 mW

โฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 และ 4 มีกำลังตกกระทบประสิทธิผล = 7.50 mW

หมายเหตุ กำลังงานของแสงแปร เป็นเชิงเส้นกับพื้นที่ผิวรับแสงสำหรับพื้นที่ผิวรับแสงที่ต่างกัน เล็กน้อย

5.2.1 ความรู้สึกต่อแสงอินฟราเรดความยาวคลื่น $0.94 \mu\text{m}$ จากการวัดกระแสลัดวงจรเมื่อโฟโตไดโอดถูกฉายด้วยแสงอินฟราเรด จะได้ผลการทดลองดังสรุปในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความรู้สึกต่อแสงอินฟราเรด $0.94 \mu\text{m}$ ของโฟโตไดโอดทั้งสี่รุ่น

โฟโตไดโอด		กระแสลัดวงจร (μA)	ความหนาแน่นของ กระแสลัดวงจร ($\mu\text{A/cm}^2$)	ความรู้สึกต่อแสง (A/W)
รุ่นที่ 1	ค่าสูงสุด	10.5	69.03	0.49
	ค่าเฉลี่ย	9.7	63.77	0.45
	ค่าต่ำสุด	8.7	57.20	0.41
รุ่นที่ 2	ค่าสูงสุด	5.4	35.50	0.25
	ค่าเฉลี่ย	3.9	25.64	0.18
	ค่าต่ำสุด	3.3	21.70	0.15
รุ่นที่ 3	ค่าสูงสุด	6.7	89.33	0.55
	ค่าเฉลี่ย	6.3	84.00	0.52
	ค่าต่ำสุด	5.7	76.00	0.47
รุ่นที่ 4	ค่าสูงสุด	6.3	84.00	0.52
	ค่าเฉลี่ย	5.9	78.67	0.49
	ค่าต่ำสุด	5.6	74.67	0.46

จากตารางจะเห็นว่าความรู้สึกต่อแสงอินฟราเรดของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 มีค่าน้อยมาก ซึ่งสาเหตุก็ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 5.1.2 กล่าวคือบนชั้น antireflection มีฟิล์มบางๆของ Si เกิดคลุมอยู่ซึ่งสกัดกั้นแสงจำนวนหนึ่งไม่ให้ทะลุมาถึงตัวโฟโตไดโอด ส่วนการที่โฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 มีความรู้สึกต่อแสงน้อยกว่ารุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 สามารถอธิบายได้ว่าเป็นเพราะไดโอดรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 มีความต้านทานจำเพาะของแวนดิสก์สูงกว่าและมีโครงสร้างแบบพี-ไอ-เอ็นทำให้ความกว้างของเขตปลอดพาหะ (W) มีค่ามากกว่า กระแสโฟโตที่เกิดขึ้นบนพื้นที่เท่ากันย่อมมากกว่าดังจะเห็นได้จากสมการ (2.6) ซึ่งจะนำมาเขียนซ้ำในที่นี้

$$I_p = P_{opt} \frac{q(1-R)(1-e^{-\alpha W})}{h\nu} \quad (2.6)$$

ส่วนการที่โฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 มีความรู้สึกต่อแสงมากกว่ารุ่นที่ 4 เนื่องจากว่ารุ่นที่ 3 มีชั้น antireflection ซึ่งช่วยลดการสะท้อนแสงที่ผิวของซิลิกอน ในทางทฤษฎีความหนาของชั้น antireflection ที่พอเหมาะที่ทำให้การสะท้อนกลับของแสงน้อยที่สุดมีค่า¹⁵

$$T_f = \frac{1}{4} \frac{\lambda_{min}}{n_{ar}} \quad (5.1)$$

เมื่อ T_f คือความหนาของชั้น antireflection ที่จะทำให้แสงที่ความถี่ที่ต้องการมีการสะท้อนกลับน้อยที่สุด

λ_{min} คือความยาวคลื่นแสงที่ต้องการให้มีการสะท้อนกลับน้อยที่สุด

n_{ar} คือดัชนีของการหักเห (index of refraction)

และค่า n_{ar} ต้องมีค่า

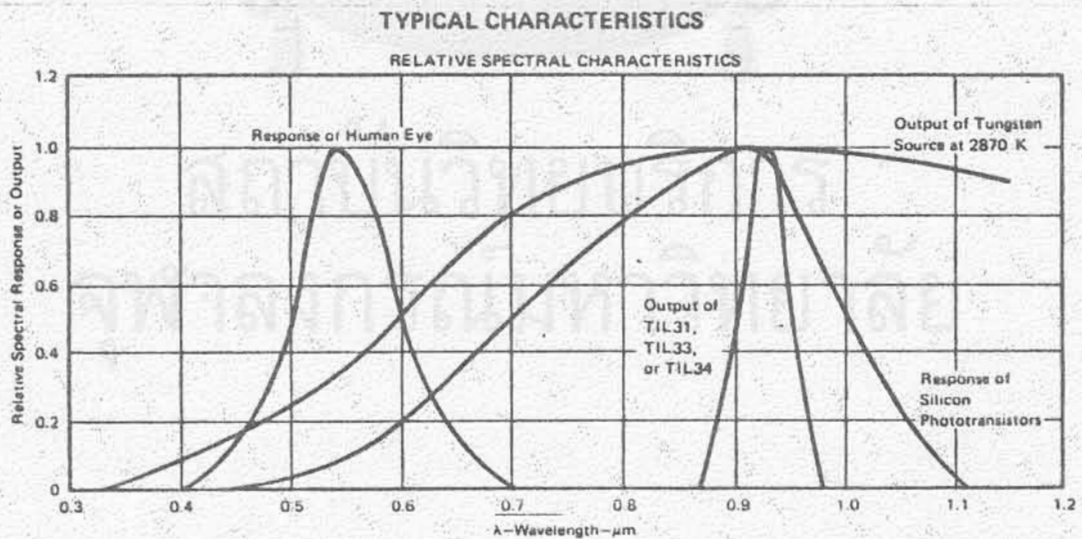
$$n_{ar} = \sqrt{n_1 n_2} \quad (5.2)$$

เมื่อ n_1 คือดัชนีของการหักเหของซิลิกอน

n_2 คือดัชนีของการหักเหของอากาศ

n_1 มีค่าประมาณ 3.9 และ n_2 มีค่าเท่ากับ 1 ทำให้ n_{ar} มีค่าประมาณ 2.0 จะเห็นว่าวัสดุที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นชั้น antireflection ได้แก่ Si_3N_4 ซึ่งมีค่าดัชนีของการหักเหเท่ากับ 2.05 และวัสดุอื่นๆที่เหมาะสมได้แก่ SiO , TiO_2 , Ta_2O_3 และ SnO_2 ส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งใช้เป็นชั้น antireflection ในการวิจัยนี้มีดัชนีของการหักเหเท่ากับ 1.46 ซึ่งไม่ค่อยเหมาะสมนักในทางทฤษฎีที่จะใช้ทำชั้น antireflection ถ้าเราอนุโลมให้ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ได้ ความหนาที่เหมาะสมเมื่อคำนวณจากสูตร (5.1) จะมีค่าประมาณ 1400 \AA ซึ่งเท่ากับที่ได้สร้างขึ้น

ในทางทฤษฎีความรู้สึกต่อแสงจะมีค่าเท่ากับ $\lambda/1.24$ ตามสมการ (2.9) โดยที่สมมติว่าประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าเท่ากับ 1 และสูตรนี้จะใช้ได้ถูกต้องเมื่อแสงที่เกี่ยวข้องเป็นแสงความถี่เดียว ซึ่งแสงที่ได้จาก TIL31 ซึ่งเป็น LED มีสเปกตรัมของแสงค่อนข้างแคบและมีความเข้มแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น $0.94 \mu m$ ดังแสดงในรูปที่ 5-6 ถ้าเราอนุโลมว่าแสงจาก TIL31 มีความถี่เดียวและใช้สูตร (2.9) จะได้ความรู้สึกต่อแสงสูงสุดทางทฤษฎีเท่ากับ 0.76 A/W จะเห็นว่าค่าความรู้สึกต่อแสงสูงสุดของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 มีค่า 0.55 A/W ซึ่งน้อยกว่าค่าอุดมคติทางทฤษฎีเพียง 27.6 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น



รูปที่ 5.6 Relative spectral response พล็อตกับความยาวคลื่นแสง สำหรับแหล่งกำเนิดแสงประเภทต่างๆรวมทั้งแหล่งกำเนิดแสงจาก LED TIL31 และหลอดทังสเตน

5.2.2 ความรู้สึกต่อแสงจากหลอดทั้งสี่ เตน วิธีที่ใช้หาความรู้สึกต่อแสง จากหลอดทั้งสี่ เตน ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อ 4.2.2 จากการวัดกระแสลัดวงจรเมื่อถูกฉายด้วย แสงความเข้ม 100 mW/cm^2 สามารถสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ความรู้สึกต่อแสงที่ได้จากหลอดทั้งสี่ เตนของโฟโตไดโอดทั้งสองรุ่น

โฟโตไดโอด		กระแสลัดวงจร (mA)	ความหนาแน่นของ กระแสลัดวงจร (mA/cm ²)	ความรู้สึกต่อแสง (A/W)
รุ่นที่ 1	ค่าสูงสุด	4.28	28.14	0.28 (0.281)
	ค่าเฉลี่ย	3.99	26.23	0.26
	ค่าต่ำสุด	3.41	22.42	0.22
รุ่นที่ 2	ค่าสูงสุด	0.87	5.72	0.057
	ค่าเฉลี่ย	0.70	4.60	0.046
	ค่าต่ำสุด	0.59	3.88	0.039
รุ่นที่ 3	ค่าสูงสุด	1.37	18.27	0.18
	ค่าเฉลี่ย	1.13	15.07	0.15
	ค่าต่ำสุด	0.90	12.00	0.12
รุ่นที่ 4	ค่าสูงสุด	2.09	27.87	0.28 (0.279)
	ค่าเฉลี่ย	1.87	24.93	0.25
	ค่าต่ำสุด	1.19	15.87	0.16

จะเห็นว่าความรู้สึกต่อแสงของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 ต่ำกว่ารุ่นอื่นๆ ซึ่งสาเหตุ ก็ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 5.1.2 และหัวข้อ 5.2.1 คือมีชั้นฟิล์มบางๆคลุมชั้น antireflection อยู่ ส่วนการที่ความรู้สึกต่อแสงของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 สูงกว่ารุ่นที่ 3 ก็เนื่องจากว่าความหนาของชั้น antireflection (800 \AA) ของรุ่นที่ 1 ถูกออกแบบ ให้มีการสะท้อนกลับของแสงน้อยที่สุดสำหรับสเปกตรัมแสงอาทิตย์ และสเปกตรัมจากหลอด ดังสี่ เตนก็ไม่ผิดไปจากของแสงอาทิตย์เท่าไรนัก ในขณะที่ชั้น antireflection (1400 \AA) ของรุ่นที่ 3 ถูกออกแบบให้มีการสะท้อนกลับของแสงน้อยที่สุดที่แสงความยาวคลื่นประมาณ 0.94 \mu m ทำให้ปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนและกระตุ้นให้เกิดเป็นกระแสโฟโตในรุ่นที่ 1

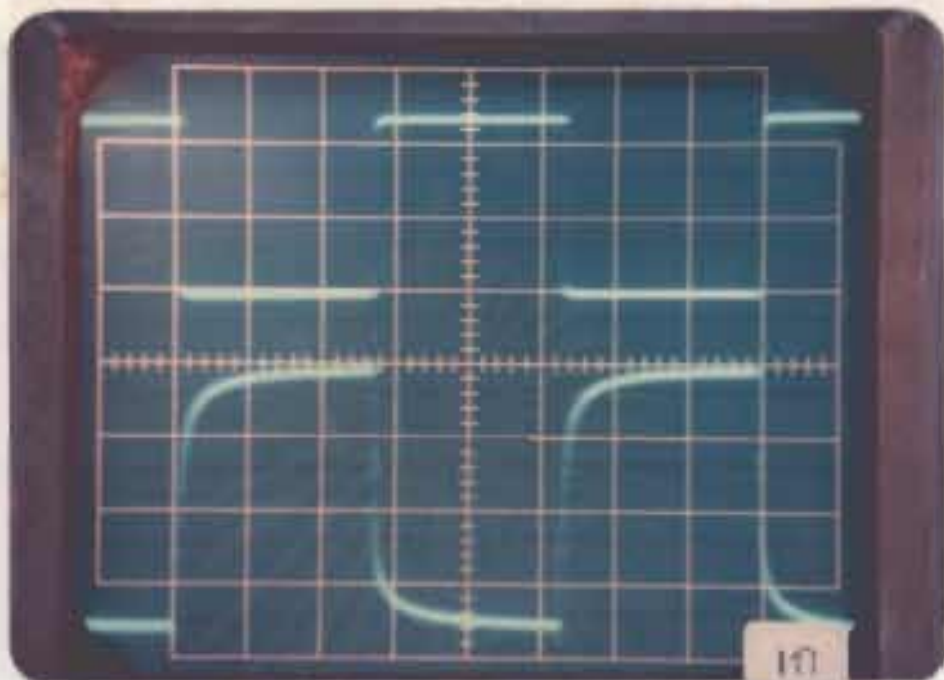
มากกว่าในรุ่นที่ 3

เมื่อพิจารณาจุดผลของรุ่นที่ 3 เปรียบเทียบกับรุ่นที่ 4 จะพบว่ารุ่นที่ 4 มีความรู้สึกต่อแสงดีกว่ารุ่นที่ 3 ทั้งนี้ก็สามารถอธิบายโดยอ้างถึงชั้น antireflection เช่นเดียวกัน กล่าวคือโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 ใช้แวนผลึกเหมือนกัน ใช้กระบวนการผลิตเดียวกันและทำพร้อมกันด้วย เพียงแต่รุ่นที่ 4 ไม่มีชั้น antireflection ชั้น antireflection ของรุ่นที่ 3 จะปล่อยให้แสงความยาวคลื่น $0.94 \mu\text{m}$ ผ่านได้ดี ขณะที่แสงที่ความยาวคลื่นอื่นๆถูกสะท้อนกลับและถูกดูดกลืนในชั้น antireflection เป็นจำนวนไม่น้อย ย่อมทำให้จำนวนโฟตอนประสิทธิผลที่จะกระตุ้นให้เกิดกระแสโฟโตต่ำกว่าการที่ไม่มีชั้น antireflection จะเห็นว่าการออกแบบให้มีชั้น antireflection ไม่ใช่จะดีเสมอไปถ้าความหนาของมันไม่เหมาะสมกับสเปกตรัมของแสงที่ใช้งาน

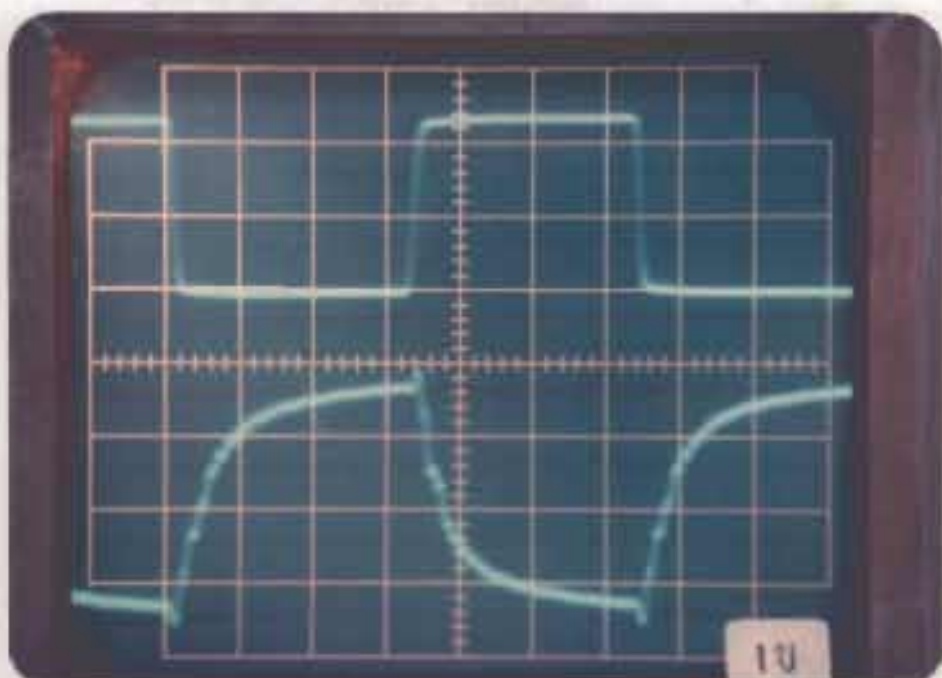
สำหรับการเปรียบเทียบความรู้สึกต่อแสงที่ได้จากการทดลองและทฤษฎีนั้นไม่สามารถทำได้ ทั้งนี้จะดูได้จากสเปกตรัมของแสงจากหลอดทั้งสะพานตัวอย่างในรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าสเปกตรัมของแสงจากหลอดทั้งสะพานกว้างมาก ไม่สามารถอนุโลมให้เป็นแสงความยาวคลื่นเดียวได้ ค่าทางทฤษฎีจากสมการ (2.9) จึงนำมาประยุกต์ใช้ไม่ได้

ที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งก็คือความรู้สึกต่อแสงของหลอดทั้งสะพานน้อยกว่าของแสงจาก LED TIL31 ซึ่งจะดูได้จากสเปกตรัมของแสงในรูปที่ 5.6 เช่นกัน คือจะมีโฟตอนที่ได้จากหลอดทั้งสะพานบางส่วนที่มีความยาวคลื่นมากกว่าความยาวคลื่นวิกฤตซึ่งมีค่า $1.1 \mu\text{m}$ สำหรับซิลิกอนพลังงานของโฟตอนส่วนนี้ไม่สามารถจะกระตุ้นให้เกิดกระแสโฟโตขึ้นได้ ผิดกับโฟตอนของ TIL31 ซึ่งมีพลังงานของโฟตอนทุกตัวมากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะไปกระตุ้นให้เกิดกระแสโฟโตได้มากกว่า ย่อมทำให้ความรู้สึกต่อแสงมากกว่าด้วย

5.3 ผลการวิเคราะห์ความไวของการตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด ในการวิเคราะห์นี้ ใช้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) ที่มีความถี่ต่างๆกันเข้าไปมอดูเลตกับแสงอินฟราเรดความยาวคลื่น $0.85 \mu\text{m}$ ซึ่งได้จาก LED OC-1 แล้วส่งผ่านออกภาคไปยังโฟโตไดโอดที่ถูกไบแอสด้วยแรงดัน 15 โวลต์ เอากระแสที่ได้ไหลผ่านความต้านทาน 50 โอห์ม แล้วจับสัญญาณนี้เข้าออสซิลอscope เพื่อตรวจรูปลักษณ์ที่รับได้เปรียบเทียบกับที่ส่งมา รูปที่ 5.7 กับรูปที่ 5.8 เป็นภาพถ่ายแสดง



รูปที่ 5.7 โฟโตโคโตะกรุปที่ 1 หมายเลข 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณที่ส่ง (ส่วนบนของจอภาพ) กับสัญญาณที่รับได้ (ส่วนล่างของจอภาพ) เมื่อสัญญาณที่ส่งมีความถี่ 50 kHz และแรงดันไบแอสของโฟโตโคโตะเท่ากับ 15V



รูปที่ 5.8 โฟโตโคโตะกรุปที่ 1 หมายเลข 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณที่ส่ง (ส่วนบนของจอภาพ) กับสัญญาณที่รับได้ (ส่วนล่างของจอภาพ) เมื่อสัญญาณที่ส่งมีความถี่ 400 kHz และแรงดันไบแอสของโฟโตโคโตะเท่ากับ 15V

การเปรียบเทียบสัญญาณที่ส่ง (ส่วนบนในจอภาพ) กับสัญญาณที่รับได้ (ส่วนล่างของจอภาพ) เมื่อความถี่ของสัญญาณเท่ากับ 50 kHz และ 400 kHz ตามลำดับสำหรับโฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 จะเห็นว่าโฟโตไดโอดรุ่นนี้ใช้รับสัญญาณได้ดีที่ความถี่ไม่บ่อยสูงนัก (ประมาณ 50 kHz ในรูปที่ 5.7) ถ้าความถี่ของสัญญาณสูงมากเช่น 400 kHz ดังในรูปที่ 5.8 สัญญาณที่รับได้จะเกิดการเพี้ยนขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าโฟโตไดโอดรุ่นนี้มีความไวของการตอบสนองต่ำ จากการคำนวณได้ค่าเฉลี่ยของ rise time และ fall time เท่ากับ 0.8 μ s การที่ความไวของการตอบสนองต่ำอธิบายได้ดังนี้คือแวนผลึกที่ใช้ทำโฟโตไดโอดรุ่นนี้คือแบบหัวต่อพีเอ็นมีความหนาแน่นของพาหะค่อนข้างมาก เมื่อถูกไบแอสย้อนด้วยแรงดัน 15V เขตปลอดพาหะก็ยังคงกว้างไม่เต็มความหนาของแวนผลึกซึ่งจะเห็นได้จากสมการ (2.13) เมื่อเขตปลอดพาหะยังแผ่ไปไม่เต็มแวนผลึก พาหะที่ถูกกระตุ้นขึ้นนอกรบบริเวณเขตปลอดพาหะจะใช้เวลาค่อนข้างนานเพื่อจะแพร่ซึมเข้าหาหัวต่อขึ้นกับระยะทาง. นี่คือนิวเคลียสสำคัญที่ทำให้โฟโตไดโอดรุ่นนี้มีความไวของการตอบสนองช้า

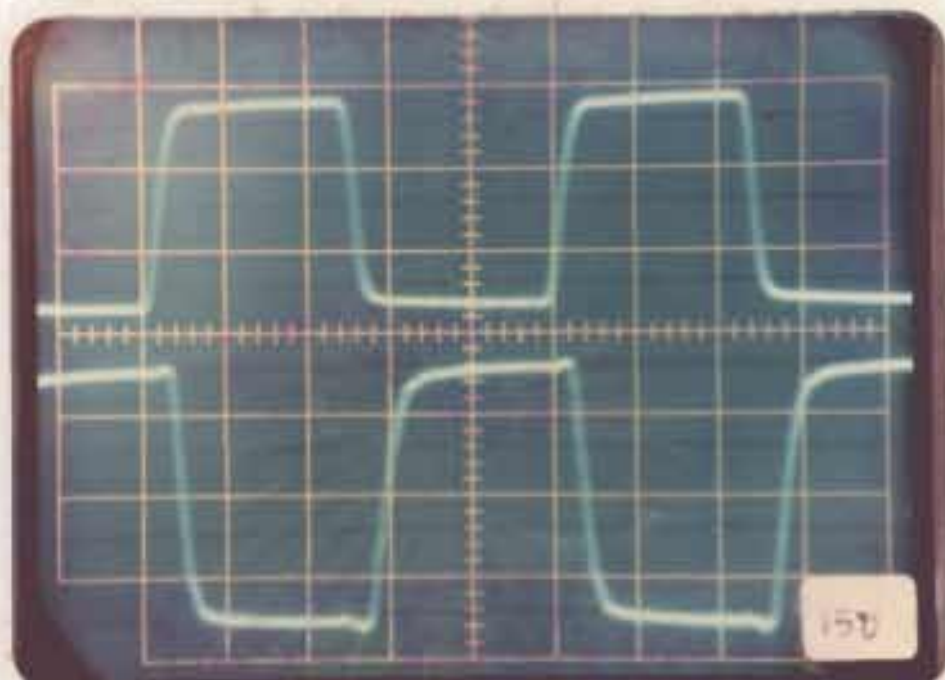
สำหรับการเปรียบเทียบสัญญาณที่ส่งกับที่รับได้ของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 รุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.9 รูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับโดยสัญญาณที่ส่งมีความถี่ 1 MHz และแรงดันไบแอสย้อนที่โฟโตไดโอดเท่ากับ 15V เท่าเดิม จะเห็นว่ารูปร่างของสัญญาณทั้งสองไม่ต่างกันเลยเมื่อวัด rise time และ fall time ของโฟโตไดโอดทั้ง 3 รุ่นหลังนี้จะได้ผลดังนี้

ค่าเฉลี่ยของ rise time เท่ากับ 48 ns 30.56 ns และ 30 ns ตามลำดับ

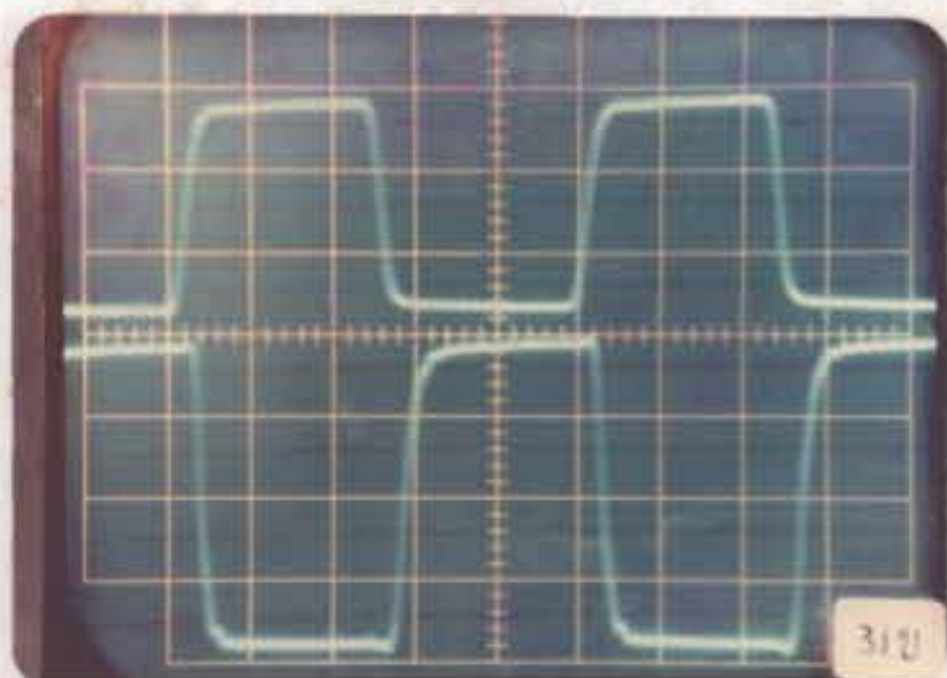
ค่าเฉลี่ยของ fall time เท่ากับ 38 ns 20.22 ns และ 20 ns ตามลำดับ

ผลสรุปของการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้มีแสดงไว้ในตารางที่ 5.4 ซึ่งมีทั้งค่า rise time, fall time, propagation delay time low-to-high-level output (t_{pLH}), propagation delay time high-to-low-level output (t_{pHL}) และคาปาซิแตนซ์ของหัวต่อ

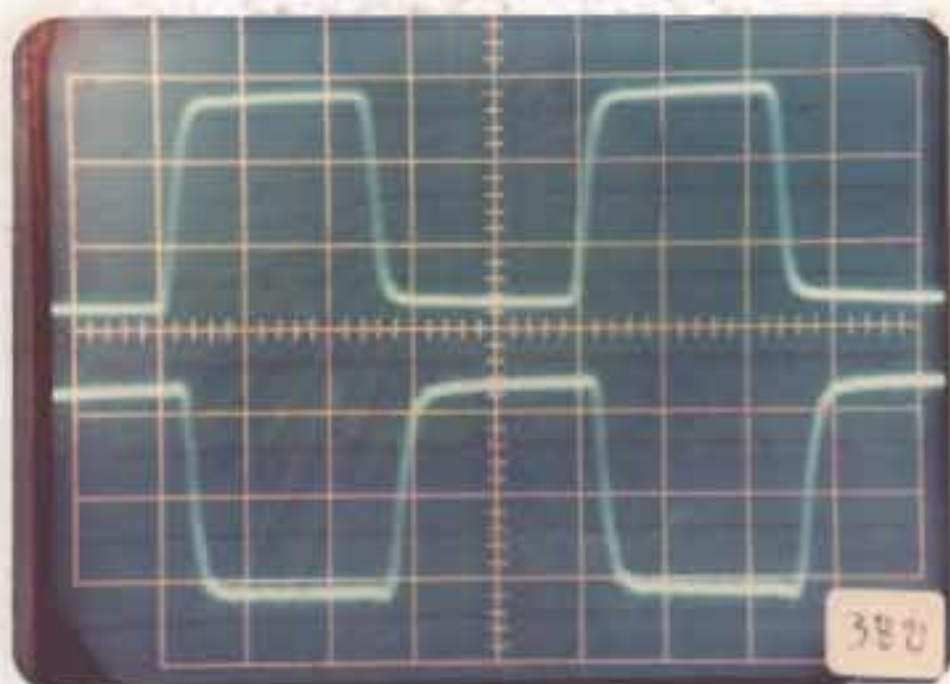
จะเห็นว่า rise time และ fall time ของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 มีค่าน้อยกว่าของรุ่นที่ 2 ทั้งๆที่แวนผลึกของซิลิกอนที่ใช้ทำโฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 มีความหนาแน่นของพาหะน้อยมาก (ความต้านทานจำเพาะสูงมากถึง 7500 โอห์ม-เซนติเมตร) ส่วนแวน-



รูปที่ 5.9 โฟโตโคโลกรุ่นที่ 2 หมายเลข 15 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณที่ส่ง (ส่วนบนของภาพ) กับสัญญาณที่รับได้ (ส่วนล่างของภาพ) เมื่อสัญญาณที่ส่งมีความถี่ 1 MHz และแรงดันโบนแอมพลีตูดของโฟโตโคโลกรุ่นที่ 2 เท่ากับ 15V



รูปที่ 5.10 โฟโตโคโลกรุ่นที่ 3 หมายเลข 31 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณที่ส่ง (ส่วนบนของภาพ) กับสัญญาณที่รับได้ (ส่วนล่างของภาพ) เมื่อสัญญาณที่ส่งมีความถี่ 1 MHz และแรงดันโบนแอมพลีตูดของโฟโตโคโลกรุ่นที่ 3 เท่ากับ 15V



รูปที่ 5.11 โฟโตไดโอดรุ่นที่ 4 หมายเลข 38 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณที่ส่ง (ส่วนบนของจอภาพ) กับสัญญาณที่รับได้ (ส่วนล่างของจอภาพ) เมื่อสัญญาณที่ส่งมีความถี่ 1 MHz และแรงดันไบอัสถ่วงของโฟโตไดโอดเท่ากับ 15 โวลต์

ผลึกของซิลิกอนที่ใช้ทำโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 มีความหนาแน่นของพาหะสูงกว่า (ความต้านทานจำเพาะ 3000 โอห์ม-เซนติเมตร) ซึ่งตามทฤษฎีแล้วผลึกที่มีความหนาแน่นของพาหะน้อยกว่าจะมีความคล่องตัว (mobility) สูงกว่า ควรจะมีความไวของการตอบสนองสูงกว่าด้วย สามารถอธิบายได้ดังมีคือ ในการทำโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 ใช้กระบวนการผลิตที่อุณหภูมิต่ำ (ไม่เกิน 950°C) ขณะที่ไดโอดรุ่นที่ 2 วนผลึกต้องผ่านกระบวนการที่อุณหภูมิสูง (1100°C) ซึ่งความคล่องตัวและเวลาชีวิตจะลดลง ทำให้ความไวของการตอบสนองลดลงไปด้วย จากการวิเคราะห์ขั้นตอนของหัวต่อที่แรงดันไบอัสที่ใช้การวัดคือ 15 โวลต์ เราสามารถจะหาความกว้างของแถบพลังงานได้จากสูตร (2.14) คือ

$$C = \frac{\epsilon_s A}{W} \quad (2.14)$$

ถ้าเราให้พื้นที่ของหัวต่อ A เท่ากับ 16 มม^2 และ 9 มม^2 สำหรับ
 โฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 กับ 2 และรุ่นที่ 3 กับ 4 ตามลำดับ และ ϵ_s ของซิลิกอน
 มีค่า $11.9 \times 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$ เราสามารถหาความกว้างของเขตปลอดพาหะ W ได้ดังนี้

$$W = \frac{\epsilon_s A}{C}$$

ตารางที่ 5.4 สรุปผลการหาความไวของการตอบสนองของโฟโตไดโอดทั้งสี่รุ่น
 เมื่อสัญญาณที่ส่งมีความถี่ 1 MHz และโฟโตไดโอดถูกไบแอสด้วย 15 โวลต์ โหลดที่ใช้เท่า
 กับ 50 โอห์ม

โฟโตไดโอด		rise time (t_r) ns	fall time (t_f) ns	t_{pHL} (ns)	t_{pLH} (ns)	C (pF)
รุ่นที่ 1	ค่าสูงสุด	800	800	180	120	470
	ค่าเฉลี่ย	800	800	163	103	
	ค่าต่ำสุด	800	800	140	90	
รุ่นที่ 2	ค่าสูงสุด	55	40	80	50	9.0
	ค่าเฉลี่ย	48	38	72	45	
	ค่าต่ำสุด	45	35	70	40	
รุ่นที่ 3	ค่าสูงสุด	35	22	60	40	6.0
	ค่าเฉลี่ย	30.56	20.22	57.22	39.44	
	ค่าต่ำสุด	30	20	55	35	
รุ่นที่ 4	ค่าสูงสุด	30	20	55	35	6.3
	ค่าเฉลี่ย	30	20	55	35	
	ค่าต่ำสุด	30	20	55	35	

สำหรับโฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 $W = 3.59 \mu\text{m}$

สำหรับโฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 $W = 187 \mu\text{m}$

สำหรับโฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 $W = 158 \mu\text{m}$

สำหรับโฟโตไดโอดรุ่นที่ 4 $W = 151 \mu\text{m}$

แต่ค่าคาปาซิแตนซ์ของหัวต่อจริงๆ จะน้อยกว่านี้เพราะค่าที่ได้จะรวมทั้งคาปาซิ-
แตนซ์ของสาย bonding และของ header ทำให้ความกว้างของเขตปลอดพาหะที่คำนวณ
ได้ควรจะมากกว่านี้ ยิ่งไปกว่านั้นตอนที่ทำการขีดผิวแวนผลึกตอนจะเริ่มกระบวนการผลิต เนื้อของ
ซิลิกอนจะถูกลอกออกไปประมาณ 20-25 μm (ภาคผนวก ก) นอกจากนี้ในการทำออกไซด์
แต่ละครั้ง เนื้อของซิลิกอนจะถูกใช้ไปทำให้ส่วนที่เหลือบางลงไปอีกแต่น้อยมาก เราสามารถ
คำนวณหาความหนาทั้งหมดของซิลิกอนหลังจากหมดสิ้นการสร้างโฟโตไดโอดแต่ละรุ่นได้ดังนี้
(ละเลยเนื้อซิลิกอนที่สูญเสียไปเป็นออกไซด์)

หลังจากถูกลอกผิวออกตอนขีดผิว 25 μm แล้วความหนาของ เนื้อซิลิกอนจะหาได้ดังนี้

โฟโตไดโอดรุ่นที่ 1 แวนผลึกหนา 300 μm ขีดผิวแล้วเหลือ 275 μm

โฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 แวนผลึกหนา 240 μm ขีดผิวแล้วเหลือ 215 μm

โฟโตไดโอดรุ่นที่ 3 และ 4 แวนผลึกหนา 210 μm ขีดผิวแล้วเหลือ 185 μm

เมื่อพิจารณาถึงผลจากการวัดคาปาซิแตนซ์และความหนาของแวนผลึกหลังจากการ
ขีดผิวแล้ว สามารถสรุปได้ว่าการไบแอสยอนโฟโตไดโอดรุ่นที่ 2 รุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 ด้วย
แรงดัน 15 โวลต์ จะทำให้เขตปลอดพาหะขยายกว้างเต็มชั้น I ของแวนผลึก ซึ่งก็ได้รับ
การยืนยันจากการทดลองโดยการเพิ่มแรงดันไบแอสยอนให้สูงกว่า 15 โวลต์ ค่า rise time
และ fall time จะลดลงเพียงเล็กน้อยแทบจะสังเกตไม่ได้ rise time และ fall time
ที่เพิ่มเล็กน้อยนี้ เนื่องมาจากความเร็วลอยเลื่อนสูงขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าแรงขึ้น (แต่ P คงเดิม)

เราสามารถจะคำนวณเวลาของการตอบสนองโดยคร่าวๆของโฟโตไดโอดรุ่นที่ 2
รุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 ได้ โดยจะยกการคำนวณเวลาของการตอบสนองในรุ่นที่ 4 เป็น
ตัวอย่างดังนี้

ถ้าเราตั้งสมมุติฐานว่าเขตปลอดพาหะขยายเต็มชั้น I (ซึ่งก็ได้อธิบายมาแล้ว
ว่าเป็นจริง) และเวลาของการตอบสนองขึ้นอยู่กับเวลาที่พาหะวิ่งผ่านชั้นปลอดพาหะ (transit

time) เท่านั้น แรงดันไบแอสย้อนที่ใช้ 15 โวลต์สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมเขตปลอดพาหะ (ใช้เขตปลอดพาหะหนา 185 μm) จะได้

$$\text{สนามไฟฟ้า } \mathcal{E} = \frac{15}{185 \times 10^{-4}} = 810 \text{ V/cm}$$

จากเอกสารอ้างอิงข้อ 10 หน้า 46 เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่า 810 V/cm จะได้ความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) เท่ากับ 10^6 cm/s เพราะฉะนั้นระยะเวลาที่พาหะวิ่งผ่านเขตปลอดพาหะจะเท่ากับ

$$t = \frac{185 \times 10^{-4}}{10^6} = 19 \text{ ns}$$

ซึ่งค่านี้เปรียบเทียบกับค่า rise time (30 ns) และ fall time (20 ns)

5.4 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองสัมพัทธ์ (Relative Spectral Response)

จากการวัดผลตอบสนองสัมพัทธ์ต่อแสงตั้งแต่ความยาวคลื่น 6600 \AA ถึง 9800 \AA ของโฟโตไดโอดทั้งสี่รุ่น พบว่าได้กราฟที่มีลักษณะคล้ายกันมากถึงแม้จะมีโครงสร้างแตกต่างกัน ผลสรุปเกี่ยวกับการทดลองนี้ก็คือ

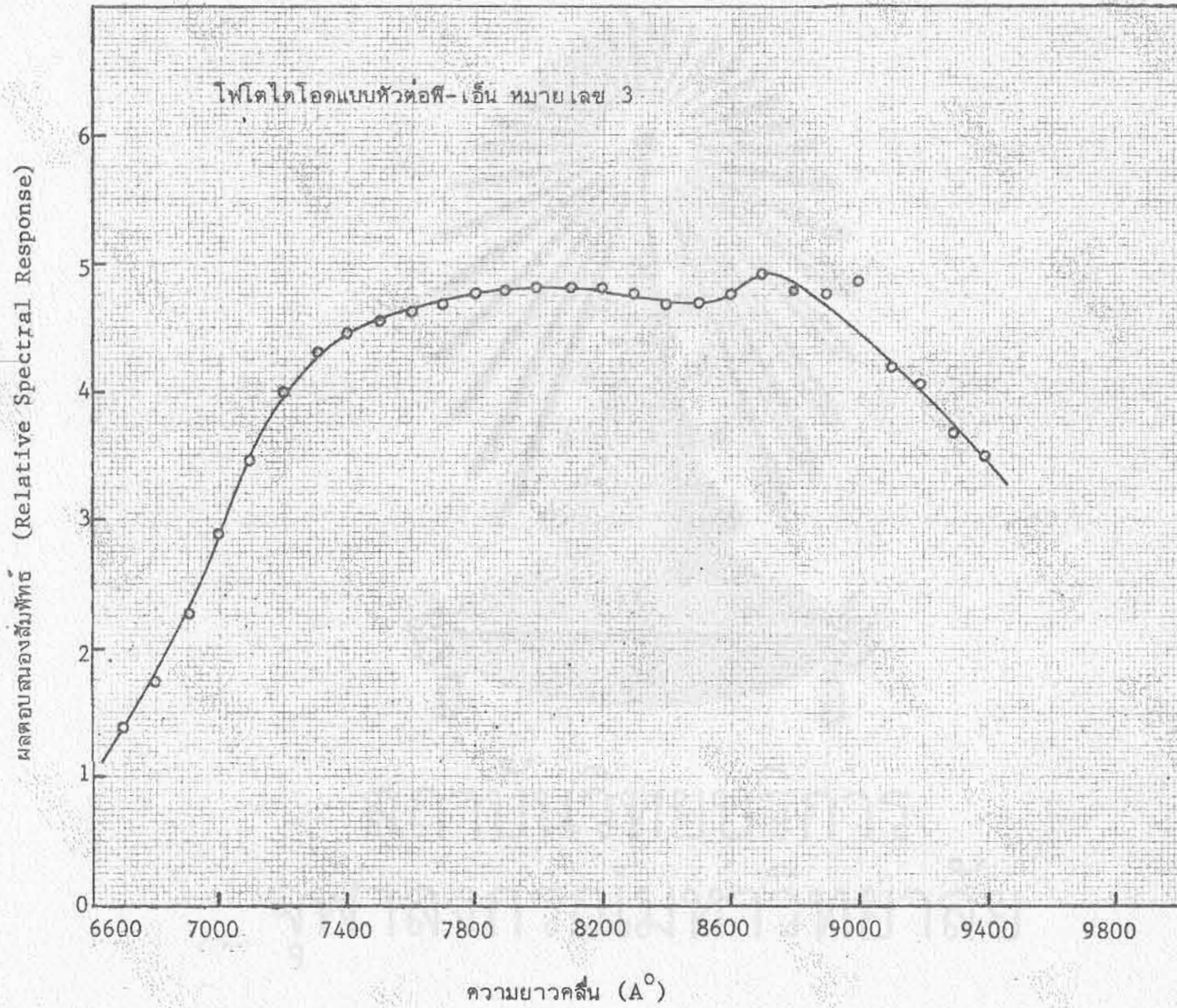
- ผลตอบสนองสัมพัทธ์จะมีค่าน้อยมากสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 6600 \AA
- ผลตอบสนองสัมพัทธ์มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงความยาวคลื่น 7400 \AA ไปจนถึง 9000 \AA
- ผลตอบสนองสัมพัทธ์จะลดลงเมื่อความยาวคลื่นสูงกว่า 9000 \AA
- ผลตอบสนองสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น 8700 \AA หรือ 0.87 μm

ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับกันทั่วไป (เอกสารอ้างอิงอันดับที่ 16 หน้า 66 เอกสารอ้างอิงอันดับที่ 7 บทที่ 4 หน้า 2 เอกสารอ้างอิงอันดับที่ 18 บทที่ 5 หน้า 36)

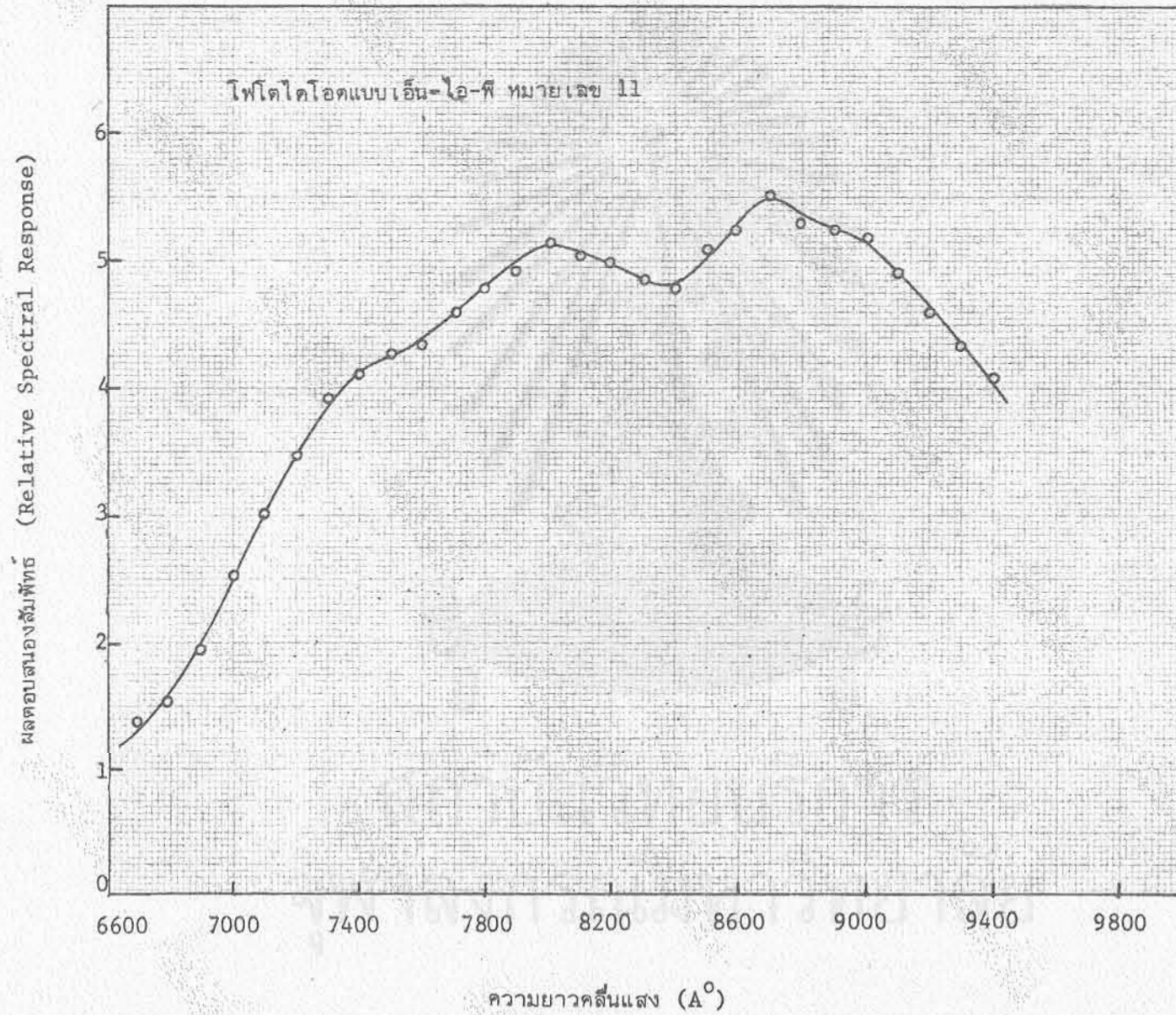
กราฟของผลตอบสนองสัมพัทธ์ของโฟโตไดโอดทั้งสี่รุ่นแสดงในรูปที่ 5.12 รูปที่

5.13 รูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15

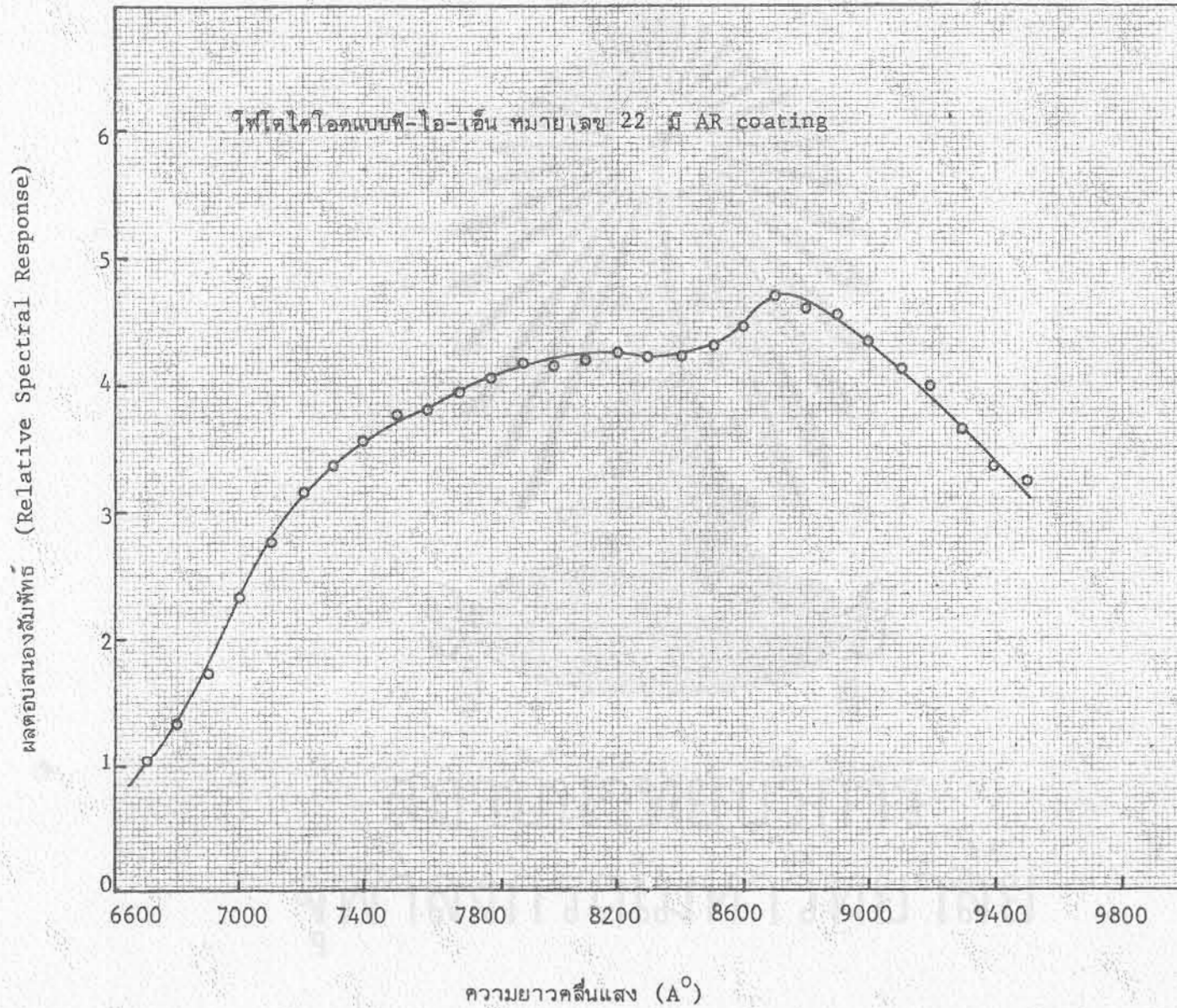
รูปที่ 5.12



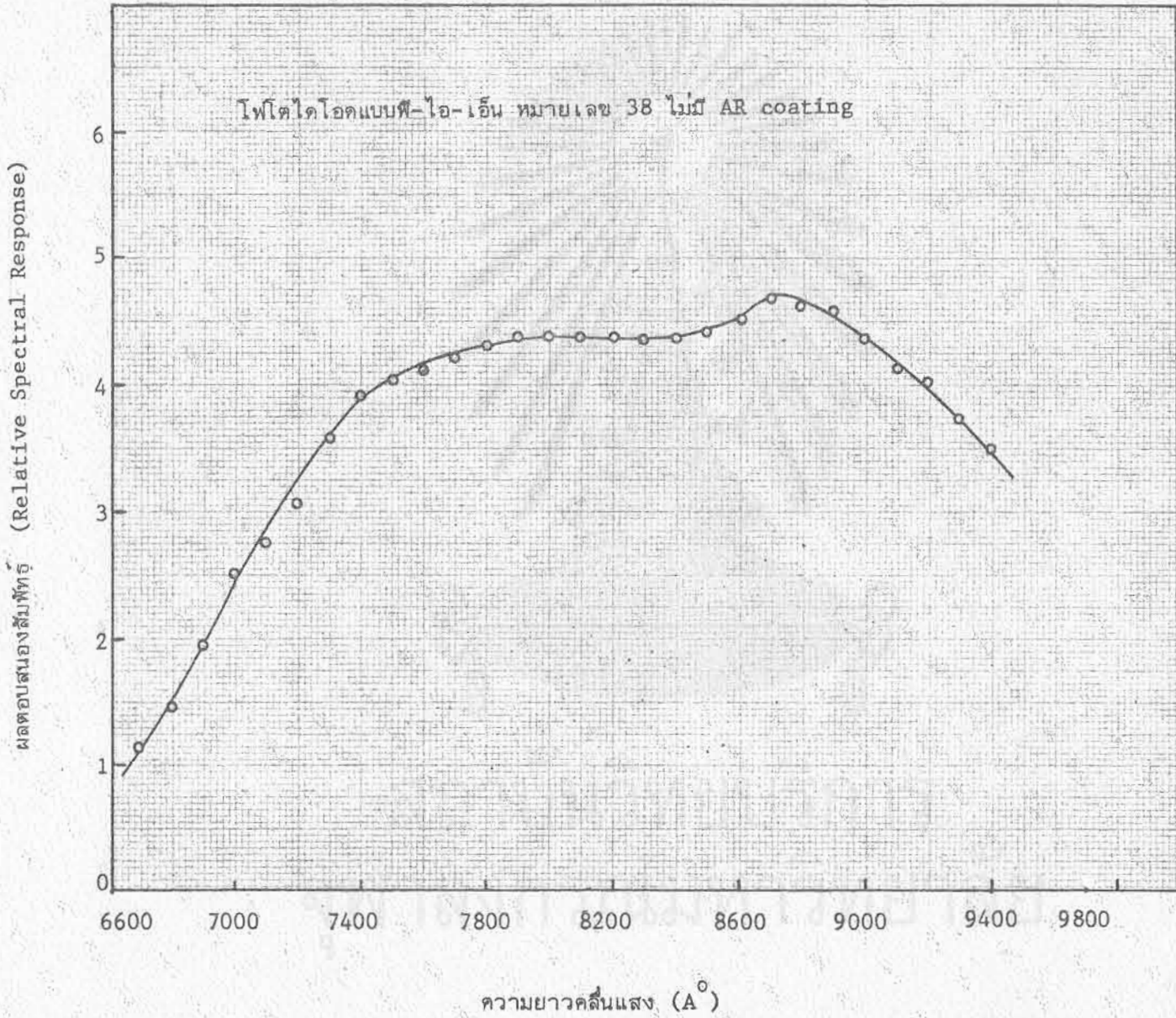
รูปที่ 5,13



รูปที่ 5.14



รูปที่ 5.15



6. การเปรียบเทียบโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นกับที่มีขายในท้องตลาด

เราได้เลือกโฟโตไดโอดสองเบอร์ที่มีขายในท้องตลาดเพื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดที่เราสร้างขึ้นรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 โฟโตไดโอดที่ถูกเลือกขึ้นเพื่อเปรียบเทียบคือ TIL 81 และ TIL 100 ซึ่งมีความไวของการตอบสนองมากที่สุดที่จะทำได้ของ Texas Instrument Corporated สิ่งที่เราจะทำการเปรียบเทียบมีสองประการคือ

- การเปรียบเทียบความรู้สีกต่อแสง
- การเปรียบเทียบความไวของการตอบสนอง

6.1 การเปรียบเทียบความรู้สีกต่อแสง แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ก็คือ TIL 31 และแสงจากหลอดทั้งสะเตนและเงื่อนโซที่ใช้ในการวัดเหมือนกันทุกประการ ผลจากการวัดแสดงในตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบความรู้สีกต่อแสงของโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นกับที่มีขายในท้องตลาด

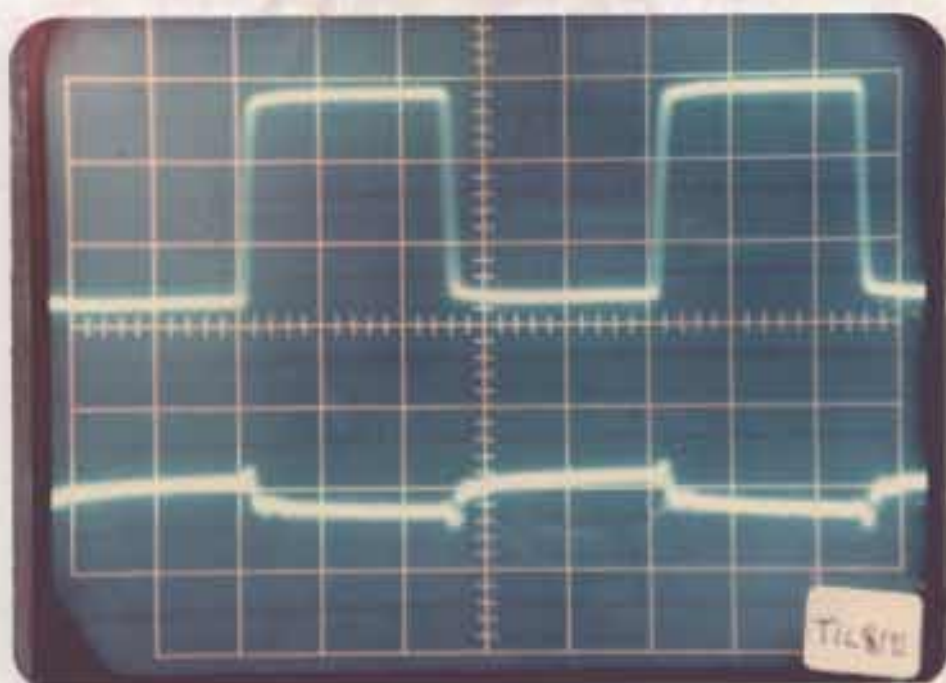
	โฟโตไดโอด รุ่นที่ 3	โฟโตไดโอด รุ่นที่ 4	โฟโตไดโอด TIL 81	โฟโตไดโอด TIL 100
ความรู้สีกต่อแสง อินฟราเรด 0.84 μm	0.55 A/W	0.52 A/W	0.15 A/W	0.44 A/W
ความรู้สีกต่อแสง จากหลอดทั้งสะเตน	0.18 A/W	0.28 A/W	0.06 A/W	0.26 A/W

*หมายเหตุ ค่าในตารางของโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นเป็นค่าสูงสุดของแต่ละรุ่น

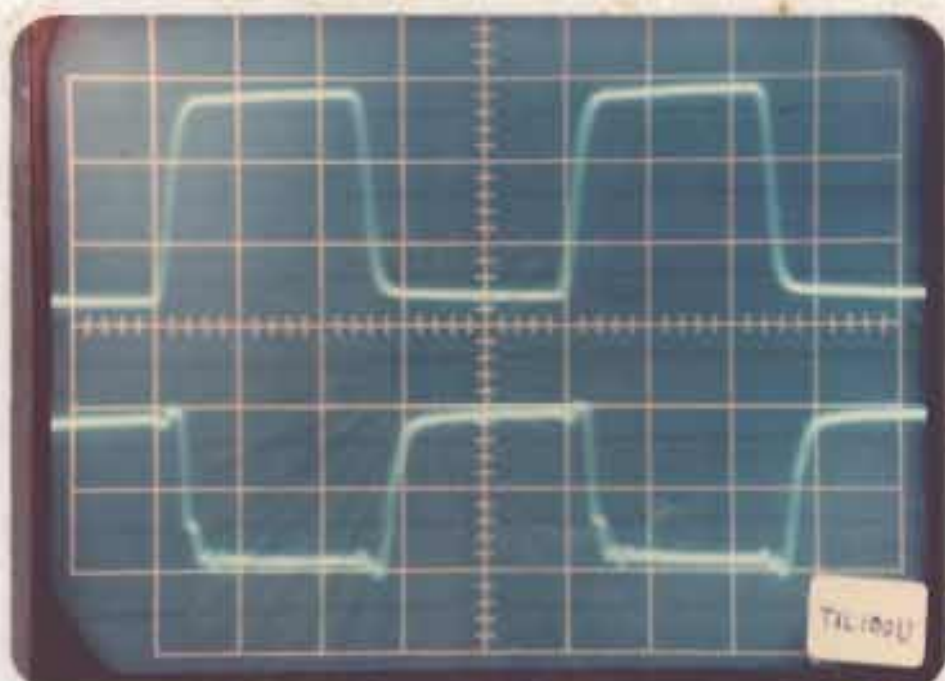
จากตารางเราจะพบว่าความรู้สีกต่อแสงของโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นสูงกว่าที่มีขายทั้งสองเบอร์ โดยเฉพาะเบอร์ TIL 81 จะมีความรู้สีกต่อแสงน้อยมากซึ่งสามารถยืนยันได้จากรูปที่ 6.1 ส่วนเบอร์ TIL 100 มีค่าต่ำกว่าที่สร้างขึ้นเล็กน้อย



6.2 การเปรียบเทียบความไวของการตอบสนอง เจ็อนโซในการวัดความไวของตัวตอบสนองของโฟโตไดโอดที่จะนำมาเปรียบเทียบกันเหมือนกับทุกประการ. โดยใช้แสงจาก LED OC-1 ซึ่งมีความยาวคลื่นประสิทธิผล $0,85 \mu\text{m}$ ภาพถ่ายแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณที่ส่ง (ส่วนบนของจอภาพ) กับสัญญาณที่รับได้ (ส่วนล่างของจอภาพ) มีในรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 สำหรับโฟโตไดโอด TIL 81 และ TIL 100 ตามลำดับ จากรูปที่ 6.1 จะพบว่าความไวของการตอบสนองค่อนข้างช้าและความรู้สึกต่อแสงน้อยมาก ทำให้การหา rise time และ fall time จากรูปเป็นไปได้อย่าง ค่าที่จะใช้เปรียบเทียบจึงเอามาจาก data sheet ของยูนิตซึ่งเจ็อนโซในการวัดไม่ตรงกับที่วิจัยนัก จากรูปที่ 6.2 จะพบว่า ถึงแม้ความถี่ของสัญญาณจะสูงถึง 1MHz แต่ TIL 100 ก็ยังตอบสนองต่อสัญญาณได้ทันทีที่สัญญาณที่รับได้แทบจะไม่มีอาการเปลี่ยนแปลงขึ้น จากรูปเราสามารถหา rise time และ fall time และนำไปเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.1 โฟโตไดโอด TIL 81 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณที่ส่ง (ส่วนบนของจอภาพ) กับสัญญาณที่รับได้ (ส่วนล่างของจอภาพ) เมื่อสัญญาณที่ส่งมีความถี่ 400 kHz และแรงดันไบแอสอยู่ที่ 15 V



รูปที่ 6.2 ไฟโตไดโอด TIL 100 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณที่ส่ง (ส่วนบนของจอภาพ) กับสัญญาณที่รับได้ (ส่วนล่างของจอภาพ) เมื่อสัญญาณที่ส่งมีความถี่ 1MHz และแรงดันไบโอมอดูเลชันเท่ากับ 15V

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบความไวต่อการรบกวนของไฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นกับที่ขยายในท้องตลาด ค่า rise time และ fall time ของไฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นเป็นค่าค่าสุก

	ไฟโตไดโอด รุ่นที่ 3	ไฟโตไดโอด รุ่นที่ 4	ไฟโตไดโอด TIL 81	ไฟโตไดโอด TIL 100
rise time (ns)	30	30	350*	40
fall time (ns)	20	20	500*	30

*หมายเหตุ เจือจางในการวัดคือแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดสังกะสีที่อุณหภูมิ 2870°K

แรงดันไบโอมอดูเลชัน 0-50 โวลต์ กระแสไฟโต 60 μ A และความต้านทานของโหลด 100 โอห์ม

จะเห็นว่าไม่ว่าจะพิจารณาในแง่ความรู้สึกลึกต่อแสงหรือความไวของการตอบสนอง โฟโตไดโอดที่เราทำขึ้นมีสมรรถนะสูงกว่าเบอร์ที่ดีที่สุดที่มีขายในท้องตลาด. เมื่อพิจารณาถึงราคาในปัจจุบัน TIL 81 ราคา 28 บาทต่อ 1 ตัว และ TIL 100 ราคา 34 บาทต่อ 1 ตัว ซึ่งราคาค่อนข้างแพง และเราสามารถทำในห้องปฏิบัติการได้ถูกกว่านี้ เพียงแต่การ package ยังไม่ดีพอเท่ากับที่ทำขายเป็นอุตสาหกรรม

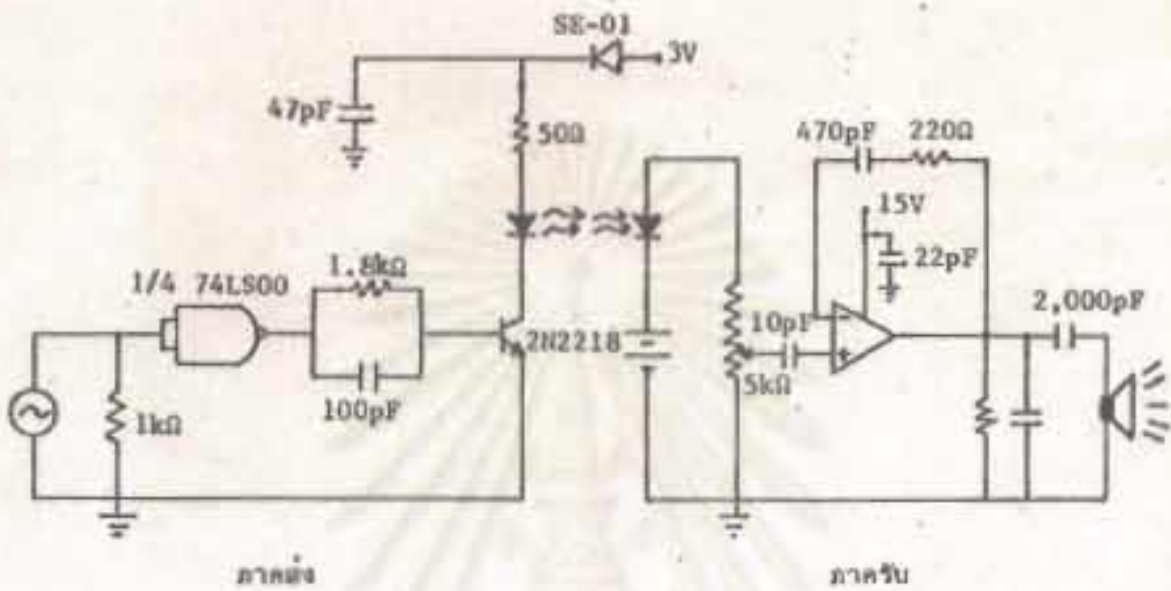


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7 การนำโฟโตไดโอดไปประยุกต์ใช้งาน

ในการประยุกต์ใช้งานนี้โฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นได้ถูกนำไปใช้ในการรับสัญญาณวิทยุ ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้ ระบบประกอบด้วยภาคส่งและภาครับสัญญาณ ภาคส่งเป็นกล่องวงจรซึ่งภายในมีไดโอดเปล่งแสง OC-1 ซึ่งได้ขอยืมมาจากห้องปฏิบัติการสื่อสาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สัญญาณที่จะส่งผ่านอากาศจะนำโมดูลเลท (modulate) โดยตรงกับแสงอินฟราเรดจาก OC-1 สัญญาณนี้จะเป็นสัญญาณที่รี สัญญาณวิทยุ AM หรือ สัญญาณวิทยุ FM หรือสัญญาณสื่อสารใดๆก็ได้ที่มีความถี่ของสัญญาณไม่สูงเกินกว่าที่ LED OC-1 จะตอบสนอง (response) ได้ทัน ซึ่ง LED OC-1 จะตอบสนองสัญญาณได้ดีถึงความถี่ประมาณ 2MHz สัญญาณที่ถูกเลือกขึ้นใช้งานคือสัญญาณเสียงที่ได้จากลำโพงของเครื่องรับวิทยุ (ความถี่ 20-20,000 Hz) ซึ่งผ่านการ demodulate แล้ว แสงอินฟราเรดที่ถูกมอดูเลทด้วยสัญญาณเสียงจะมีความเข้มของแสงแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะของสัญญาณเสียงและส่งผ่านอากาศไปยังภาครับสัญญาณ

ทางภาครับสัญญาณประกอบด้วยโฟโตไดโอดรุ่นใดรุ่นหนึ่งเพราะทุกรุ่นสามารถจะตอบสนองกับความถี่ของสัญญาณเสียง (ไม่เกิน 20,000 Hz) ได้ดังผลการวิจัยในบทที่ 5 โฟโตไดโอดจะถูกไบแอสด้วยแรงดันประมาณ 10 โวลต์ เมื่อเอาโฟโตไดโอดไปรับสัญญาณแสงโฟโตไดโอดจะถูกกระตุ้นให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีขนาดแปรเปลี่ยนไปตามรูปร่างของสัญญาณแสงปล่อยกระแสที่ได้ไหลผ่านความต้านทานที่แปรค่าได้ เอาแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานนี้ไปป้อนที่ขั้วเข้าของวงจรขยายเพื่อให้สัญญาณที่รับได้แรงขึ้น เอาสัญญาณที่ขั้วออกของวงจรขยายไปต่อเข้ากับลำโพง ก็จะได้ยินเสียงจากลำโพง เหมือนกับเสียงที่ได้ยินจากวิทยุทุกประการ รูปที่ 7.1 เป็นรายละเอียดวงจรภาครับและภาคส่งสัญญาณเสียงที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อให้ข้อมูลมีความเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้นำสัญญาณเสียงสองสัญญาณมาป้อนเข้าออสซิลอโคปแบบ dual-beam (ดูภาพถ่ายรูปที่ 7.2) สัญญาณแรกเป็นสัญญาณเสียงที่ได้จากลำโพงของวิทยุซึ่งอยู่ส่วนบนในจอภาพของสโคป สัญญาณที่สองเป็นสัญญาณที่จับได้โดยโฟโตไดโอดและผ่านการขยายแล้วซึ่งอยู่ส่วนล่างในจอภาพของสโคป จะเห็นว่าทั้งสองสัญญาณมีรูปร่างเหมือนกันทุกประการไม่มีการเพี้ยนเกิดขึ้น เป็นการยืนยันได้อย่างดีว่าเสียงที่รับเหมือนกับเสียงจากวิทยุทุกประการ



รูปที่ 7.1 รายละเอียดวงจรภาคส่งและวงจรถอดรับของการส่งสัญญาณผ่านทางอากาศ



รูปที่ 7.2 ภาพถ่ายแสดงการรับสัญญาณเสียงเป็นคลื่นเลขนาบกับแสงอินฟราเรด สัญญาณบนหน้าจอภาพเป็นสัญญาณจากลำโพงของวิทยุ สัญญาณคลื่นในจอภาพเป็นสัญญาณที่จับได้โดยโฟโตไดโอดหลังจากผ่านวงจรถอดรับแล้ว

8. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย ผลการทดลองวัดโฟโตไดโอดรุ่นต่างๆได้แสดงถึงผลสำเร็จของโครงการวิจัยตามเป้าหมายที่วางไว้ สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- โฟโตไดโอดที่สร้างจากแวนผลึกที่มีความต้านทานจำเพาะสูงจะให้ความรู้สึกต่อแสงและความไวของการตอบสนองสูงกว่าโฟโตไดโอดที่สร้างจากแวนผลึกที่มีความต้านทานจำเพาะต่ำกว่า

- โฟโตไดโอดจะมีความรู้สึกต่อแสงที่ความถี่ใดๆสูงก็ต่อเมื่อชั้น antireflection ถูกสร้างให้มีความหนาที่เหมาะสม

- ความรู้สึกต่อแสงในหน่วย A/W จะมีค่ามากสำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่มีสเปกตรัมแคบ และจะมีค่าน้อยสำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่มีสเปกตรัมกว้าง เช่น แสงจากหลอดทัง-สเตอร์นหรือแสงจากดวงอาทิตย์

- ความไวของการตอบสนองจะสูงกว่าถ้าสร้างโฟโตไดโอดด้วยกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า เพราะอุณหภูมิสูงจะทำให้ความคล่องตัวและเวลาชีวิตของพาหะลดลง

- ความไวของการตอบสนองจะสูงขึ้นถ้าไบแอสย้อนโฟโตไดโอดมากขึ้นคือทำให้เขตปลอดพาหะกว้างขึ้น

- แรงดันวงจรเปิดของโฟโตไดโอดจะแปรตามความหนาแน่นของพาหะของแวนผลึก

- ผลตอบสนองเชิงความถี่ดีคือสามารถรับสัญญาณที่ส่งผ่านอากาศด้วยความถี่อย่างน้อย 10 MHz โดยที่ความเพี้ยนของสัญญาณไม่มากนัก

- เปรียบเทียบโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นกับที่มีขายในท้องตลาดเบอร์ที่ไวที่สุด ปรากฏผลว่าโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นมีสมรรถนะเหนือกว่าในแง่ของความรู้สึกต่อแสงและความไวของการตอบสนอง

- โฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงโดยใช้รับสัญญาณวิทยุ

- โฟโตไดโอดแบบพี-ไอ-เอ็นที่สร้างขึ้นมีความรู้สึกต่อแสงสูงสุด 0.55 A/W และมี rise time กับ fall time 30 ns กับ 20 ns ตามลำดับ

- ผลตอบสนองสัมพัทธ์ต่อสเปกตรัมแสง (Relative spectral response) มีค่าค่อนข้างคงที่ ระหว่างความยาวคลื่น 7400 Å ถึง 9000 Å และมี peak ที่ 8700 Å

ข้อเสนอแนะ มีดังต่อไปนี้

- ทำให้กระแสรั่วของโฟโตไดโอดลดลงโดยการปรับปรุงคุณภาพของน้ำปราศจากอ็อกซิเจนซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของอ็อกไซด์ และจะเป็นประโยชน์ต่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์ประเภทอื่นๆด้วย
- จัดหาออสซิลโลสโคปที่มีความไวสูงเพื่อที่จะหาความไวของการตอบสนองได้แม่นยำขึ้น
- กำลังจัดซื้อแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดที่ทำงานที่ความถี่สูงมากๆ และมีกำลังสูงมากๆเช่นกัน เพื่อที่จะหาผลตอบสนองเชิงความถี่ได้โดยตรงและแม่นยำ (แหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดนี้เป็น LED ซึ่งจะซื้อมาเพื่อโครงการทำ LED ในอนาคต)
- วัดผลตอบสนองสัมพัทธ์ (Relative spectral response) ของโฟโตไดโอดรุ่นต่างๆใหม่เพราะตามทฤษฎีแล้ว จุดยอด (peak) ของผลตอบสนองจะขึ้นกับความหนาของชั้น antireflection

ภาคผนวก ก

การล้างและขัดผิวแว่นผลึกของซิลิกอน

ขั้นตอน เริ่มแรกของการทำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำคือการเตรียมแว่นผลึก แว่นผลึกที่ห้องปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำใช้คือแว่นผลึกของซิลิกอน รายละเอียดของการเตรียมแว่นผลึกซิลิกอนมีดังนี้

ก. การล้าง (Cleaning) เบื้องต้น เพื่อกำจัดฝุ่นและไขมันที่อาจมีอยู่บนแว่นผลึก ถึงแม้ว่าแว่นผลึกที่ส่งมาโดยผู้ผลิตจะทำความสะอาดอย่างดีแล้วก็ตาม สารเคมีที่ใช้ล้างมีดังนี้

Trichloroethylene 5 min.

Acetone 5 min.

ล้างด้วยน้ำ DI ปริมาณมากๆ เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ผ่านแผ่นกรอง

ข. การขัดผิวด้วยสารเคมี (Chemical Polishing) ขั้นตอนนี้เป็นการลอกผิวหน้าของแว่นผลึกออก เนื่องจากระหว่างการขนส่งมาจากผู้ผลิต อาจจะมีครอยขีดข่วนหรือความบกพร่องใดๆที่ผิว สารเคมีที่ใช้ประกอบด้วย

HNO_3 (fuming) 210 ml

HF (48%) 30 ml

CH_3COOH 140 ml

DI water 40 ml

นำสารเคมีเหล่านี้มาผสมกันในภาชนะที่ไว้อย่างน้อย 1 ซม. เพื่อให้มีเสถียรภาพก่อนจะนำแว่นผลึกมาขัดผิวต้องนำแว่นผลึกซิลิกอนที่สะอาดแผ่นอื่น (คนละแผ่นกับที่จะใช้งาน) มาจุ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที ถ้านำแว่นผลึกซิลิกอนที่ต้องการใช้งานจริงๆมาจุ่มลงในสารเคมีโดยตรงจะทำให้ผิวของแว่นผลึกมีรอยต่าง เวลาที่ใช้ในการขัดผิวประมาณ 5 นาที (ผิวหน้าของซิลิกอนจะถูกลอกออกไปประมาณ 20 ถึง 25 μm) อัตราการลอกผิวซิลิกอนจะลดลงเมื่อสารเคมีถูกใช้ไปนานๆ เมื่อขัดผิวแล้วนำมาล้างด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน เป่าให้

แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ผ่านแผ่นกรอง

ค. การล้างขั้นตอนสุดท้าย (Final Cleaning) เมื่อทำขั้นตอนนี้แล้วต้องเอาแว่นผลึกเข้าเตาออกซิเดชันหรือเตาแพร่ซึมหรือกระบวนการใดๆทันที รายละเอียดของขั้นตอนนี้มีตามลำดับดังนี้

Trichloroethylene	เดือด	5 นาที
Acetone	เดือด	10 นาที
DI water	เดือด	5 นาที
HNO ₃ 70%	เดือด	10 นาที
DI water	เดือด	5 นาที
เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ผ่านแผ่นกรอง		
HF 48%	ที่อุณหภูมิห้อง	2-3 นาที
DI water	เดือด	10 นาที

ล้างด้วย DI จำนวนมากๆ เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ผ่านแผ่นกรองแล้วต้องนำไปใช้งานทันที ถ้าเกิดเหตุสุทธริสัยไม่สามารถนำไปทำกระบวนการใดๆได้ ต้องเริ่มข้อ ค ใหม่เมื่อจะใช้งาน

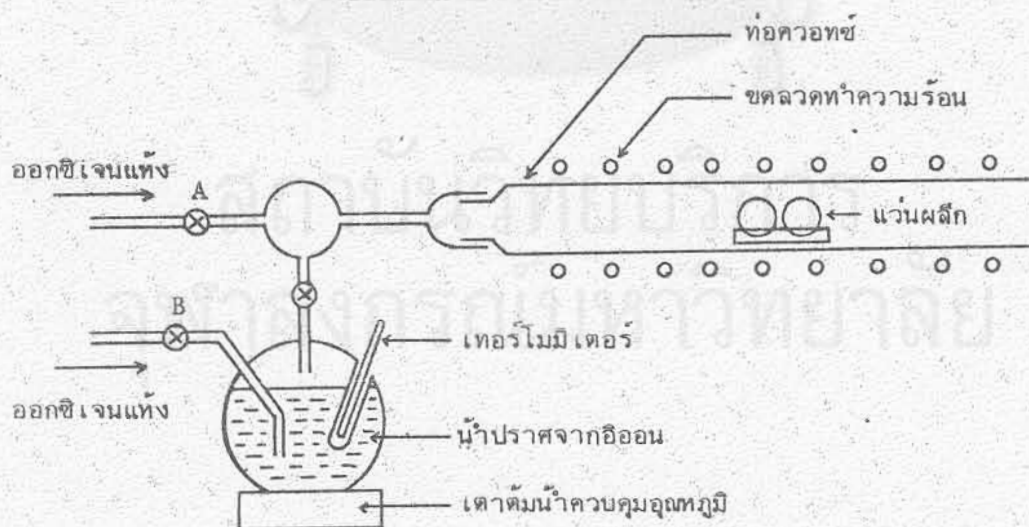
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การสร้างขึ้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยความร้อน (Thermal Oxidation)¹²

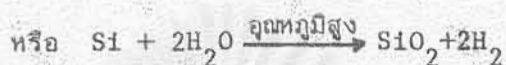
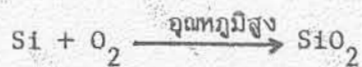
ซิลิกอนไดออกไซด์ใช้ทำเป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ซึมในระหว่างกระบวนการผลิต สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ใช้ปกคลุมผิวหน้าของซิลิกอนไม่ให้ผิวของซิลิกอนติดกับไอน้ำหรือสิ่งสกปรกอื่นใดอันจะทำให้ลักษณะสมบัติของสิ่งประดิษฐ์เปลี่ยนแปลงซึ่งเรียกว่า passivation ใช้เป็นชั้น antireflection เพื่อเพิ่มการดูดกลืนแสงในตัวตรวจจับแสงประเภทต่างๆ และในเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นชั้นฉนวนไฟฟ้าในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอีกด้วย

ซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีคุณภาพดีต้องทนต่อแรงดันพังทลายอย่างน้อย $600 \text{ V}/\mu\text{m}$ และต้องไม่มีอิมพริวิตีหรือสิ่งสกปรกอื่นใดภายใน การสร้างขึ้นออกไซด์กระทำในเตาซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ในขณะที่ใช้งานอุณหภูมิของเตาต้องคงที่หรือถ้าเปลี่ยนแปลงต้องไม่เกิน $\pm 2^{\circ}\text{C}$ แวนผลึกซิลิกอนซึ่งต้องการทำชั้นออกไซด์จะถูกวางอยู่บน boat ที่ทำด้วยควอทซ์และวางอยู่ภายในท่อควอทซ์ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ระบบท่อป้อนก๊าซเข้าเตาได้ถูกออกแบบไว้ให้สามารถใช้บรรยากาศออกซิเจนแห้งหรือใช้บรรยากาศออกซิเจนเป็นกรดทั้งสองกรณี ในกรณีที่ใช้ออกซิเจนเปียก ปริมาณไอน้ำในออกซิเจนจะถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปภาคผนวก ข ระบบอุปกรณ์ในกระบวนการสร้างขึ้นซิลิกอนไดออกไซด์
ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ของน้ำ ระบบอุปกรณ์ในการสร้างชิ้นออกไซด์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยนี้แสดงไว้ในรูปภาคผนวก ข
อะตอมของซิลิกอนบน แวนผลึกจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือน้ำตามสมการ



อัตราการเกิดออกไซด์บนซิลิกอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตา เวลาที่วางแวนผลึก
ซิลิกอนไว้ในเตา ขึ้นกับปริมาณการไหลของก๊าซออกซิเจน และขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำปราศ
จากอ็อกซิเจนถ้าเป็นการทำออกซิเตชันเปียก

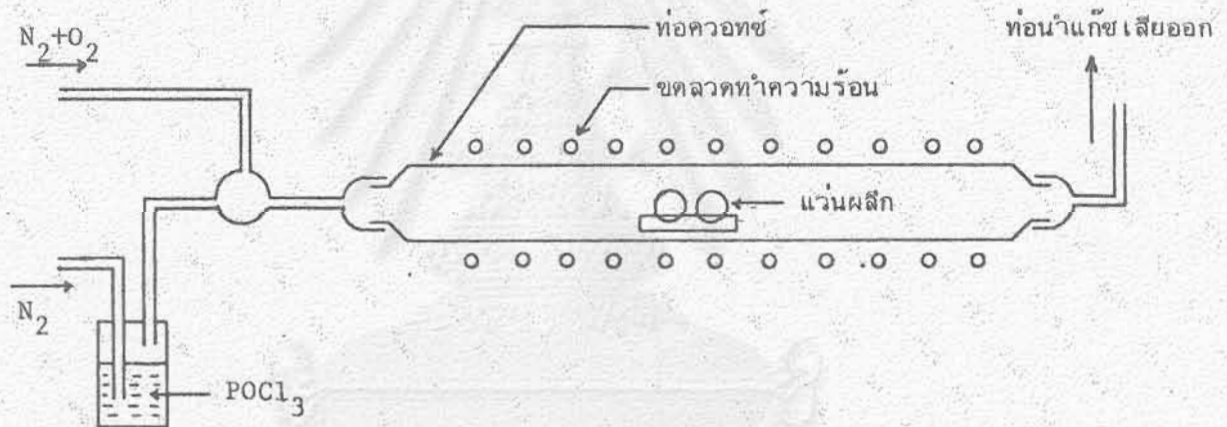
ความหนาแน่นที่สุดของออกไซด์ที่ต้องใช้ในการทำหน้าที่ปกป้องกันการแพร่ซึมขึ้น
กับชนิดของสารเจือปนที่ใช้ (เช่น P หรือ B) ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแพร่
ซึม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การแพร่ซึมฟอสฟอรัส (Phosphorus Diffusion)¹²

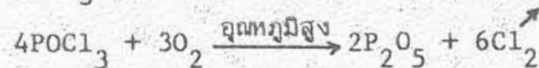
การแพร่ซึมฟอสฟอรัสเป็นขั้นตอนการนำเอาอะตอมของฟอสฟอรัสเข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิกอนบางส่วนในแว่นผลึกของซิลิกอนแบบแทนที่ (substitution) แหล่งกำเนิดไอสารเจือปนมีทั้งที่อยู่ในสภาพของแข็งเช่น ผงของ P_2O_5 ในสภาพของเหลวเช่น $POCl_3$ ในสภาพของก๊าซเช่น PH_3 และในสภาพของ Planar diffusion source เช่น SiP_2O_7 แต่ต้องปฏิบัติการวิจัยแห่งนี้เลือกใช้แหล่งกำเนิดไอสารเจือปนในสภาพของเหลวคือใช้ $POCl_3$ ซึ่งมีแผนผังการจัดอุปกรณ์เครื่องมือดังแสดงในรูปภาคผนวก ค



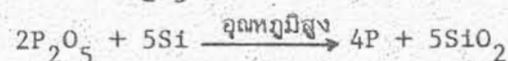
รูปภาคผนวก ค แผนผังการจัดอุปกรณ์เพื่อใช้ในการแพร่ซึมฟอสฟอรัส

เตาที่ใช้เป็นแบบท่อเปิด (open-tube diffusion furnace) ซึ่งมีชุดควบคุมอุณหภูมิสามช่วง ใช้ก๊าซไนโตรเจนผ่าน $POCl_3$ เพื่อเป็นก๊าซพาที่จะนำเอาโมเลกุลของสารเจือปนเข้าไปในเตาแพร่ซึม ในขณะที่ทำการแพร่ซึมนั้น บรรยากาศครอบงำแว่นผลึกซิลิกอนที่ใช้จะมีไอของสารประกอบฟอสฟอรัสเต็มไปหมด ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเตามี 2 ขั้นตอนดังนี้

ก. $POCl_3$ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงภายในเตา



ข. ไอของ P_2O_5 จะทำปฏิกิริยาที่ผิวของซิลิกอน



ปฏิกิริยาเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า เราต้องการใช้ออกซิเจนในกระบวนการแพร่ซึมฟอสฟอรัส และต้องใช้ก๊าซน้ำ (vector gas) ปริมาณมากในการนำเอาก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นออกไป การเกิดก๊าซคลอรีนนี้ทำให้ต้องระวังไม่ให้มีไอน้ำอยู่ในเตาแพร่ซึม เพราะจะทำให้เกิด HCl ขึ้น

ด้วยเหตุนี้จึงแบ่งกระบวนการแพร่ซึมฟอสฟอรัสออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 ใช้เวลาเท่ากับ t_1 ในขั้นตอนนี้จะมีแต่ก๊าซน้ำซึ่งประกอบด้วย ออกซิเจนกับไนโตรเจนเท่านั้นที่ไหลผ่านเตาแพร่ซึม ในขั้นตอนนี้ผู้ปฏิบัติงานสามารถนำแว่นผลึก เข้าเตาได้โดยปลอดภัย เพราะยังไม่มีก๊าซคลอรีนเกิดขึ้น เนื่องจากมีก๊าซออกซิเจนในบรรยากาศ จะเกิดขึ้นออกไซด์ต่างๆ เคลือบแว่นผลึกซิลิกอน ซึ่งจะช่วยให้กระบวนการแพร่ซึมฟอสฟอรัสในขั้นตอนที่ 2 มีประสิทธิภาพดีขึ้น

ขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลาเท่ากับ t_2 ขั้นตอนนี้จะเป็นเวลาที่ใช้ในการแพร่ซึมฟอสฟอรัส ที่แท้จริงก๊าซพา (carrier gas) ซึ่งได้แก่ไนโตรเจนซึ่งอิ่มตัวด้วย $POCl_3$ และก๊าซน้ำ จะถูกปล่อยเข้าเตาแพร่ซึมพร้อมๆกัน

ขั้นตอนที่ 3 ใช้เวลาเท่ากับ t_3 ขั้นตอนนี้จะมีแต่ก๊าซน้ำไหลอยู่ในเตาแพร่ซึม เท่านั้นก๊าซน้ำจะทำการไล่ก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนที่ 2 ออกจากเตาแพร่ซึม ซึ่งทำให้สามารถดึงเอาแว่นผลึกซิลิกอนออกจากเตาได้โดยปลอดภัยหลังจากขั้นตอนที่ 3

จะเห็นว่าทั้งสามขั้นตอนจะต้องมีก๊าซน้ำ ($N_2 + O_2$) อยู่ตลอดเวลา ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่แพร่ซึมเข้าไปที่ผิวของซิลิกอนถูกกำหนดโดย solid solubility ของฟอสฟอรัสในซิลิกอนที่อุณหภูมิของการแพร่ซึมนั้น ส่วนความลึกของการแพร่ซึมถูกกำหนดโดยอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

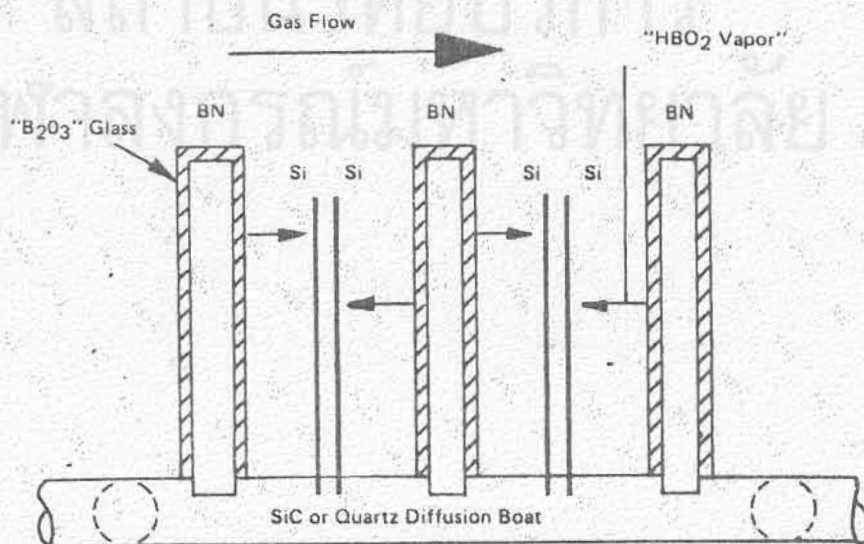
ภาคผนวก ง

การแพร่ซึมโบรอน (Boron Diffusion)¹²

แหล่งกำเนิดไอของสารประกอบโบรอนมีหลายสภาพ ในสภาพของแข็ง เช่น ผงของ B_2O_5 ในสภาพของเหลว เช่น BBr_3 ในสภาพของก๊าซ เช่น B_2H_6 และในสภาพของ Planar diffusion source เช่น แวนผลึกของ BN แวนผลึกของ BN มีด้วยกัน 4 เกรดคือ

- เกรด BN-975 ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 975°C
- เกรด BN-1100 ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1100°C
- เกรด BN-1250 ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1250°C
- เกรด PH-1050 ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1050°C

ห้องปฏิบัติการของเราได้เลือกใช้แหล่งกำเนิดไอของสารประกอบโบรอนประเภท Planar diffusion source ซึ่งมีใช้งานทั้งเกรด BN-975 เกรด BN-1100 และเกรด BN-1250 ความหนาของ BN มีตั้งแต่ 0.025 นิ้ว จนถึง 0.06 นิ้ว แล้วแต่ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางซึ่งมีตั้งแต่ค่าน้อยๆจนถึง 5 นิ้ว เตาที่ใช้ในการแพร่ซึมโบรอนเป็นแบบเตาเปิด เช่นเดียวกับของการแพร่ซึมฟอสฟอรัส ข้อแตกต่างกันก็คือ boat ของการแพร่ซึมฟอสฟอรัสเป็นแบบตามยาว (longitude boat) ส่วน boat ของการแพร่ซึมโบรอนเป็นแบบตามขวาง (Transverse boat) รูปภาคผนวก ง แสดงให้เห็นการวางแวนผลึกซิลิกอน สลับกับแวนผลึกของโบรอนไนไตรด์ในขั้นตอนการแพร่ซึม ก่อนจะนำโบรอนไนไตรด์ไปใช้งานต้องเตรียมการดังต่อไปนี้



รูปภาคผนวก ง แสดงการวางแวนผลึกซิลิกอนและแวนผลึกโบรอนไนไตรด์ขณะทำการแพร่ซึม

สำหรับ BN-1100 และ BN-1250Cleaning

1. Degrease $H_2O-H_2O_2-NH_4OH$ (5:1:1) 80°C/10 minutes
2. Water Rinse DI Water / 5 minutes
3. Surface Clean $H_2O-H_2O_2-HCl$ (6:1:1) 80°C/10 minutes
4. Water Rinse DI Water / 5 minutes
5. Plasma Cleaning Alternative to Steps 1-4

Activation and Reactivation

6. Surface Etch Buffered HF / 1 minutes
7. Water Rinse DI Water / 5 minutes max.
8. Dry 350-400°C / Dry N_2 /1 hour
9. Oxidize
 - (a) BN-1100 1000-1050°C/Dry O_2 /30 minutes max.
 - (b) BN-1250 1050-1100°C/Dry O_2 /30 minutes max.
10. Stabilize
 - (a) BN-1100 975 -1100°C/Dry N_2 /60 minutes min.
 - (b) BN-1250 1100-1250°C/Dry N_2 /60 minutes min.

Storage (Activated Wafers)

11. Dry box with N_2 purge or 350-400°C/Dry N_2

สำหรับ BN-975Cleaning

1. Degrease Trich./5 min.
2. Solvent Rinse Acetone / 2 min.
3. Water Rinse DI Water / 5 min. max.
4. Acid Clean Conc. HF / 1 min.
5. Water Rinse DI Water / 5 min. max.
6. Plasma Etching Alternative to steps 1-5

Activation and Reactivation

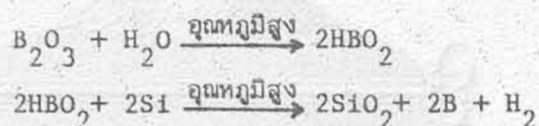
7. Dry 350-400°C / Dry N₂/1 hr.
8. Oxidize 900-950°C / Dry O₂/30 min.
9. Stabilize At use temperature

Storage

Dry Box with N₂ purge or 350-400°C / Dry N₂

ข้อดีของการใช้โบรอนไนไตรต์เป็นแหล่งกำเนิดไอสารประกอบโบรอนก็คือ สามารถควบคุมการแพร่ซึมได้แน่นหนากว่า ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์มีอายุใช้งานยืนยาวขึ้น และไม่เป็นพิษร้ายแรง

เมื่อเอาโบรอนไนไตรต์ผ่านขั้นตอนทำความสะอาดและ activate และ stabilize แล้ว นำเอาแว่นผลึกซิลิกอนวางสลับกับ BN บน boat ดังรูปภาคผนวก ง นำเข้าเตาแพร่ซึมที่มีก๊าซไนโตรเจนจำนวนน้อยไหลผ่าน ไอระเหยจาก B₂O₃ จะปลดปล่อยอะตอมโบรอนแพร่ซึมเข้าแว่นผลึกซิลิกอนตั้งขั้นตอนต่อไป



กล่าวคือ B₂O₃ ทำปฏิกิริยากับไอน้ำที่ป้อนมาในก๊าซไนโตรเจนหรือที่ BN ชูดกลืนไว้ขณะนำออกจากเตาเพื่อทำการสอดวางแว่นผลึกซิลิกอนกลายเป็น HBO₂ เสียก่อน ไอของ HBO₂ จะระเหยไปสัมผัสกับแว่นผลึกซิลิกอนทำปฏิกิริยาปลดปล่อยอะตอมโบรอนซึ่งจะแพร่ซึมเข้าสู่เนื้อผลึกซิลิกอนอีกทอดหนึ่ง

ความเข้มข้นของโบรอนที่ผิวของซิลิกอนขึ้นกับ solid solubility ที่อุณหภูมิ การแพร่ซึมและความลึกของการแพร่ซึมขึ้นกับอุณหภูมิและ เวลาที่ใช้ เหมือนกับการแพร่ซึมฟอสฟอรัสทุกประการ

ภาคผนวก จ

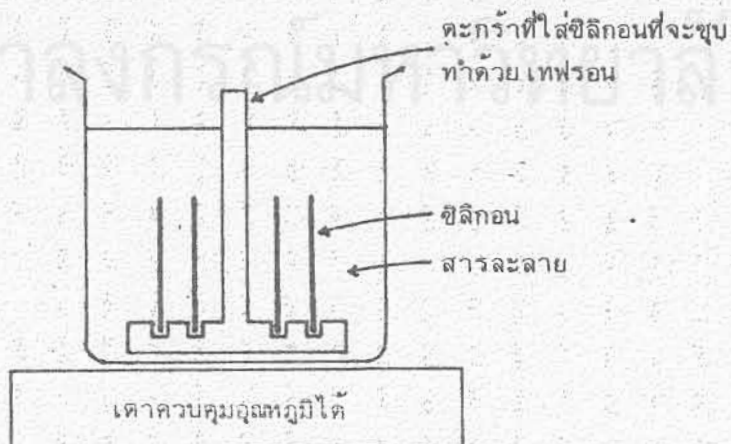
การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า (Electroless Nickel Plating)

การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้าเป็นวิธีที่มีราคาถูกเหมาะที่จะใช้ในการทำโฟโตโคโนดและเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นนิเกิลจะติดเฉพาะบนผิวซิลิกอนที่สะอาดเท่านั้น ดังนั้นเราสามารถเลือกบริเวณที่ต้องการจะชุบนิเกิล โดยให้บริเวณที่ไม่ต้องการชุบนิเกิลมีซิลิกอนไดออกไซด์คลุมอยู่ วิธีที่ห้องปฏิบัติการฯ ใช้อยู่เป็นวิธีแบบ Brenner¹³ องค์ประกอบของสารเคมีภายในภาชนะที่ใช้ชุบมีดังนี้

nickel chloride	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30 gm/l	
ammonium citrate	$(\text{NH}_4)_2 \text{HC}_6\text{H}_2\text{O}_7$	65 gm/l	
ammonium chloride	NH_4Cl	50 gm/l	
sodium hypophosphite	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	10 gm/l	ซึ่งเป็นตัว

reducing agent ถูกเติมเข้าไปที่ละน้อยพร้อมกับกวนสารละลาย

สารละลายที่ได้นำไปกรอง แวนผลึกซิลิกอนต้องนำไปกัดด้วยสารเคมีซึ่งมีส่วนผสมของ HNO_3 44% HF 18% และ H_2O 38% ก่อนที่จะทำการชุบต้องนำแวนผลึกซิลิกอนไปจุ่มลงใน HF 48% แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน เป่าให้แห้ง สารละลายที่ใช้ต้องเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ pH มีค่าระหว่าง 8-10 ซึ่งสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวไปเป็นสีน้ำเงิน อัตราการเกิดนิเกิลบนชิ้นงานขึ้นกับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ความสะอาดของแวนผลึก และความบริสุทธิ์ของสารละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการชุบเท่ากับ 90°C รูปภาคผนวก จ แสดงถึงการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้าใน beaker



รูปภาคผนวก จ ภาพแสดงการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- 1 L. K. Anderson, M. DiDomenico, Jr., and M. B. Fisher, "High-Speed Photodetectors for Microwave Demodulation of Light," in L. Young, Ed., *Advances in Microwaves*, Vol. 5, Academic, New York, 1970, pp. 1-122.
- 2 H. Melchior, "Demodulation and Photodetection Techniques," in F. T. Arecchi and E. O. Schulz-Dubois, Eds., *Laser Handbook*, Vol. 1, North-Holland, Amsterdam, 1972, pp. 725-835.
- 3 H. Melchior, "Detector for Lightwave Communication," *Phys. Today*, p. 32 (Nov. 1977).
- 4 R. K. Willardson and A. C. Bear, Eds. *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 12, *Infrared Detector II*, Academic, New York, 1977.
- 5 G. E. Stillman and C. M. Wolfe, "Avalanche Photodiode," in Ref. 4, pp. 291-394.
- 6 T. P. Lee and T. Y. Li, "Photodetectors," in S. E. Miller and A. G. Chynoweth, Eds., *Optical Fiber Communications*, Academic, New York, 1979, Chap. 18.
- 7 Stan Gage, Dave Evans, Mark Hodapp and Coworkers, Hewlett-Packard Optoelectronics Division, *Optoelectronics/Fiber-Optics Application Manual*, 2nd edition, 1981.
- 8 R. H. Bube, "Comparison of Solid State Photoelectronic Radiation Detectors," *Trans. AIME*, 239, 291 (1967).
- 9 Melchoir. H, "Semiconductor detectors for optical communications," *Conf. Laser Eng. Appl. 1973.*, abstract in *IEEE J. Quantum Electron*, QE-9, 659.
- 10 S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Chapter 13, 1981.

- 11 T. P. Lee, C. A. Burrus, and A. G. Dentai, "InGaAs/InP p-i-n Photodiodes for Lightwave Communications at 0.95 to 1.65 μm Wavelengths," IEEE J. Quantum Electron, QE-17, 232 (1981).
- 12 สุทิน เวทย์วัฒน์, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ "การทำผิวออกไซด์และการแพร่สารเจือปนในแวนผลึกซิลิกอน" ทุนรัชดาภิเษกสมโภช ปีงบประมาณ ๒๕๒๐
- 13 A. Brenner and G. E. Riddel, Proc. Am. Electroplat. Soc. 33, 23 (1946); 34, 156 (1947).
- 14 H. J. Hovel, Semiconductors and Semimetals, Volume II, Solar Cells, Academic, New York, (1975).
- 15 Werner Kern and Edwin Tracy, "Titanium Dioxide Antireflection Coating for Silicon Solar Cell by Spray Deposition," RCA Review, vol. 41, June 1980, pp. 133-180.
- 16 The Optoelectronics Data Books for Design Engineers, 5 edition, Texas Instruments Incorporated, 1978, pp. 36.
- 17 A. G. Milnes, Semiconductor Devices and Integrated Electronics, Van Nostrand Reinhold Company, 1980, pp. 762.
- 18 Optoelectronics Data Book, Fairchild Camera and Instrument Corporation, 1978, Chapter 5, pp. 36.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย