

บทที่ 5

ผลการทดลองและบทวิเคราะห์

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองวัดคุณสมบัติของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่ผลิตได้ อันได้แก่ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (IV Characteristic) และผลตอบสนองทางแสง (Spectral response) รวมไปถึงระบบวัดที่ใช้และภาพตัดขวางของโครงสร้างจาก SEM (Scanning Electron Microscope)

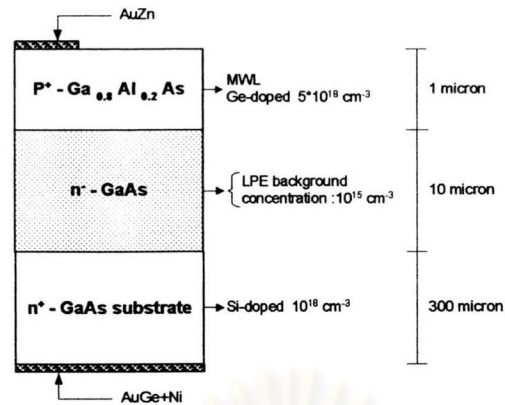
จากนั้นนำผลตอบสนองทางแสงที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ และทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางแสงระหว่างโครงสร้างต่างๆที่วัดได้ เพื่อนำไปสู่บทวิเคราะห์ความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองที่ได้วัดจริงและผลจากทางทฤษฎี รวมทั้งเป็นการยืนยันความถูกต้องของแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดในวิทยานิพนธ์ด้วย

5.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่ทำการผลิต

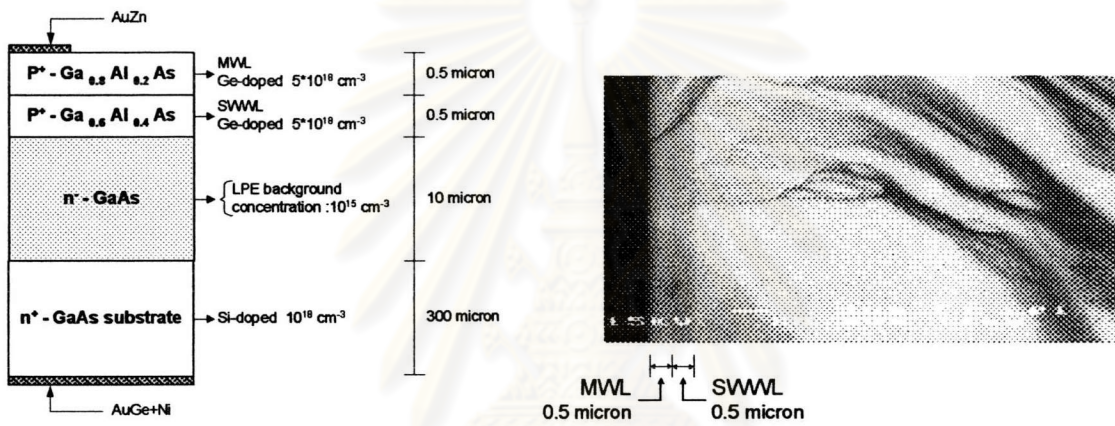
โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่ผลิตเพื่อทดลองในวิทยานิพนธ์มีด้วยกันทั้งสิ้น 3 โครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งจะเน้นศึกษาแนวคิดที่ว่า การใช้โครงสร้างที่มีชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นสั้นใน PPin Photodiode และการเพิ่มความหนาให้กับชั้นหน้าต่างหลักให้พอเหมาะ จะช่วยจัดผลตอบสนองทางแสงที่ขอบด้านความยาวคลิ่นสั้นอันเกิดเพราะกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้ ดังเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.42

โดยรูปที่ 5.1(ก) ให้เรียกว่าโครงสร้างที่ 1 คือ Pin Photodiode ที่มีชั้นหน้าต่างหลัก $P^+ - Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ หนา $1\mu m$ [1] รูปที่ 5.1(ข) ให้เรียกว่าโครงสร้างที่ 2 คือ PPin Photodiode มีชั้นหน้าต่างหลัก $P^+ - Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ หนา $0.5\mu m$ และชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นสั้น $P^+ - Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ หนา $0.5\mu m$ ส่วนรูปที่ 5.1(ค) ให้เรียกว่าโครงสร้างที่ 3 คือ PPin Photodiode มีชั้นหน้าต่างหลัก $P^+ - Ga_{0.8}Al_{0.2}As$ หนา $0.8\mu m$ และชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นสั้น $P^+ - Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ หนา $0.2\mu m$ ภาพตัดขวางจริงของโครงสร้างที่ 2 และ 3 ถ่ายจาก SEM ประกอบด้วยชั้นหน้าต่างหลักและชั้นหน้าต่างแสงคลิ่นสั้นอย่างชัดเจน

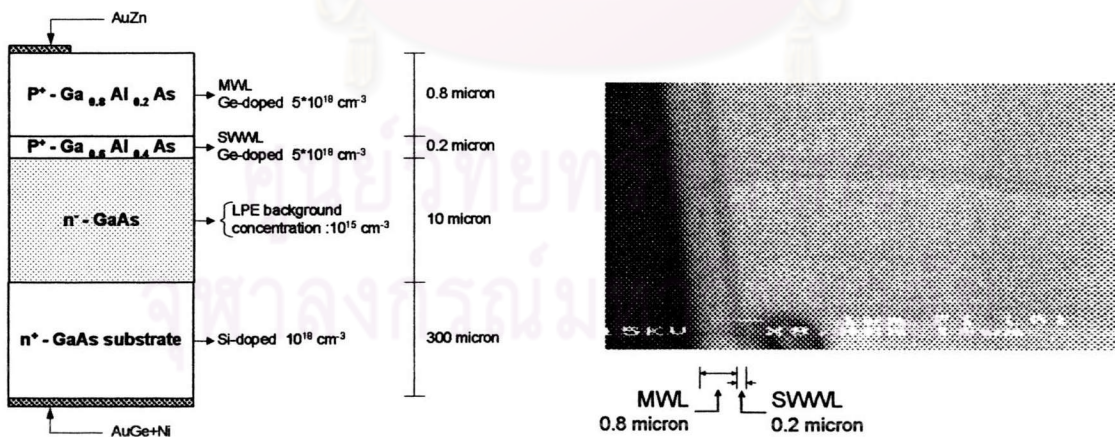
ในรูปที่ 5.2 เป็นตัวอย่างภาพ SEM ของชั้นทำงานซึ่งหนาประมาณ $10\mu m$ ในโครงสร้างทั้งสามจะใช้เงื่อนไขในการปลูกผลึกชั้นทำงานเหมือนกันทุกประการ



(ก)



(ข)



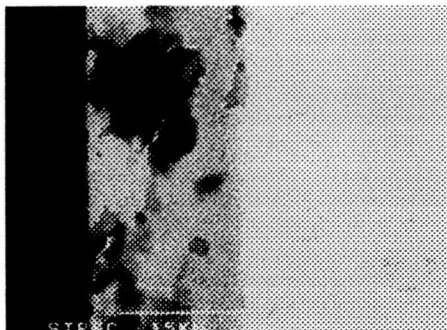
(ค)

รูปที่ 5.1 โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดที่ผลิตเพื่อทดลองในวิทยานิพนธ์

(ก) โครงสร้างที่ 1

(ข) โครงสร้างที่ 2

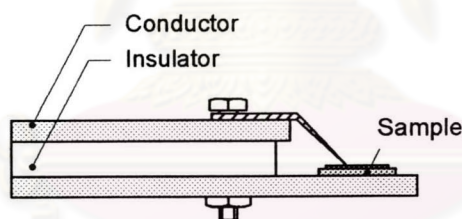
(ค) โครงสร้างที่ 3



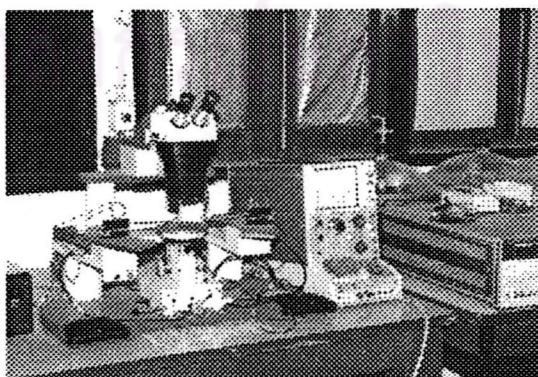
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างภาพ SEM ของชิ้นงานซึ่งหนาประมาณ 10 μm

5.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด

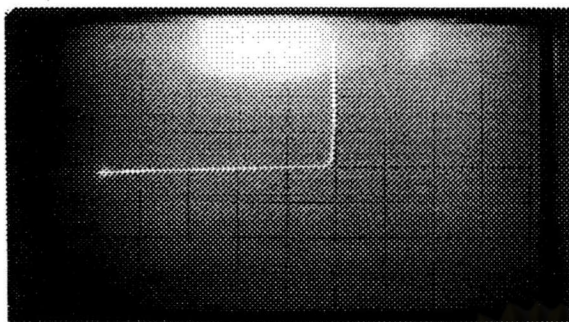
การทำงานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแสดงได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านตัวอุปกรณ์ กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม รูปที่ 5.3 คือแท่นทดสอบ (Testing house) อันเป็นอุปกรณ์ใช้ติดชิ้นงานเพื่อการไบแอส รูปที่ 5.4 คือเครื่องวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ใช้ในการทดลอง ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด โครงสร้างที่ 1, 2 และ 3 แสดงดังรูปที่ 5.5(ก)-(ค) ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 แท่นทดสอบ (Testing house)



รูปที่ 5.4 เครื่องวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

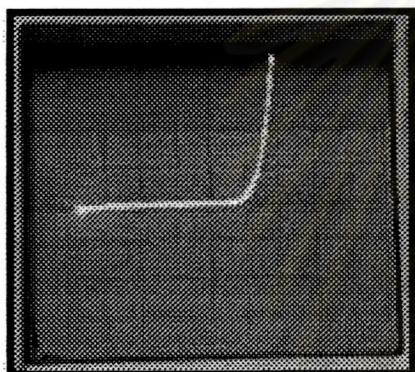


Scale: 1 V/Div
0.1 mA/Div

Breakdown voltage: 3.4 V

Cut-in voltage: 0.9 V

(ก)

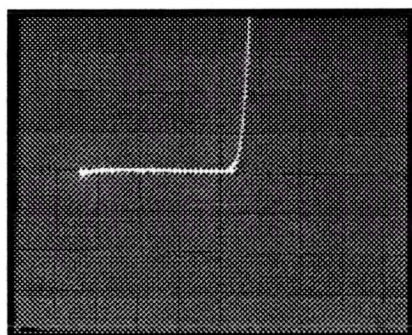


Scale: 2 V/Div
0.2 mA/Div

Breakdown voltage: 6 V

Cut-in voltage: 1.2 V

(ข)



Scale: 5 V/Div
0.5 mA/Div

Breakdown voltage: 16 V

Cut-in voltage: 1 V

(ค)

รูปที่ 5.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด

(ก) โครงสร้างที่ 1

(ข) โครงสร้างที่ 2

(ค) โครงสร้างที่ 3

ในย่านไบแอสตรง

- Cut-in voltage ของโครงสร้างที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 0.9, 1.2 และ 1 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งค่า Cut-in voltage นี้จะแปรผันตามค่าช่องว่างแถบพลังงานของ $P^+ - Ga_{1-x}Al_xAs$ ที่หัวต่อต่างชนิด

ในย่านไบแอสกลับทาง

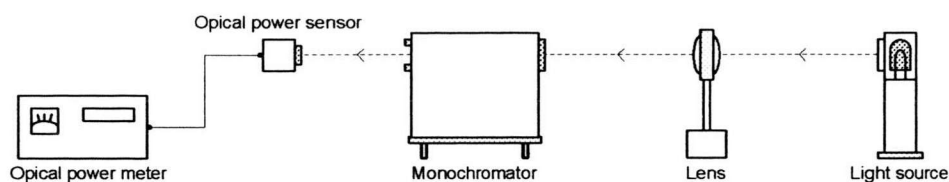
- ค่าแรงดันพังทลาย (Breakdown voltage) ของโครงสร้าง 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 3.4, 6 และ 16 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติแล้วค่าแรงดันพังทลายของโฟโตไดโอดจะอยู่ที่ประมาณ 15-20 โวลต์ ขึ้นกับการเติมสารเจือและความหนาของชั้นทำงาน [15]
- โฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดในโครงสร้างทั้งสามมีกระแสรั่วที่มืดต่ำ เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านโฟโตไดโอดไดโอดขณะไบแอสกลับทางมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current, I_0)

5.3 ผลตอบสนองทางแสง

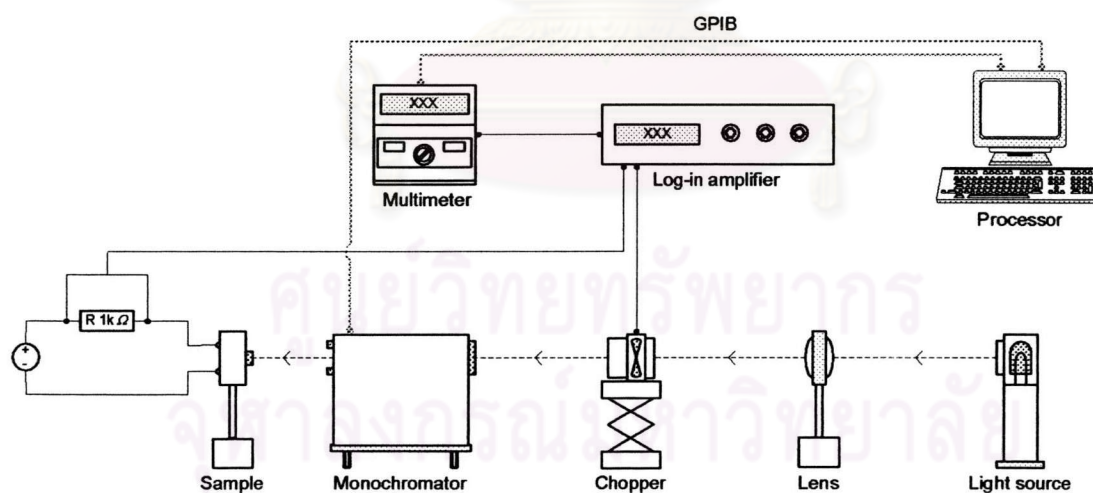
ได้ทำการวัดผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดและนำผลไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของสมมติฐานที่ใช้ออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอด

ระบบวัดกำลังของแหล่งกำเนิดแสงซึ่งใช้หลอดทั้งสแตนเป็นดังรูปที่ 5.6 รูปที่ 5.7 แสดงระบบวัดกระแสแสงอันประกอบไปด้วย

- 1) หลอดทั้งสแตน ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง
- 2) เลนส์ สำหรับโฟกัสและปรับตำแหน่งของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง
- 3) Monochromator เพื่อเลือกความยาวคลื่นแสงที่ต้องการ
- 4) Sample holder พร้อมขั้วจ่ายไบแอส ใช้วางแท่นทดสอบเพื่อทำการไบแอสโฟโตไดโอด
- 5) Digital multimeter วัดค่าแรงดันคร่อมตัวความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม ในวงจรไบแอส แล้วส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผล
- 6) แหล่งจ่ายไฟ จ่ายไบแอสให้กับโฟโตไดโอด
- 7) ส่วนประมวลผลและควบคุมระบบวัด รวมทั้งบันทึกข้อมูลที่วัดได้
- 8) เครื่องมือวัดกำลังแสง (Optical power meter) เพื่อวัดกำลังแสงของหลอดทั้งสแตนในแต่ละค่าความยาวคลื่น



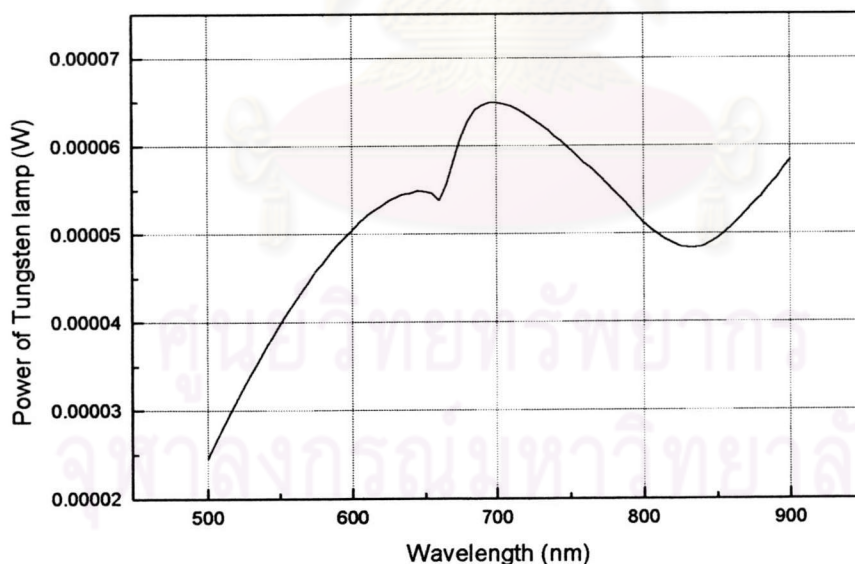
รูปที่ 5.6 ระบบวัดกำลังแสงของหลอดทั้งสแตนด์ในแต่ละค่าความยาวคลื่น



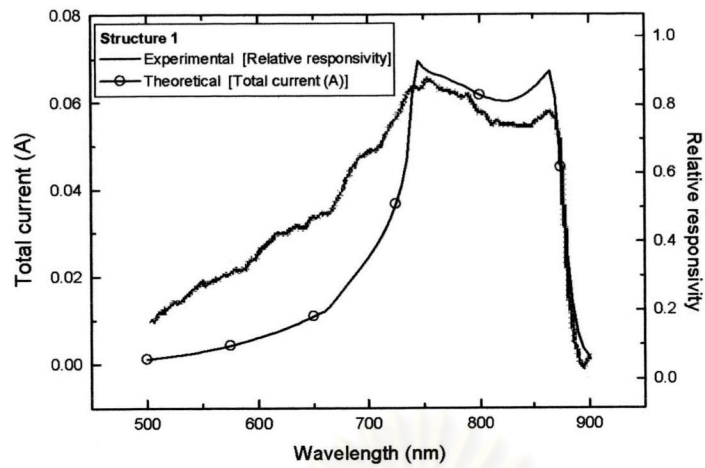
รูปที่ 5.7 ระบบวัดผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอด

ก่อนใช้งานหลอดทั้งสแตนเป็นแหล่งกำเนิดแสงจะต้องเปิดทิ้งไว้ล่วงหน้าเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้การเปล่งแสงของหลอดอยู่ในสภาวะอยู่ตัว จากนั้นทำการวัดกำลังแสงของหลอดที่แต่ละค่าความยาวคลื่นด้วยระบบวัดตามรูปที่ 5.6 ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 5.8 เพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณและการนอร์มัลไลซ์ (Normalization) ค่ากระแสแสงที่วัดได้ในภายหลัง ต่อมาใช้ระบบวัดที่ติดตั้งรูปที่ 5.7 วัดผลตอบสนองทางแสง โดยจ่ายไบแอสกลับทางให้กับโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดค่าไม่เกินแรงดันพังทลายที่วัดได้ในหัวข้อ 5.1 ซึ่งทั้งนี้อาจทำการทดลองวัดผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดที่ขายตามท้องตลาดด้วย และนำผลมาเปรียบเทียบกับเอกสาร (Data sheet) ของโฟโตไดโอดนั้น เพื่อให้แน่ใจว่าระบบวัดที่ติดตั้งสามารถวัดวัดผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดได้อย่างถูกต้องจริง

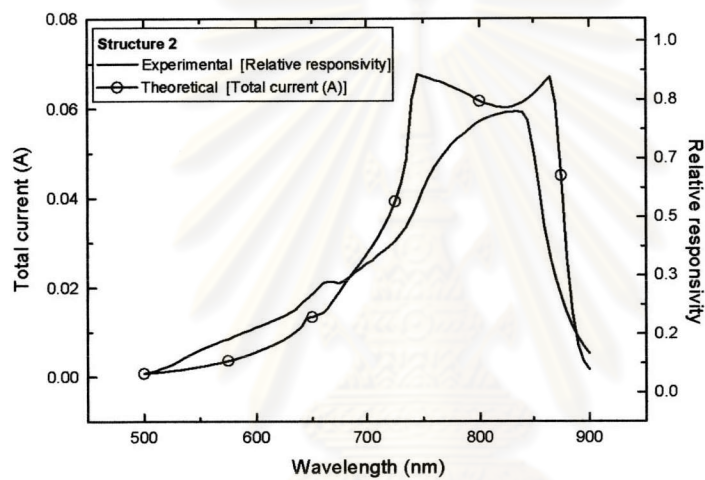
รูปที่ 5.9 (ก)-(ค) เป็นค่า Responsivity ในหน่วย A/W ของโครงสร้าง 1, 2 และ 3 ที่วัดได้ตามลำดับ โดยใช้แรงดันไบแอสเท่ากับ 1 โวลต์ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณของค่ากระแสแสงในหน่วย A โดยใช้ค่ากำลังแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดจริงตามกราฟรูปที่ 5.8 และประสิทธิภาพเชิงควอนตัมเท่ากับ 1



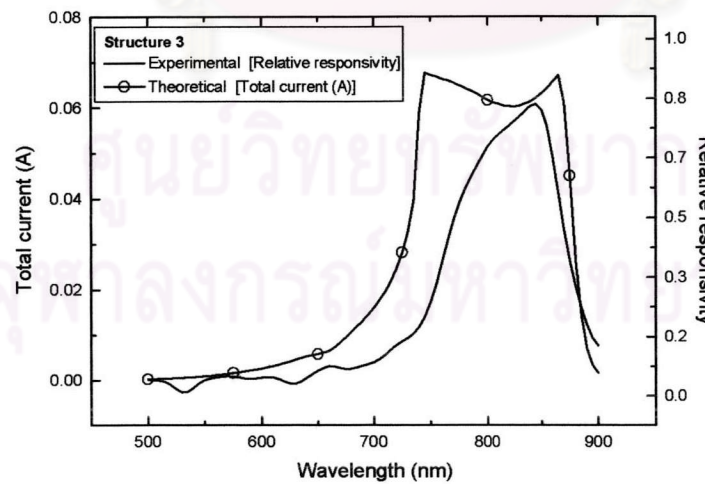
รูปที่ 5.8 กำลังแสงของหลอดทั้งสแตนที่วัดด้วยระบบวัดตามรูปที่ 5.6



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.9 ค่าการตอบสนองของกระแสแสงที่วัดได้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณ
 (ก) โครงสร้างที่ 1 (ข) โครงสร้างที่ 2 (ค) โครงสร้างที่ 3

5.4 บทวิเคราะห์

จากรูปที่ 5.9(ก)-(ค) พบว่า ผลตอบสนองทางแสงที่วัดได้จริงมีค่าสูงในช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกับผลการคำนวณ คือประมาณช่วง 743-875 nm อันเป็นค่าความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับค่าช่องว่างพลังงานของ $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ และ GaAs ตามลำดับ เนื่องจากโดยทฤษฎีแล้วโครงสร้างแบบหัวต่อต่างชนิด ทำให้โฟตอนเฉพาะที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง 1.425-1.6744 eV (เป็นค่าที่อยู่ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานของ $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ และ GaAs) เท่านั้นที่สามารถเข้าไปกระตุ้นให้เกิดพาหะในชั้นทำงานได้

ความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณ น่าจะมีสาเหตุโดยตรงมาจากประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของโฟโตไดโอดจริงมีค่าต่ำกว่า 1 กล่าวคือคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นทั้งหมด จะมีบางส่วนเท่านั้นที่มีผลต่อกระแสแสง ในกรณีของโฟโตไดโอดในอุดมคติจะถือว่ามีประสิทธิภาพเชิงควอนตัมเท่ากับหนึ่งหรือหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าคู่อิเล็กตรอน-โฮลทั้งหมดที่เกิดในโครงสร้างจะทำให้เกิดกระแสแสง แต่ในความเป็นจริงประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของโฟโตไดโอดจะไม่เป็นอุดมคติ คือต่ำกว่าหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ เช่น ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมแปดสิบเปอร์เซ็นต์ หมายความว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกลับยี่สิบเปอร์เซ็นต์ และได้เป็นกระแสแสงแปดสิบเปอร์เซ็นต์

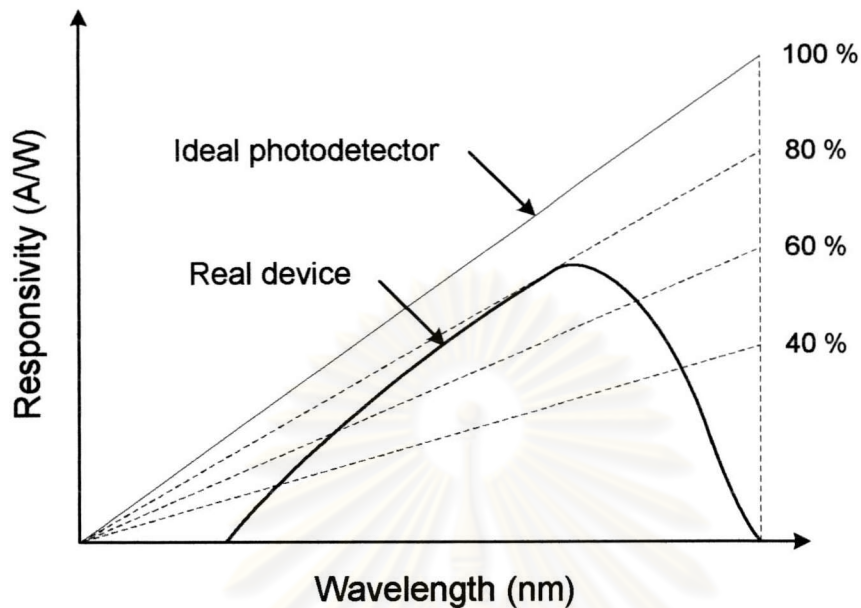
รูปที่ 5.10 คือค่าการตอบสนองของตัวตรวจจับสัญญาณแสงในอุดมคติ โดยค่าการตอบสนอง (Responsivity) คำนวณได้จาก

$$R = \frac{\eta \lambda (\mu\text{m})}{1.24} \quad (A/W) \quad (6.1)$$

เมื่อ R คือ ค่าการตอบสนอง (Responsivity) ของโฟโตไดโอด

η คือ ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม

นอกจากนี้ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมอาจแปรผันตามตำแหน่งของโครงสร้าง โดยในช่วงความยาวคลื่นสั้น ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมจะต่ำมากเนื่องจากศูนย์รวมตัวใกล้รอยต่อ ในขณะที่ในช่วงความยาวคลื่นยาว ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมจะต่ำเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากแรงดันไบแอสไม่สามารถครอบคลุมตลอดย่านทำงานจริง

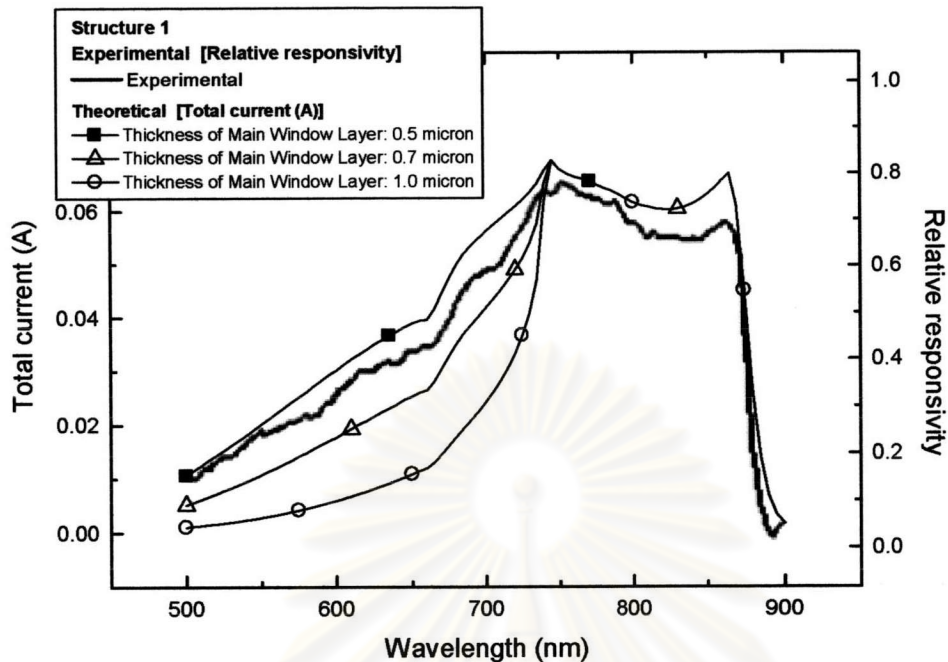


รูปที่ 5.10 ค่าการตอบสนองของตัวตรวจจับสัญญาณแสงในอุดมคติ [16]

5.4.1 ความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นสั้น

ผลจากศูนย์รวมตัวใกล้รอยต่อต่างชนิด 2 รอยต่อ $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As} (\text{P}^+) / \text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As} (\text{P}^+) / \text{GaAs} (\text{n})$ ที่เกิดจากความไม่ลงตัวของผลึก (Lattice mismatch) ทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดในช่วงความยาวคลื่น 743-840 nm มีประสิทธิภาพเชิงควอนตัมต่ำมาก ดังผลการทดลองในรูปที่ 9 (ข) และ (ค) ของโครงสร้างที่ 2 และ 3 ในขณะที่โครงสร้างที่ 1 กลับไม่มีผลกระทบมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากมีความไม่ลงตัวของผลึกที่หัวต่อ $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As} (\text{P}^+)$ กับ $\text{GaAs} (\text{n})$ เพียงหัวต่อเดียวเท่านั้น

อย่างไรก็ตามในรูปที่ 5.9 (ก) ของโครงสร้างที่ 1 จะเห็นว่าด้านความยาวคลื่นต่ำกว่า 740 nm ผลตอบสนองทางแสงที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าการคำนวณอยู่มาก อาจตั้งสมมติฐานได้ว่า ชั้นหน้าต่างหลักที่ออกแบบความหนาไว้ที่ $1 \mu\text{m}$ เมื่อผลิตจริงอาจมีความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากการผลิต คือได้ชั้นหน้าต่างหลักบางกว่า $1 \mu\text{m}$ จากการคำนวณผลตอบสนองทางแสงเมื่อให้ความหนาชั้นหน้าต่างหลักเป็น 0.5, 0.7 และ $1 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.11 พบว่าชั้นหน้าต่างหลักของโฟโตไดโอดที่ผลิตในโครงสร้างที่ 1 น่าจะมีความหนาอยู่ระหว่าง $0.5\text{-}0.7 \mu\text{m}$

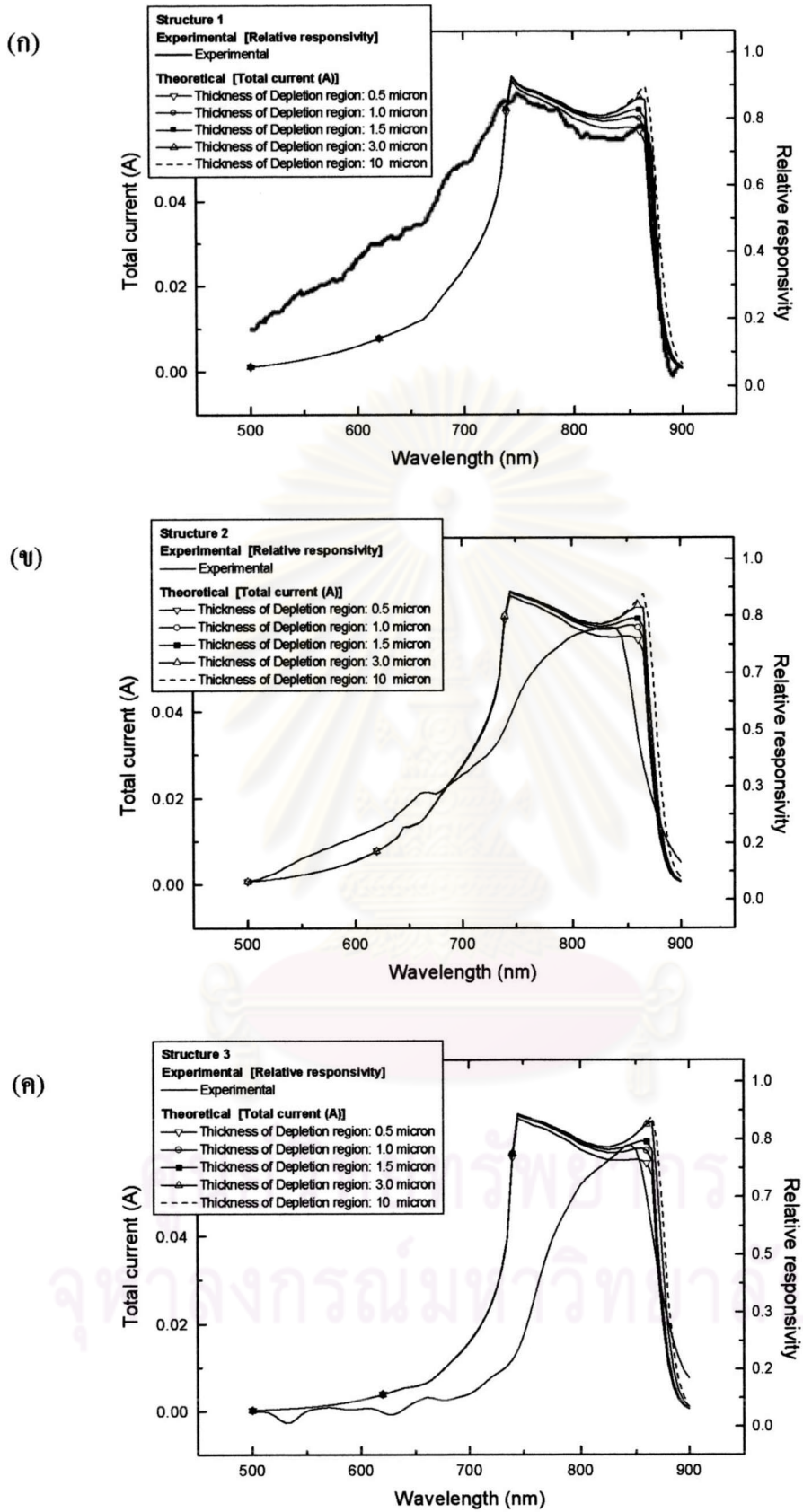


รูปที่ 5.11 การคำนวณผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดโครงสร้างที่ 1 เมื่อให้ความหนาชั้นหน้าต่างหลักเป็น 0.5, 0.7 และ 1 μm ตามลำดับ

5.4.2 ความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นยาว

ความคลาดเคลื่อนในย่านความยาวคลื่นยาวของผลตอบสนองทางแสงที่วัดได้กับการคำนวณ เกิดจากการให้แรงดันไบแอสใช้งานต่ำเกินไป โดยทั้งสามโครงสร้างจะไบแอสด้วยแรงดัน 1 โวลต์ การไบแอสด้วยแรงดันต่ำจะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะหรือบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมแคบกว่าชั้นทำงานจริงของโครงสร้าง ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะแปรตามรากที่ n ของแรงดันทั้งหมดที่ตกคร่อมรอยต่อ โดย n มีค่าประมาณ 2 เมื่อเป็นรอยต่อแบบอัสลรอย และมีค่าประมาณ 3 เมื่อเป็นรอยต่อแบบแพร์ซีม [17]

รูปที่ 5.12 (ก)-(ค) แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบสำหรับ โครงสร้างที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เพื่อหาความกว้างของย่านปลอดพาหะที่สอดคล้องกับผลการคำนวณ จากการคำนวณพบว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด น่าจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.5 μm ซึ่งหมายความว่า ย่านทำงานตามโครงสร้าง 10 μm มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมเพียง 1.5 μm เหลืออีก 8.5 μm เป็นย่านปลอดสนามไฟฟ้า



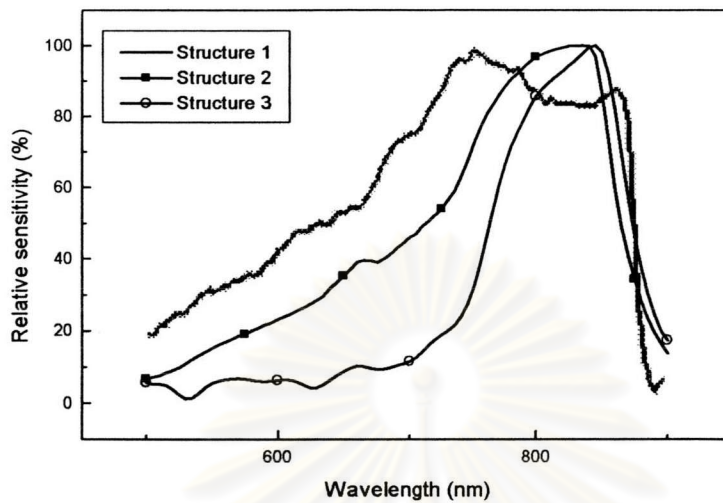
รูปที่ 5.12 การคำนวณเปรียบเทียบเพื่อหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

(ก) โครงสร้างที่ 1

(ข) โครงสร้างที่ 2

(ค) โครงสร้างที่ 3

5.5 การเปรียบเทียบระหว่างผลที่วัดได้จากการทดลอง



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบค่าการตอบสนองของโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดในแต่ละโครงสร้าง

จากรูปที่ 5.13 จะเห็นได้ว่าการทดลองปรับเปลี่ยนความหนาของชั้นหน้าต่างหลัก 2 ค่าใน PPin Photodiode เปรียบเทียบกับ โครงสร้างที่ไม่มีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับแนวคิดที่ได้ออกแบบโครงสร้างโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิด ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.2 จึงเป็นการยืนยันได้ว่า การสร้างชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น และการเพิ่มความหนาของชั้นหน้าต่างหลัก ใน PPin Photodiode ให้พอเหมาะ จะสามารถจัดผลตอบสนองทางแสงที่ขอบทางด้านความยาวคลื่นสั้นของโฟโตไดโอดได้

นอกจากนี้ จากโครงสร้างที่ 3 พบว่าถึงแม้ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นจะมีความหนาน้อยกว่าความยาวแพร่ซึมของอิเล็กตรอนใน $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ ผลตอบสนองทางแสงในย่านความยาวคลื่นสั้นก็ยังคงมีค่าต่ำที่สุดอยู่ดี ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของกำแพงพลังงานระหว่างชั้นหน้าต่างหลัก $\text{P}^+ - \text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ และชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น $\text{P}^+ - \text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.25 eV ตามแบบจำลองของแอนเดอร์สันในรูปที่ 3.12 จะสามารถกั้นพาหะที่เกิดในชั้นหน้าต่างหลักมิให้แพร่ซึมเข้ามายังชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นได้ พาหะในชั้นหน้าต่างหลักที่จะสามารถข้ามกำแพงพลังงานดังกล่าวมายังชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นได้จะต้องเป็นการขนส่งพาหะแบบ Thermionic emission เท่านั้น

จึงสรุปได้ว่า การใช้ชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นที่มีค่าช่องว่างพลังงานกว้าง เช่น สารกึ่งตัวนำ $\text{P}^+ - \text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ ในโครงสร้างโฟโตไดโอดหัวต่อต่างชนิดชนิด PPin จะทำให้มีกำแพงพลังงานระหว่างชั้นหน้าต่างหลักและชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น ซึ่งจะกั้นพาหะจากชั้นหน้าต่างหลักไม่ให้แพร่ซึมมายังหัวต่อ อีกทั้งอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลในชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นเองยังมีค่าต่ำมากอีกด้วย ดังแสดงในบทที่ 3 จึงถือว่าไม่มีพาหะจากชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นแพร่ซึมมายังย่าน

ทำงาน ส่วนหากโครงสร้าง PPin Photodiode มีชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นหนากว่าค่าความยาว
แพร่ซึมของอิเล็กตรอน ก็จะมีส่วนช่วยให้พาหะที่ข้ามกำแพงพลังงานมายังชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้น
แบบ Thermionic emission เกิดการรวมตัวกลับหมดในชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นก่อนที่จะไปถึงยัง
ย่านทำงาน ทั้งหมดนี้จะทำให้สามารถช่วยขจัดผลตอบสนองทางแสงที่ชอบด้านความยาวคลื่นสั้น
อันเกิดจากกระแสแพร่ซึมจากชั้นรับแสงได้ และถ้าหากเพิ่มความหนาของชั้นหน้าต่างหลักอย่าง
เหมาะสม จะทำให้ชั้นหน้าต่างหลักดูดกลืนแสงที่มีพลังงานสูงได้มากขึ้น แสงที่มีพลังงานสูง
ดังกล่าวก็จะทะลุไปยังชั้นหน้าต่างแสงคลื่นสั้นได้น้อยลง ทำให้ผลตอบสนองทางแสงที่ชอบด้าน
ความยาวคลื่นสั้นมีค่าน้อยที่สุด ดังความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย