

อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเลตชนิดชอตต์กี้ไดโอดฟิล์มเพชร

DIAMOND SCHOTTKY DIODE UV PHOTODETECTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-960-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเลตชนิดขอตัก์ไดโอดฟิล์มเพชร

DIAMOND SCHOTTKY DIODE UV PHOTODETECTOR



เลขหม.....  
เลขทะเบียน..... 47519  
วัน, เดือน, ปี..... 19 ส.ค. 2546

b.....  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-960-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DIAMOND SCHOTTKY DIODE UV PHOTODETECTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2002

ISBN 974-648-960-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2002**

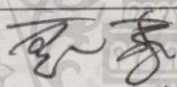
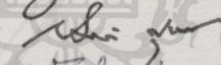
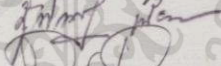

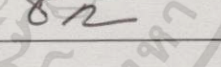
**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเลตชนิดขอตัก์ไดโอดฟิล์มเพชร  
DIAMOND SCHOTTKY DIODE UV PHOTODETECTOR  
ชื่อนักศึกษา นายลัดไทย ไทโยธิน  
รหัสประจำตัว 39061083  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ์ จิตีรุ่งเรือง	
รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ	
ผศ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล	
รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 21 พฤษภาคม 2545 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัทธู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 21 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเลตชนิดชอตต์กีไดโอดฟิล์มเพชร
นักศึกษา	นายลัคไทย ไทโยธิน
รหัสประจำตัว	39061083
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สมศักดิ์ เชียรศิริกุล

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาและพัฒนานำฟิล์มเพชรมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโดยใช้ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำทั้งชนิดอินทรีนซิกและเติมอะตอมสารเจือโบรอน จากนั้นนำฟิล์มเพชรมาสร้างเป็นโครงสร้างแบบโฟโตคอนดักเตอร์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงต่างๆของฟิล์มเพชร เช่น สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสง ความเร็วในการตอบสนอง เสถียรภาพของอุปกรณ์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มเพชรให้การตอบสนองที่ดีกับแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่นสั้นช่วง UVC จากนั้นจึงนำฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือโบรอนในปริมาณต่างๆมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบชอตต์กีโฟโตไดโอดและทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ จากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดมีความแตกต่างการตอบสนองระหว่างแสงอัลตราไวโอเลตกับแสงตามองเห็นมากกว่าอุปกรณ์แบบโฟโตคอนดักเตอร์มาก ผลการศึกษาความเร็วในการตอบสนองพบว่าอุปกรณ์ชนิดอินทรีนซิกมีช่วงเวลาที่ขาขึ้นและขาลงต่ำสุด  $14 \mu\text{s}$  และ  $250 \mu\text{s}$  ตามลำดับ มีปริมาณกระแสไฟฟ้ามืดต่ำสุด  $0.05 \text{ nA}$  มีอัตราส่วนสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณจริงสูงสุด  $97.5 \text{ dB}$  และอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืดต่ำสุดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบอุปกรณ์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์โดยทดลองกับอุปกรณ์ชนิด  $10 \text{ ppm}$  จากการทดลองพบว่าถ้าลดขนาดพื้นที่รอยต่อชอตต์กีลงจะทำให้ช่วงเวลาการตอบสนองเร็วขึ้น จากผลการทดลองเวลาที่ขาขึ้นเท่ากับ  $3 \mu\text{s}$  ที่พื้นที่รอยต่อ  $1.0 \text{ mm}^2$  และถ้าลดความหนาชั้นฟิล์มเพชรจะทำให้ช่วงเวลาตอบสนองเร็วขึ้น โดยที่เวลาที่ขาขึ้นมีค่าประมาณ  $0.75 \mu\text{s}$  ที่ความหนา  $6 \text{ ไมครอน}$  จากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่เติมปริมาณอะตอมสารเจือดำหรือไม่เติมเลยจะมีประสิทธิภาพการทำงานดีกว่าอุปกรณ์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่เติมสารเจือในปริมาณสูงกว่าทั้งในแง่ของปริมาณกระแสโฟโตสัญญาณรบกวน ความเร็วในการตอบสนอง และเสถียรภาพของอุปกรณ์ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Diamond Schottky Diode UV Photodetector
<b>Student</b>	Mr. Ladthai Thaiyotin
<b>Student ID.</b>	39061083
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Associate Prof. Somsak Cheirsirikul

### ABSTRACT

This thesis studied and developed diamond film for fabricating light detectors, both intrinsic and extrinsic diamond film were synthesized by hot-filament CVD at low pressure. The photoconductor structure was fabricated on diamond film; then the responsivity with different wavelengths, the response time and the temperature's stability were studied. The schottky photodiodes were fabricated on extrinsic diamond film; afterward they were studied characteristics of device such as sensitivity, response time, dark current, noises and temperature's stability. Moreover, the schottky photodiode parameters were changed for approve photodiode efficiency. From the experiment, the intrinsic schottky photodiodes has low rise and fall time  $14 \mu s$  and  $250 \mu s$  respectively, low dark current  $0.05 \text{ nA}$ , SNR  $97.5 \text{ dB}$  and high temperature stability. Furthermore, the response time of  $10 \text{ ppm}$  devices was reduced when decreasing the device's area ( rise time  $3 \mu s$  junction area  $1.0 \text{ mm}^2$  ) and the diamond film thickness ( $0.75 \mu s$  thickness  $6 \mu m$  ). From experiment, the lower doping devices or intrinsic have high photo current, low noise, short response time and high temperature stability.

## กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ประกอบขึ้นด้วยความอนุเคราะห์และการช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆซึ่งผู้เขียนอยากจะกล่าวคำขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล สำหรับแนวคิด คำปรึกษา เทคนิคและวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล สำหรับคำแนะนำและคำปรึกษา ขอขอบพระคุณ รศ. โยอิชิ ยาซุมูระ สำหรับทฤษฎีและวิธีการวิเคราะห์ และขอขอบพระคุณ ผศ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่อำนวยความสะดวกสำหรับเครื่องมือในการทำวิจัยและแนะนำการแก้ปัญหาต่างๆ

ขอขอบคุณทีมงานที่ดี เอกราช รัตนอุดมพิศุทธิ์ และวีระศักดิ์ เตชะกิตติโรจน์ สำหรับอุปกรณ์ในการทดลองและเทคนิคต่างๆ ขอขอบคุณ จริญญา ศรีธรรมาธิคุณ และสุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์ สำหรับแพลตฟอร์มไมโครฮาร์ดแวร์คุณภาพสูง ขอขอบคุณ อภินัย ฤกษ์รัตน์ สำหรับเนื้อที่ว่างให้เก็บข้อมูล และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆในการทำงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ พ่อและแม่ ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในการศึกษาที่ดีตลอดมา

ลัดไทย ไทโยธิน

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป .....	IX
คำอธิบายสัญลักษณ์ .....	XIII
คำนำ .....	XV
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี .....	5
2.1 พีลัมเพอร์ .....	5
2.1.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร .....	5
2.1.2 คุณสมบัติต่างๆของเพชร .....	6
2.1.3 การสังเคราะห์พีลัมเพอร์ .....	7
2.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ .....	9
2.2.1 รอยต่อแบบโฮ้มิก .....	10
2.2.2 รอยต่อแบบชอตต์กี .....	11
2.3 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ .....	18
2.3.1 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ .....	18
2.3.2 ปฏิกิริยาการแผ่รังสี .....	19
2.3.3 การดูดกลืนแสงด้วยเอกซิไดซัน .....	23
2.3.4 การดูดกลืนแสงในช่องว่างแถบพลังงาน .....	23
2.3.5 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ .....	25
2.3.6 การดูดกลืนแสงด้วยโฟลาไรเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริก .....	25
2.3.7 การดูดกลืนแสงด้วยการสั่นของโครงผลึก .....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง .....	26
2.4.1 อุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ .....	26
2.4.2 อุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอด .....	29
บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด .....	37
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชร .....	37
3.1.1 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) .....	37
3.1.2 พูเรียร์ทรานสฟอร์มรามานสเปกโทรสโคปี (FT-Raman) .....	39
3.2 เครื่องมือวัดคุณลักษณะกระแสแรงดันและความจุไฟฟ้าแรงดัน .....	40
3.3 เครื่องมือวัดทางแสง .....	41
บทที่ 4 การออกแบบและการสร้าง .....	43
4.1 การออกแบบ โฟโตคอนดักเตอร์ .....	43
4.2 การออกแบบชอตต์กีโฟโตไดโอด .....	44
4.3 การออกแบบโคอะเฟรม .....	47
4.4 การกัดฟิล์มเพชร .....	48
4.5 มาสก์และลำดับการสร้าง .....	48
4.5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร .....	48
4.5.2 โฟโตคอนดักเตอร์ .....	49
4.5.3 ชอตต์กีโฟโตไดโอด .....	54
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง .....	60
5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร .....	60
5.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน .....	60
5.1.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร .....	60
5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ .....	63
5.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM .....	63
5.2.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มด้วยรามานสเปกโทรสโคปี .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชรด้วยอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ .....	66
5.3.1 ผลการตอบสนองสเปกตรัมแสงของฟิล์มเพชร .....	66
5.3.2 ผลการเติมอะตอมสารเจือ โบรมันที่มีต่อการตอบสนองสเปกตรัมแสงของฟิล์มเพชร.....	68
5.3.3 การไบแอสแรงดันกับปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโต .....	70
5.3.4 ผลการออกแบบขั้วโลหะที่มีต่อการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ .....	73
5.3.5 ผลของการเติมอะตอมสารเจือ โบรมันที่มีต่อการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์ .....	75
5.3.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสที่มีต่อการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์ .....	77
5.3.7 เสถียรภาพของอุปกรณ์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง .....	78
5.3.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	80
5.4 การศึกษาคุณสมบัติขอตดักโค โอคสร้างจากฟิล์มเพชรที่ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือ โบรมันต่างๆ .....	81
5.4.1 คุณลักษณะกระแสแรงดันของขอตดักโฟโตโค โอค .....	81
5.4.2 ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อขอตดักโฟโตโค โอค.....	84
5.4.3 ศักย์ไฟฟ้าภายในและค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยต่อขอตดักโค โอค .....	85
5.5 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของขอตดักโฟโตโค โอคฟิล์มเพชร .....	87
5.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของขอตดักโฟโตโค โอคเมื่อได้รับการฉายแสง .....	88
5.5.2 การตอบสนองสเปกตรัมแสงของขอตดักโฟโตโค โอค .....	90
5.5.3 การตอบสนองเชิงเวลาของขอตดักโฟโตโค โอค .....	91
5.5.3.1 ผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่มีต่อความเร็วในการตอบสนอง .....	92
5.5.3.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชรที่มีต่อความเร็ว ในการตอบสนอง .....	95
5.5.3.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่รอยต่อขอตดักที่มีต่อความเร็ว ในการตอบสนอง .....	97
5.5.3.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสที่มีต่อความเร็วในการตอบสนอง .....	99
5.5.4 การเกิดสัญญาณรบกวนในขอตดักโฟโตโค โอค .....	101
5.5.4.1 กระแสรบกวนชนิดเทอร์มอลในขอตดักโฟโตโค โอค .....	101
5.5.4.2 กระแสรบกวนชนิดช็อตในขอตดักโฟโตโค โอค .....	102
5.5.5 เสถียรภาพของขอตดักโฟโตโค โอคเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง .....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	108
เอกสารอ้างอิง .....	111
บทความเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	113
ภาคผนวก ก .....	114
ภาคผนวก ข .....	115
ภาคผนวก ค .....	116
ภาคผนวก ง .....	117
ภาคผนวก จ .....	118
ประวัติผู้เขียน .....	119



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ.....	7
5.1 ค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลย้อนกลับของอุปกรณ์ขอต็คีโฟโตไดโอด .....	82
5.2 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของขอต็คีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรกับ โลหะอลูมิเนียม.....	87
5.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้าเมื่อขณะไม่ได้รับแสงและได้รับแสงของขอต็คีโฟโต .....	89
5.4 ช่วงเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงกับแบนด์วิดท์เมื่อเพิ่มปริมาณอะตอมสารเจือ โบรอน .....	94
5.5 ช่วงเวลาขาขึ้นขาลงและค่าแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ขอต็คีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชร 10 ppm ที่ค่าความหนาฟิล์มเพชรต่างกัน .....	96
5.6 กระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืดของอุปกรณ์ขอต็คีโฟโตไดโอดชนิด 10 ppm ที่ค่าความหนาฟิล์มเพชรต่างกัน.....	97
5.7 ช่วงเวลาขาขึ้น ขาลงและแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ขอต็คีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชร 10 ppm ที่ขนาดพื้นที่รอยต่อไดโอดต่างกัน .....	98
5.8 ช่วงเวลาขาขึ้น ขาลงและแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ขอต็คีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชร 10 ppm เมื่อให้แรงดันไบแอสย้อนกลับค่าต่างๆ .....	100
5.9 ค่าความต้านทานชั้นดีและกระแสรั่วบวกรวมชนิดเทอร์มอลของขอต็คีโฟโตไดโอดที่ค่า อะตอมสารเจือโบรอนต่างๆ ณ อุณหภูมิห้อง ( 297 องศาเคลวิน).....	102
5.10 ค่า SNR ของอุปกรณ์ขอต็คีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรอัตราส่วน B/C ต่างๆ.....	102

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	อุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดเทอร์โมไฟล์.....1
1.2	อุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบโฟโตมิชชัน.....2
1.3	แผนผังสเปกตรัมแสงอัลตราไวโอเลต.....3
2.1	แบบจำลองโครงสร้างผลึกเพชร.....5
2.2	ระนาบต่างๆของเพชร.....6
2.3	ภาพไดอะแกรมระบบ CVD แบบลดความร้อน.....8
2.4	ภาพจำลองการก่อตัวของผลึกเพชรที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็น โพลีคริสตัลไลน์.....9
2.5	โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น.....10
2.6	โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....10
2.7	โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับการไบแอสแรงดันไปข้างหน้า.....12
2.8	โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อไบแอสย้อนกลับ.....13
2.9	โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรและโลหะอลูมิเนียมก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน...17
2.10	การลดลงของโฟตอนฟลักซ์เมื่อผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ.....18
2.11	การดูดกลืนแสงและการสะท้อนแสงของวัสดุ.....19
2.12	การดูดกลืนแสงพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ.....22
2.13	การดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานต่างๆในช่องว่างแถบพลังงาน.....24
2.14	โครงสร้างอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์.....29
2.15	โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอด.....30
2.16	กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆในรอยต่อชอตต์กีโฟโตไดโอด (ไบแอสย้อนกลับ).....32
2.17	วงจรมูลของโฟโตไดโอด.....32
2.18	เวลาตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่เปลี่ยนแปลงกับความเข้มแสง.....36
3.1	แผนภาพหลักการทำงานของเครื่อง SEM.....37
3.2	ภาพถ่ายเครื่อง SEM ของ JEOL.....38
3.3	การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ทำให้เกิด Raman Scattering.....39
3.4	ภาพถ่ายเครื่อง FT-Raman spectrometer ของ Renishaw.....40
3.5	ภาพจำลองชุดเครื่องมือวัด HP4061 A ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์.....41
3.6	ภาพถ่ายเครื่อง HP4061A.....41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	ภาพถ่ายชุดเครื่องมือวัดทางแสงที่ใช้ในการทดลอง.....42
4.1	마스크สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโฟโตคอนดักเตอร์.....44
4.2	마스크โคอะเฟรม .....45
4.3	마스크ขี้วโลหะ .....46
4.4	ภาพจำลองโครงสร้างอุปกรณ์ขอตตักโฟโตไดโอด .....47
4.5	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก.....47
4.6	แบบจำลองการกัดฟิล์มเพชรด้วยพลาสมา.....48
4.7	ภาพถ่ายเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....49
4.8	ภาพจำลองขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์.....51
4.9	ภาพถ่ายอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างได้.....53
4.10	ภาพจำลองขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ขอตตักโฟโตไดโอด.....55
4.11	ภาพถ่ายโคอะเฟรมฟิล์มเพชรที่เกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอนด้วยสารละลาย EPD .....58
4.12	ภาพถ่ายอุปกรณ์ขอตตักโฟโตไดโอดที่สร้างได้.....59
5.1	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้าแผ่นซิลิคอนขัดด้วยครีมเพชร....60
5.2	แผนภาพโคอะเฟรมของระบบเครื่องสร้างฟิล์มเพชร.....61
5.3	ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ (ขนาด $1.2 \times 1.5 \text{ cm}^2$ ).....63
5.4	ภาพถ่ายฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและเอ็กทรีนซิกด้วยเครื่อง SEM.....64
5.5	ภาพถ่ายตัดขวางฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง SEM.....64
5.6	สเปกตรัมรามานของฟิล์มเพชร.....65
5.7	ภาพจำลองโครงสร้างอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์.....66
5.8	แผนภาพการต่อชุดเครื่องมือวัดทางแสง .....67
5.9	แผนภาพแสดงการต่อวงจรวัดอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์.....67
5.10	สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก.....68
5.11	สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชรชนิดเอ็กทรีนซิก.....69
5.12	แผนภาพจำลองแถบพลังงาน โลคอลลไลซ์สเตรต.....70
5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตกับค่าแรงดันไบแอส.....71
5.14	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าโฟโต และกระแสไฟฟ้ามืด กับปริมาณความเข้มข้นอะตอมสารเจือโบรอน .....73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและปริมาณกระแสไฟฟ้ามีดกับระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์.....74
5.16	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างขั้วกับช่วงเวลาขาขึ้นของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและเอ็กทรีนซิก.....75
5.17	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตกับระยะเวลาตอบสนองของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก.....76
5.18	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตกับระยะเวลาตอบสนองของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดเอ็กทรีนซิก (B/C 100 ppm).....76
5.19	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงกับปริมาณอะดอมสารเจือโบรอน.....77
5.20	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงกับแรงดันไบแอส.....78
5.21	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้าโฟโต.....79
5.22	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้ามีด.....79
5.23	การต่ออุปกรณ์เพื่อวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ.....81
5.24	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm .....82
5.25	ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิดต่างๆ.....84
5.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบแอสของชอตต์กีไดโอดสร้างจากฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm.....85
5.27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบแอสของชอตต์กีไดโอดสร้างจากฟิล์มเพชรชนิด 100 ppm .....86
5.28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบแอสของชอตต์กีไดโอดสร้างจากฟิล์มเพชรชนิด 1000 ppm .....86
5.29	การต่ออุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดเพื่อศึกษาคุณลักษณะทางแสงต่างๆ .....88
5.30	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างจากฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm เมื่อได้รับการฉายด้วยแสงที่ความเข้มแสงต่างกัน.....88
5.31	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของชอตต์กีโฟโตไดโอดเมื่อถูกฉายด้วยแสง.....89
5.32	สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอด.....90

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.33	สเปกตรัมการตอบสนองของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์และชอตต์กีโฟโตไดโอด สร้างบนฟิล์มเพชร.....91
5.34	แผนภาพการต่อวงจรวัดผลการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอด .....92
5.35	ผลการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรเติม อะตอมสารเจือโบรอนปริมาณต่างๆ.....93
5.36	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้น เวลาขาลง และแบนด์วิดท์ ของชอตต์กีโฟโตไดโอดกับอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอน.....94
5.37	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้น เวลาขาลง และแบนด์วิดท์กับความหนาฟิล์มเพชร.....95
5.38	แบบจำลองโครงสร้างชอตต์กีโฟโตไดโอดที่เปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชร.....96
5.39	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มเพชรกับกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแส ไฟฟ้ามืด.....97
5.40	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้น เวลาขาลง และแบนด์วิดท์กับพื้นที่รอยต่อ ของชอตต์กีโฟโตไดโอด.....98
5.41	ภาพจำลองโครงสร้างชอตต์กีโฟโตไดโอดเมื่อเพิ่มแรงดันไบแอส.....99
5.42	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้น เวลาขาลง และแบนด์วิดท์ของชอตต์กีโฟโตไดโอด กับแรงดันไบแอส.....100
5.43	สเปกตรัมการตอบสนองของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น.....103
5.44	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างบน ฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm เมื่อปิดแสงและฉายแสงที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 150 °C ....104
5.45	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืด กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก.....105
5.46	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืด กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm.....105
5.47	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืด กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 100 ppm.....106
5.48	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืด กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 1000 ppm .....106

# สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\epsilon$	ค่าเพอิมิตติวิตี (permittivity)
$\epsilon_0$	ค่าเพอิมิตติวิตีของสุญญากาศ (permittivity of vacuum)
$\epsilon_s$	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสารกึ่งตัวนำ (dielectric constant of semiconductor)
$\theta$	มุม (angle)
$\chi$	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity)
$\lambda$	ความยาวคลื่นของแสง (wavelength of light)
$\mu$	ความคล่องตัวของพาหะ (mobility)
$\mu_e$	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (electron mobility)
$\mu_h$	ความคล่องตัวของโฮล (hole mobility)
$\nu$	ความถี่ของแสง (frequency of light)
$\rho$	สภาพความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity)
$\sigma_0$	สภาพนำไฟฟ้า (conductivity)
$\sigma_D$	สภาพนำไฟฟ้ามืด (dark conductivity)
$\sigma_p$	สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง (photoconductivity)
$\tau$	เวลาอายุพาหะ (lifetime)
$\phi$	ฟังก์ชันงาน (work function)
$\omega$	ความถี่เชิงมุม (angular frequency)
$B$	แบนด์วิดท์ (band width)
$C$	ความจุไฟฟ้า (capacitance)
$C_j$	ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (junction capacitance)
$E_A$	ระดับพลังงานแอกเซปเตอร์ (acceptor level)
$E_C$	ระดับคอนดักชัน (conduction level)
$E_D$	ระดับพลังงานโดเนอร์ (donor level)
$E_f$	ระดับพลังงานเฟอร์มิ (fermi level)
$E_g$	ช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และขึ้นอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$E_V$	ระดับเวเลนซ์ (valence level)
$f$	ความถี่ (frequency)
$I$	กระแสไฟฟ้า (current)
$I_d$	กระแสไฟฟ้ามืด (dark current)
$I_L$	กระแสไฟฟ้าฉายแสง (light current)
$I_p$	กระแสไฟฟ้าโฟโต (photocurrent)
$i_s$	สัญญาณรบกวนชนิดช็อต (shot noise)
$I_{sc}$	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตลัดวงจร (short circuit output current)
$m^*$	มวลประสิทธิผล (effective mass)
$N_A$	ความหนาแน่นของแอคเซ็ปเตอร์ (acceptor density)
$N_v$	ความหนาแน่นประสิทธิผลของสเตตของโฮล (effective density of states of holes)
$q$	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (electronic charge)
$V_{bi}$	ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in voltage)
$V_{oc}$	แรงดันเอาต์พุตวงจรเปิด (open circuit voltage)

## คำนำ

ปัจจุบันฟิล์มเพชรเป็นที่รู้จักแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ ทั้งด้านกายภาพ ไฟฟ้า และแสง ดังนั้นจึงทำให้นักวิจัยให้ความสนใจในการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาทั้งในด้านวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรและการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยได้ให้ความสนใจเป็นพิเศษกับคุณสมบัติการมีช่องว่างแถบพลังงานกว้างของฟิล์มเพชร(5.5 eV) ซึ่งเหมาะกับการนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงความยาวคลื่นสั้น

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ณ. ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์เริ่มขึ้นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2535 โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยระบบ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ แต่พื้นที่ฟิล์มเพชรที่สร้างได้นั้นมีขนาดเล็ก ( $4 \times 4 \text{ mm}^2$ ) จึงเป็นการยุ่งยากเมื่อนำเข้าสู่กระบวนการของลิโทกราฟี หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาทั้งวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรและการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรเรื่อยมา ปัจจุบันฟิล์มเพชรสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ (150 ทอร์) ซึ่งจะได้ฟิล์มเพชรที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอและมีพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น ( $12 \times 15 \text{ mm}^2$ ) ทำให้สามารถนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปเข้ากระบวนการสร้างปกคิของซิลิคอนได้ เนื่องจากศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มีศักยภาพเพียงพอในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบนฐานรองซิลิคอนอยู่แล้ว ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่จะปรับกระบวนการสร้างให้เหมาะสมกับการสร้างอุปกรณ์จากฟิล์มเพชร

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากขอตดักโคโอดฟิล์มเพชร” โดยงานวิจัยจะศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มเพชร นอกจากนี้ยังพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่สร้างบนฟิล์มเพชร โดยเริ่มจากโครงสร้างอย่างง่ายแบบโพโคคอนดักเตอร์ ต่อจากนั้นจึงพัฒนาเป็นโครงสร้างแบบขอตดักโคโอด ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพการทำงานดียิ่งขึ้น รายละเอียดขั้นตอนการวิจัยสามารถสรุปได้เป็นบทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำกล่าวถึงความจำเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับฟิล์มเพชร ทฤษฎีรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของแสง พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ และทฤษฎีอุปกรณ์ตรวจวัดแสง

บทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรและเครื่องมือการวัดคุณสมบัติทางแสง

บทที่ 4 การออกแบบและขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง

บทที่ 5 วิธีการทดลองและผลการทดลอง โดยแบ่งเป็นสามส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนแรกเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ เช่น การพิสูจน์ความเป็นฟิล์มเพชรด้วยกราฟ

สเปกตรัมรามาน หรือการศึกษาลักษณะโครงสร้างของฟิล์มเพชรจากภาพถ่ายSEM ส่วนที่สองเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสงต่างๆของฟิล์มเพชรศึกษาโดยนำฟิล์มเพชรมาสร้างเป็นโครงสร้างแบบโฟโตนิกคอกเตอร์และสุดท้ายส่วนที่สามเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางแสงและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์แบบชอตต์กีโฟโตไดโอด

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ **XVI** อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

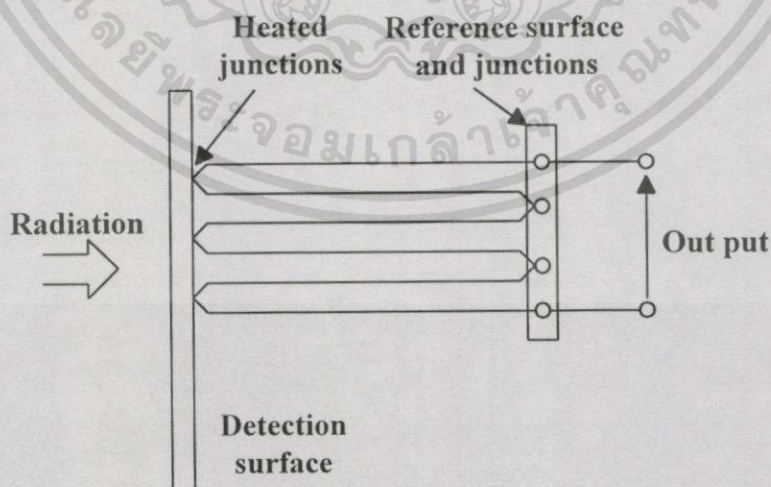
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

การนำแสงไปประยุกต์ใช้งานให้มีประสิทธิภาพนั้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดแสงนับเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดแสงเป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาคุณสมบัติของแสงที่จะนำไปใช้งาน เช่น ความยาวคลื่นของแสง ปริมาณความเข้มแสง เป็นต้น

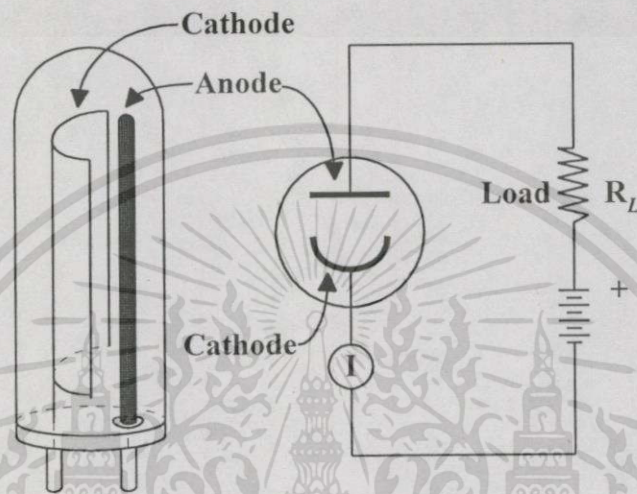
อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (optical detector) ถูกนำมาใช้งานเป็นเวลาประมาณ 2 ศตวรรษมาแล้ว โดยเริ่มแรกนักดาราศาสตร์ชื่อ Sir William Herschel เป็นคนแรกที่มีการใช้เทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดการแยกของสเปกตรัมแสงอินฟราเรดในปี ค.ศ. 1800 เพื่อศึกษาสเปกตรัมแสงที่ออกมาจากดวงอาทิตย์[1] หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแสงเรื่อยมาโดยในระยะเริ่มแรกอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ใช้กันส่วนใหญ่จะเป็นแบบตรวจวัดรังสีความร้อน(thermal detector) คือ การดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบตรวจวัดรังสีความร้อนชนิดเทอร์โมไฟล์ ดังนั้นการตอบสนองของอุปกรณ์ประเภทนี้ความสำคัญจึงอยู่ที่การดูดกลืนที่ผิวของวัสดุที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ ต่อมาได้มีการพัฒนามาเป็นอุปกรณ์แบบควอนตัมดีเทคเตอร์ (quantum detector) คือ การดูดกลืนโฟตอนแล้วทำให้เกิดประจุพาหะ โดยสามารถแบ่งประเภทของควอนตัมดีเทคเตอร์ได้เป็น 3 แบบ คือ โฟโตอิมิชัน(photoemission) โฟโตคอนดักทีฟ(photoconductive) และ โฟโตโวลตาอิก(photovoltaic)



รูปที่ 1.1 อุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดเทอร์โมไฟล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแรก โฟโตอิมิชัน ดีเทกเตอร์ (photoemission detector) จะดูดกลืนโฟตอนและทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ซึ่งจะหลุดออกจากผิวของวัสดุแล้ววิ่งไปที่ขั้วโลหะ โดยทั่วไปอุปกรณ์จะอยู่ในรูปของหลอดสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 อุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบโฟโตอิมิชัน

แบบที่สอง โฟโตคอนดักทีฟ ดีเทกเตอร์ (photoconductive detector) ประจุพาหะอิสระที่เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานโฟตอนจากแสงจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ของสารกึ่งตัวนำ และแบบที่สาม โฟโตโวลตาอิก ดีเทกเตอร์ (photovoltaic detector) ประกอบด้วยรอยต่อของสารกึ่งตัวนำกับโลหะหรือกับสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้าม โดยประจุพาหะที่เกิดจากแสงในบริเวณปลอดพาหะจะถูกพัดด้วยสนามไฟฟ้าภายในไปยังขั้วโลหะทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหล รายละเอียดของอุปกรณ์แบบโฟโตคอนดักทีฟ และ โฟโตโวลตาอิก จะกล่าวถึงในบทต่อไป

อุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ดีควรมีการตอบสนองที่ดีกับความยาวคลื่นแสงช่วงที่ใช้งานและมีสัญญาณรบกวนต่ำ อุปกรณ์ควรมีการทำงานที่เร็ว และใช้พลังงานน้อย โดยการทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดแสงมีคุณสมบัติดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญสองประการคือวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์และการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์

ฟิล์มเพชรเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำอยู่ในหมู่ 4 ของตารางธาตุเช่นเดียวกับซิลิคอน ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เช่นเดียวกับซิลิคอนเช่นกัน นอกจากนี้ฟิล์มเพชรยังมีคุณสมบัติบางด้านที่พิเศษกว่าซิลิคอน เช่นมีความคล่องตัวของประจุพาหะสูง มีความทนทานต่อการกัดของสารเคมี มีความนำความร้อนสูง มีความกว้างช่องว่างแถบพลังงานมาก และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ เป็นต้น ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงเป็นวัสดุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหม่ที่น่าสนใจในการพัฒนาเพื่อนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้ให้ความสนใจเป็นพิเศษกับคุณสมบัติการมีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง (5.5 eV) ซึ่งเหมาะกับการนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงความยาวคลื่นสั้นย่านแสงอัลตราไวโอเล็ตซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ถูกรบกวนจากความยาวคลื่นแสงช่วงตามองเห็นต่ำ

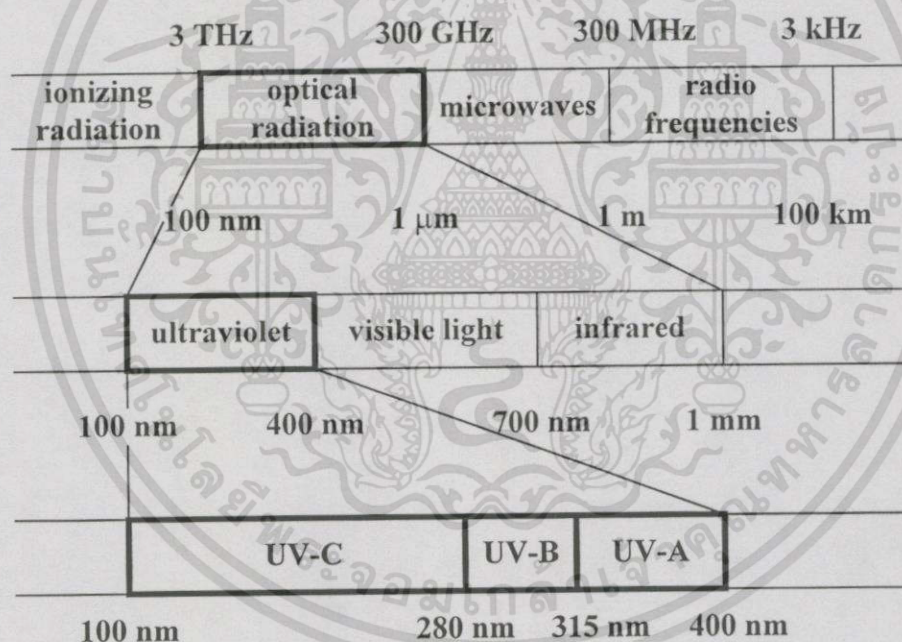
แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100 นาโนเมตรจนถึง 400 นาโนเมตร โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

UV-C อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 100-280 นาโนเมตร

UV-B อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 280-315 นาโนเมตร

UV-A อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร [2]

แผนผังสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ตแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แผนผังสเปกตรัมแสงอัลตราไวโอเล็ต

แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีชนิดหนึ่งที่เกิดจากดวงอาทิตย์ แต่สำหรับผิวโลกรังสีอัลตราไวโอเล็ตตั้งแต่ช่วง UV-B ลงมาจะไม่สามารถผ่านชั้นบรรยากาศลงมายังพื้นโลกได้เนื่องจากการดูดกลืนโดยชั้นออกซิเจน โอโซน และก๊าซอื่นๆในชั้นบรรยากาศ แต่ในปัจจุบันสาร CFCs (chlorofluoro carbons) และก๊าซบางชนิดที่ถูกปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศซึ่งมีผลกระทบต่อชั้นโอโซนของโลกทำให้เกิดรู(hole)ในชั้นบรรยากาศ เป็นเหตุให้แสงอัลตราไวโอเล็ตช่วง UV-B บางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเริ่มทะลุผ่านชั้นบรรยากาศลงมาได้ ทำให้เกิดผลกระทบอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก ดังนั้น การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้ในการตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตจึงมีความสำคัญในการช่วยศึกษาและหาทางป้องกันปริมาณรังสีที่ผ่านชั้นบรรยากาศโลกลงมาได้ นอกจากอุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีความสำคัญในงานด้านสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังมีประโยชน์ในการใช้งานด้านอื่นๆอีก เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร อุตสาหกรรม และอวกาศ เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

จากหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าประโยชน์ของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตนั้นมีมาก ดังนั้นการพัฒนาเพื่อให้ได้อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงจึงมีความสำคัญเช่นกัน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนานำฟิล์มเพชรมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมีการปรับปรุงโครงสร้างของอุปกรณ์เพื่อให้ได้ตัวตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูง ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยสร้างเป็นโครงสร้างแบบโฟโตคอนดักเตอร์เพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางแสงของฟิล์มเพชรและศึกษาผลของการเติมอะตอมสารเจือปนที่มีต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชร และทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบโฟโตคอนดักเตอร์ จากนั้นจึงปรับปรุงโครงสร้างของอุปกรณ์โดยใช้โครงสร้างแบบชอตต์กีโฟโตไดโอด เพื่อให้ได้อุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่มีคุณสมบัติการตอบสนองและความเร็วในการทำงานดียิ่งขึ้น

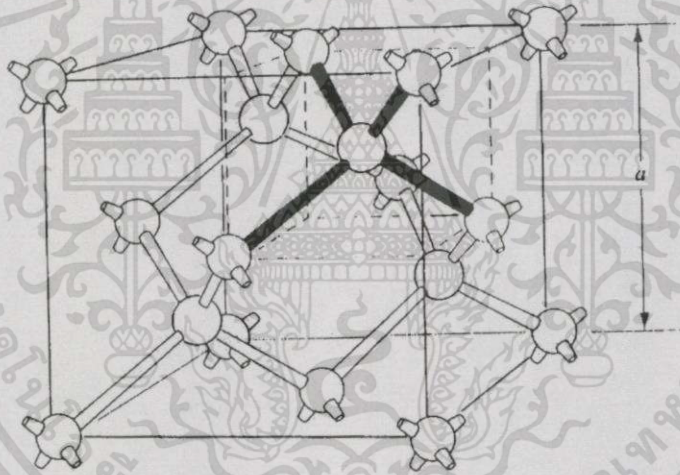
## บทที่ 2

## ทฤษฎี

### 2.1 ฟิสิกส์เพชร

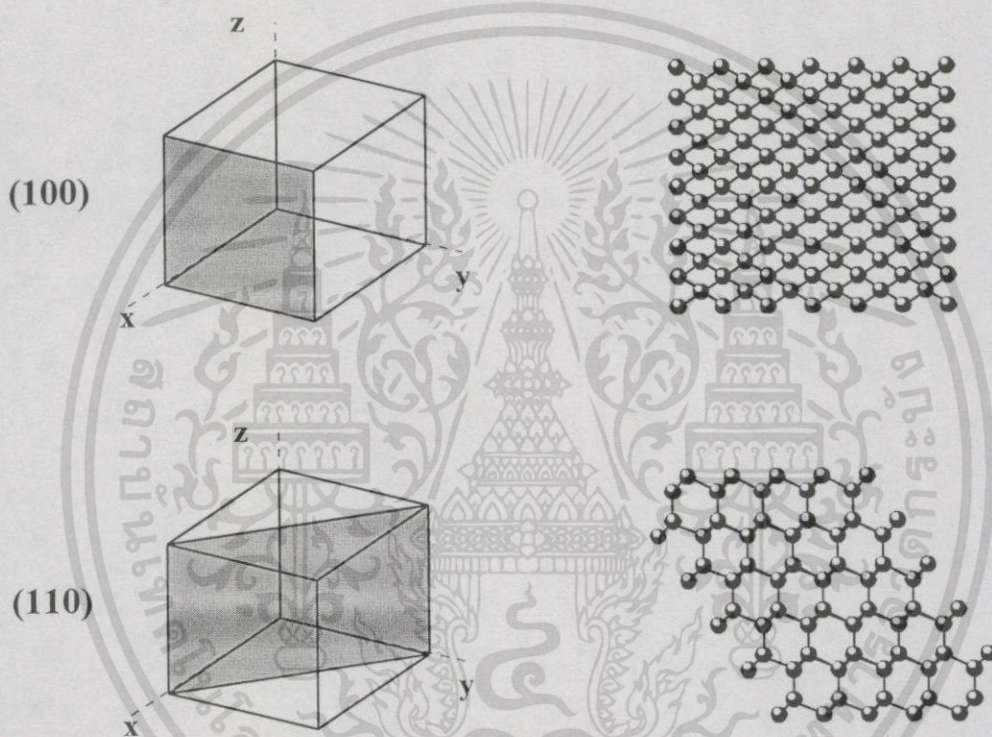
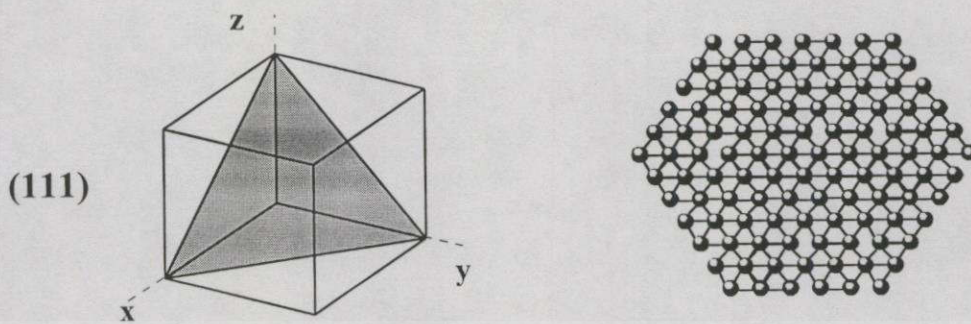
#### 2.1.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร [3]

โครงสร้างของผลึกเพชรมีลักษณะเป็นแบบ face center cubic โดยที่อะตอมคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยในหนึ่งยูนิตเซลล์ (unit cell) จะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 8 อะตอม ซึ่งมีลักษณะการยึดเหนี่ยวกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ 1/8 ของอะตอมอยู่บริเวณมุมทั้งแปด อีก 1/2 อะตอมอยู่ที่แต่ละหน้าของยูนิตเซลล์ ส่วนอีก 4 อะตอมที่เหลือจะฝังตัวอยู่ในยูนิตเซลล์



รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างผลึกเพชร

เมื่อพิจารณาระนาบของผลึกเพชรสามารถเกิดการเรียงตัวได้หลายระนาบ เช่น ระนาบ (111) จะมีลักษณะเหมือนอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเรียงตัวเป็นสามเหลี่ยมซ้อนกัน ระนาบ (100) ลักษณะเหมือนอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันจะเรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ ระนาบ (110) อะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันจะเรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตัวอย่างระนาบของเพชรแบบต่างๆแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระนาบต่างๆของเพชร

### 2.1.2 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

เพชรมีคุณสมบัติที่พิเศษกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และทางแสง เป็นต้น โดยถ้าพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ เนื่องจากเพชรมีการยึดเหนี่ยวของอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะเคมีที่มีความแข็งแรง จึงทำให้เพชรมีความแข็งสูง นอกจากนี้ยังมีความทนต่อการกัดของสารเคมีและมีความนำความร้อนสูงด้วย ในด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าค่าความคล่องตัวของประจุพาหะโฮลและอิเล็กตรอนมีค่าสูง และเพชรยังมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำทำให้สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง ส่วนคุณสมบัติทางแสงนั้นเพชรมีความกว้างช่องว่างแถบพลังงานสูงจึงมีความเหมาะสมในการนำมาสร้างเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจวัดแสงความยาวคลื่นสั้น ซึ่งจะทำให้การรบกวนจากแสงช่วงตามองเห็นต่ำ ในตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ [3]

คุณสมบัติ	เพชร	ซิลิคอน	แกเลียมอาร์เซไนด์	เยอรมันเนียม
Thermal conductivity (W/cm-k)	20	1.5	0.455	0.28
Electron mobility (cm <sup>2</sup> /V-s)	2,000	1,500	8,800	3,900
Hole mobility (cm <sup>2</sup> /V-s)	1,800	600	400	1,900
Electron saturated velocity (cm/s)	2.7x10 <sup>7</sup>	1x10 <sup>7</sup>	1.2x10 <sup>7</sup>	5x10 <sup>6</sup>
Hole saturated velocity (cm/s)	1.05x10 <sup>7</sup>	9x10 <sup>6</sup>	1x10 <sup>7</sup>	4x10 <sup>6</sup>
Density of states effective mass				
Electron	0.57	1.1	0.068	0.55
Hole	1.2	0.8	0.5	0.37
Effective density of states				
Conduction band (cm <sup>-3</sup> )	1x10 <sup>19</sup>	2.8x10 <sup>19</sup>	4.7x10 <sup>17</sup>	1.04x10 <sup>19</sup>
Valence band (cm <sup>-3</sup> )	3x10 <sup>19</sup>	1x10 <sup>19</sup>	7x10 <sup>18</sup>	6.0x10 <sup>18</sup>
Breakdown field (V/cm)	10 <sup>7</sup>	5x10 <sup>6</sup>	3x10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>
Resistivity (Ω.cm)	10 <sup>16</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>8</sup>	10
Dielectric constant (ε)	5.7	11	12.5	15.8
Energy gap (eV)	5.45	1.1	1.42	0.72

### 2.1.3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ปัจจุบันการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น สังเคราะห์ด้วยระบบ CVD แบบหลอดความร้อน(Hot-Filament CVD) , แบบคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Plasma CVD), แบบ ดีซี พลาสมา (DC Plasma CVD) และ แบบคลื่นความถี่ (RF Plasma CVD) เป็นต้น[4] โดยในที่นี้จะกล่าวรายละเอียดเฉพาะวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบหลอดความร้อน ซึ่งไดอะแกรมระบบ CVD แสดงในรูปที่ 2.3 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรมีดังนี้

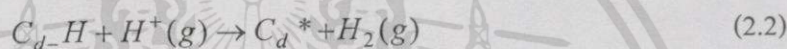
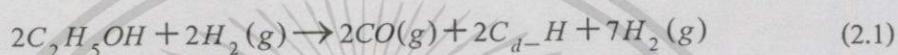
#### 1. ในระบบต้องมีอะตอมคาร์บอน

เนื่องจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะใช้อะตอมคาร์บอนเป็นปัจจัยในการเกิดผลึกเพชร โดยสามารถใช้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนหรือแอลกอฮอล์เป็นแหล่งจ่ายอะตอมคาร์บอน ซึ่งนอกจากจะ

ได้อะตอมคาร์บอนแล้ว ในส่วนของก๊าซไฮโดรเจนยังมีส่วนสำคัญในการกำจัดกราฟิต์ ซึ่งปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและอนุโมลคาร์บอนที่เหมาะสมจะทำให้การเกิดของเพชรมีคุณภาพดี

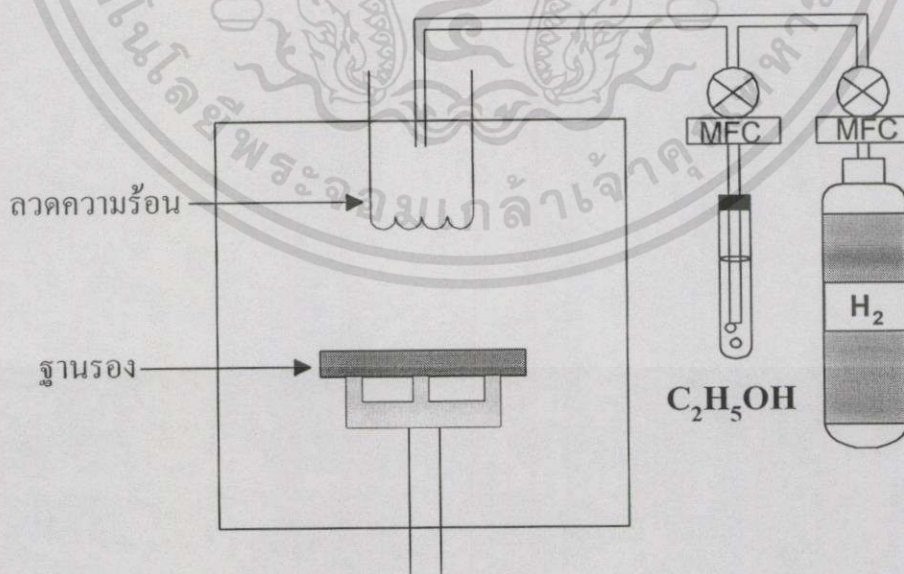
## 2. การกระตุ้นก๊าซให้เกิดอนุโมลคาร์บอน

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยระบบ CVD แบบลวดความร้อน การกระตุ้นก๊าซเฟสเพื่อให้แยกอะตอมของคาร์บอนออกมานับว่าเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์ม โดยเราจะใช้ความร้อนจากลวดความร้อนทั้งสแตนเป็นตัวกระตุ้นให้อะตอมคาร์บอนแยกตัวออกจากอะตอมอื่น แล้วก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรบนฐานรองที่เตรียมไว้ สมการเคมีแสดงการแตกตัวของก๊าซแสดงในสมการที่ (2.1) ถึง (2.2)



## 3. อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม

พิจารณาจากรูปที่ 2.3 อุณหภูมิของฐานรอง นั้นเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากลวดความร้อนไปยังฐานรอง ดังนั้นระยะห่างระหว่างไส้ลวดความร้อนกับฐานรองจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของฐานรอง ซึ่งอุณหภูมิของฐานรองจะมีผลสำคัญในการกำหนดรูปผลึกของฟิล์มเพชร

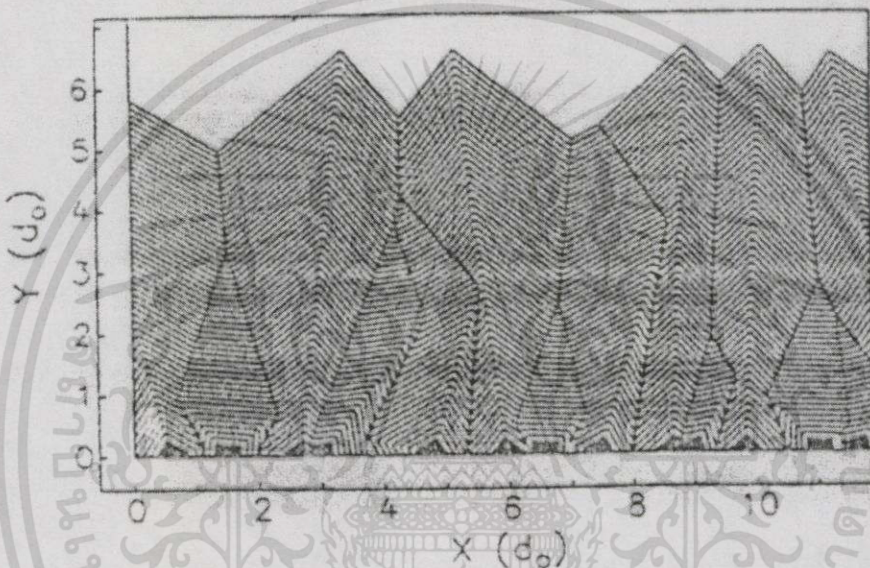


รูปที่ 2.3 ภาพไดอะแกรมระบบ CVD แบบลวดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฐานรอง (substrate) มีความสำคัญมากต่อการเกิดนิวเคลียสของเพชร โดยสามารถเลือกฐานรองได้หลายชนิด เช่น ซิลิคอน อลูมินา โมลิบดีนัม เป็นต้น โดยทั่วไปมักนิยมใช้ซิลิคอนนำมาขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรให้มีลักษณะเป็นเส้นรอยขีดข่วนทั้งนี้เพื่อช่วยต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชร ฟิล์มเพชรจะเริ่มต้นเกิดที่รอยขีดข่วนก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ รูปที่ 2.4 แสดงภาพจำลองการก่อตัวของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ [5]



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองการก่อตัวของผลึกเพชรที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์

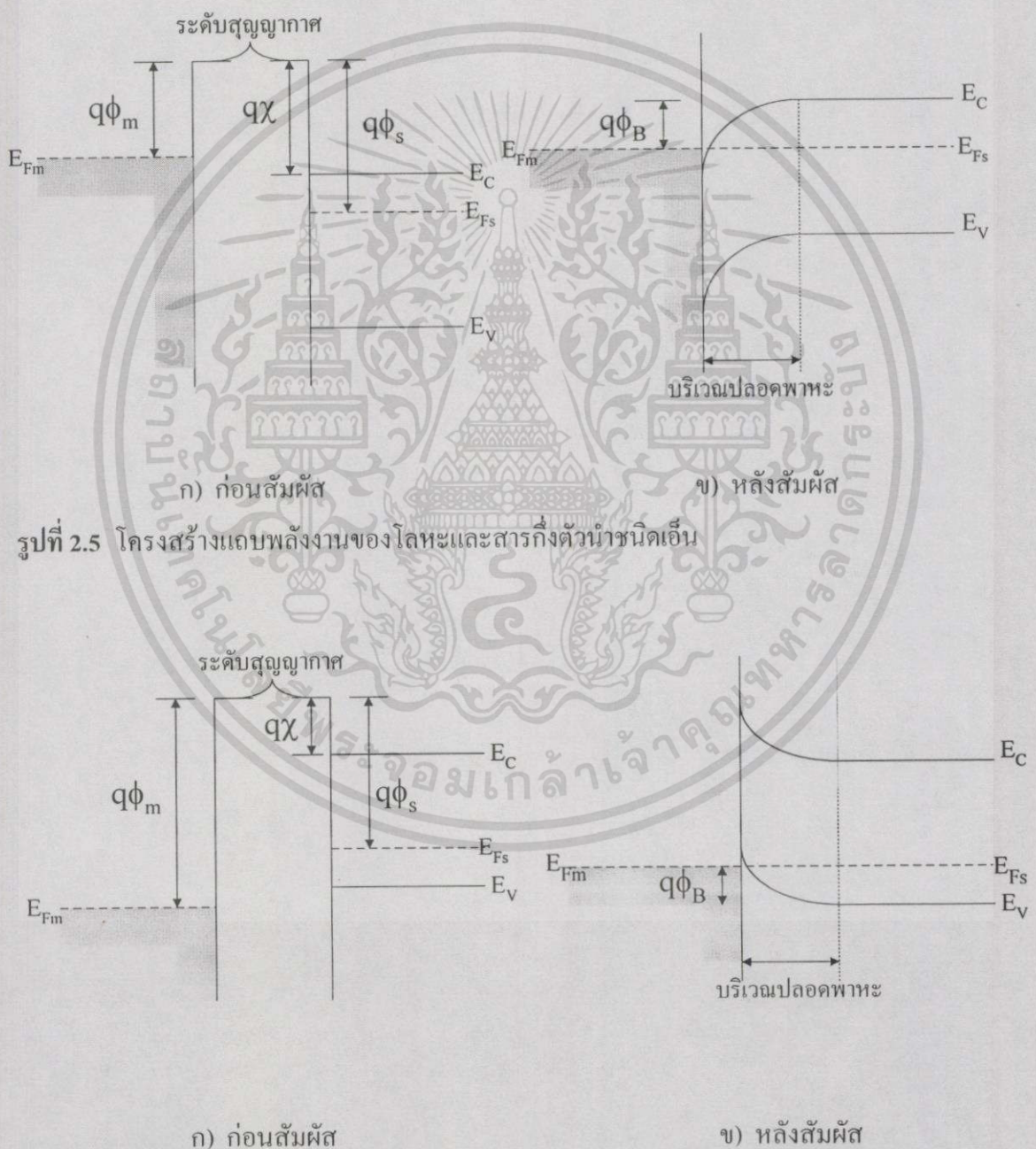
#### 2.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ในการนำอุปกรณ์ประเภทโซลิดสเตตไปใช้งานการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำนับว่ามีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์โซลิดสเตตสู่โลกภายนอก ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแบ่งได้เป็นสองชนิด คือแบบเรกติไฟร์และแบบโอห์มมิก โดยจะอธิบายโดยใช้โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน ซึ่งการที่รอยสัมผัสจะมีลักษณะเป็นแบบเรกติไฟร์หรือโอห์มมิกนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าฟังก์ชันงาน(work function) ของโลหะและค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี(electron affinity)ของสารกึ่งตัวนำ และในหัวข้อถัดไปจะอธิบายถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าในรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 รอยต่อแบบโอห์มมิก

เมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติมีค่าความนำสูงโดยสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ทั้ง 2 ทิศทางเราเรียกรอยต่อแบบนี้ว่ารอยต่อโอห์มมิก (ohmic contact) โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งก่อนนำมาสัมผัสและหลังนำมาสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.5 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และในรูปที่ 2.6 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

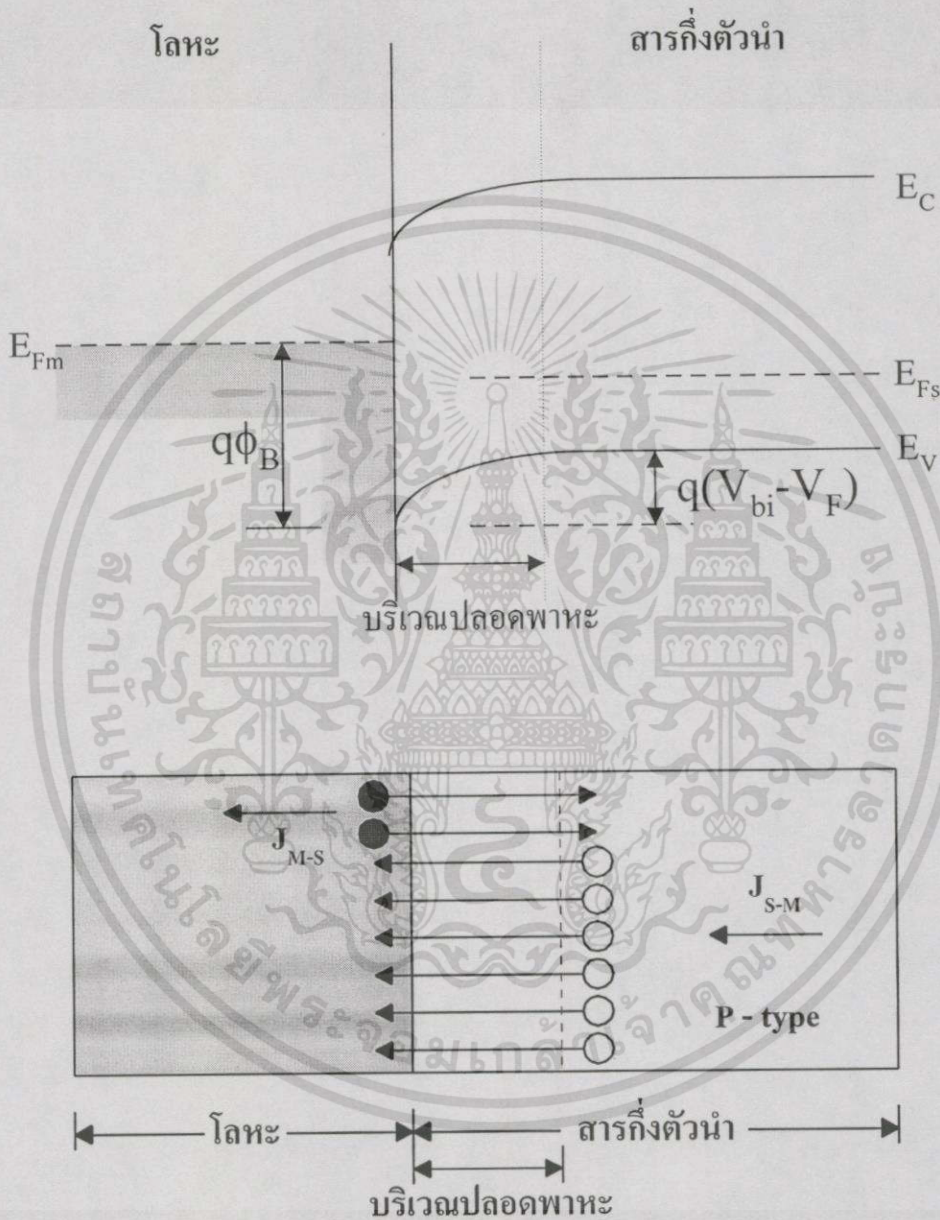
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. รับผิดชอบการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยค่าฟังก์ชันงานของโลหะ  $\phi_m$  มีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น  $\phi_s$  เมื่อเรานำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกัน จะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองชนิดจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยระดับเฟอร์มิ (fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะอยู่ระดับเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลผ่านรอยต่อเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอ็อนบวกขึ้นทางด้านโลหะและทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อขึ้น โดยการไหลของอิเล็กตรอนจะหยุดลงเมื่อสนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงพอที่จะทำให้สามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้และเป็นสภาวะสมดุล ดังนั้นจะทำให้เกิดการสะสมของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณรอยต่อ โดยถ้าสังเกตจากรูปที่ 2.5 จะไม่มีกำแพงศักย์กั้นอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ กล่าวคืออิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ทั้งสองทิศทาง และในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มี  $\phi_s < \phi_m$  ก็เกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

### 2.2.2 รอยต่อแบบชอตต์กี

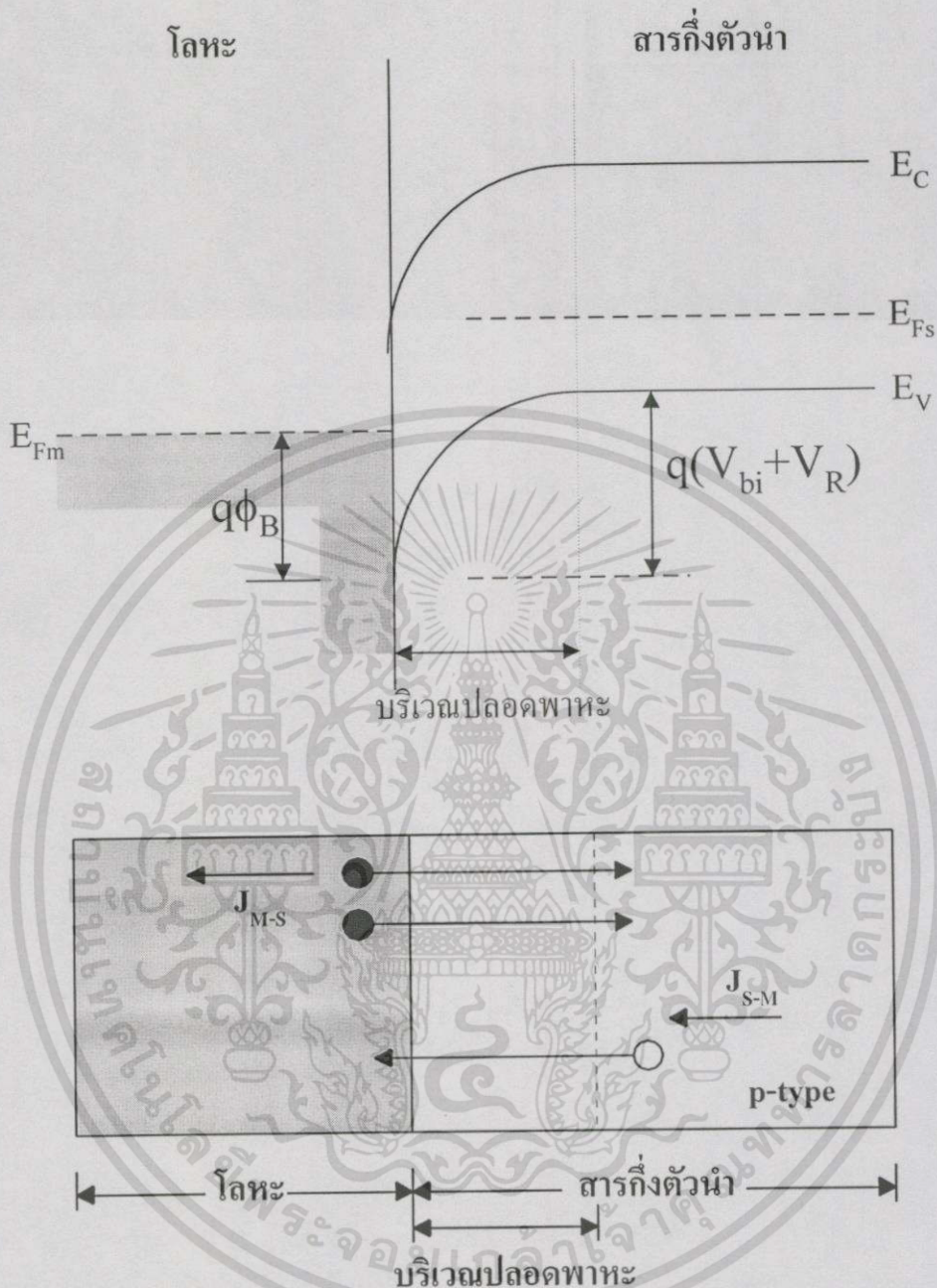
เมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว เราเรียกรอยต่อแบบนี้ว่ารอยต่อชอตต์กี (schottky contact) พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ  $\phi_m$  มีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น  $\phi_s$  เมื่อเรานำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกัน จะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองชนิดจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองชนิดจะอยู่ระดับเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อเข้าไปด้านโลหะจึงทำให้เกิดมีอ็อนบวกเกิดขึ้นที่สารกึ่งตัวนำและเกิดมีประจุลบขึ้นทางด้านโลหะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดเป็นกำแพงศักย์กั้นจนไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนคืออยู่ในสภาวะสมดุล ส่วนในสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็อธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์เดียวกัน และเมื่อนำโลหะกับสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะมีการถ่ายเทประจุพาหะจนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุล คือไม่มีการเคลื่อนที่ของประจุพาหะดังนั้นจึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล แต่เมื่อให้ไบแอสแรงดันให้แก่รอยต่อจะมีผลให้โวลที่เคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แต่สำหรับกำแพงศักย์ที่กั้นอิเล็กตรอนที่ไหลจากด้านโลหะไปสารกึ่งตัวนำ  $q\phi_B$  จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อให้ไบแอสไปข้างหน้า (forward bias) กับรอยต่อจะทำให้ค่า  $V_{bi}$  ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) ลดต่ำลงและถ้าแรงดันไบแอสมีค่ามากพอ ( $V_F \geq V_{bi}$ ) ก็จะทำให้ประจุพาหะโวลสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไปยังโลหะได้ ในทางตรงข้ามถ้าให้ไบแอสย้อนกลับ (reverse bias) แก่รอยต่อก็จะทำให้ระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นโวลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนใหญ่ในสารกึ่งตัวนำจะถูกขัดขวางด้วยกำแพงศักย์ที่มากขึ้นทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อไปยังด้านโลหะได้

แบบจำลองโครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับการไบแอสไปข้างหน้าและไบแอสย้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบแอสแรงดันไปข้างหน้า (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์บวกและโลหะให้ศักย์ลบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบแอสแรงดันย้อนกลับ (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์ลบและโลหะให้ศักย์บวก)

### 2.2.2.1 การไหลของกระแสไฟฟ้าในรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

การไหลของกระแสไฟฟ้าในรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบขอตัดก็ เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมาก (majority carriers) โดยมีทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรม การไหลของกระแสในรอยต่อแบบขอตัดก็อยู่หลายทฤษฎี แต่ในหัวข้อนี้จะกล่าวเฉพาะทฤษฎีที่ นิยมใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งมีอยู่ 2 ทฤษฎี [6] คือ ทฤษฎีเทอโมอิเล็กทริก (thermionic emission

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

theory) คิด โดย Bethe และทฤษฎีดิฟฟิวชัน (diffusion theory) คิด โดย Schottky โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### ทฤษฎีเทอโมอิเล็กทริก (thermionic emission theory)

ความหนาแน่นของกระแส (current density)  $J_{s \rightarrow m}$  ที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.3)$$

ความหนาแน่นของกระแส (current density)  $J_{m \rightarrow s}$  ที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.4)$$

ความหนาแน่นกระแสรวมหาได้จากการรวมสมการที่ (2.3) และสมการ (2.4) ซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นกระแสรวมดังนี้

$$\begin{aligned} J &= \left\{ A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right\} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \\ &= J_{ST} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$J_{ST} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.6)$$

โดยที่  $A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$  คือ ค่าคงที่ของริชาร์ดสัน (Richardson constant)

$J_{ST}$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิ่มตัว (saturation current density)

### ทฤษฎีดิฟฟิวชัน (diffusion theory)

สมการความหนาแน่นกระแสตามแบบทฤษฎีดิฟฟิวชัน แสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = \left\{ q^2 D_p N_V \left[ \frac{q(V_{bi} - V) 8\pi N_A}{\epsilon_s} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right\} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$= J_{SD} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

โดยที่

$J_{SD}$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิ่มตัว (saturation current density)

$D_p$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล (diffusion coefficient of holes)

$N_V$  คือ ความหนาแน่นประสิทธิผลของสถานะของโฮล (effective density of states of holes)

### 2.2.3.2 ความจุไฟฟ้าของรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับค่าไบแอสแรงดันย้อนกลับ โดยถ้าเราให้สารกึ่งตัวนำชนิดพีมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือ  $N_A$  มีพื้นที่รอยต่อ  $A$  ให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ  $V_R$  จะเกิดบริเวณปลอดพาหะกว้าง  $W$  ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการ (2.8)

$$C = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 A}{W} \quad (2.8)$$

หรือหาได้จากสมการ (2.9)

$$C = \frac{A}{\sqrt{\frac{2(V_{bi} - V_R)}{qN_A \epsilon_s \epsilon_0}}} \quad (2.9)$$

### 2.2.3.3 ศักย์ไฟฟ้าภายในและค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยต่อขอตักไดโอด

รอยต่อแบบขอตักเกิดจากการนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ โดยที่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ ( $\phi_m$ ) มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_s$ ) เมื่อนำวัสดุทั้งสองมาสัมผัสกันแล้ว จะเกิดการถ่ายเทพริมาณพาหะของวัสดุทั้งสองจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลคือระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกัน โดยเมื่อนำสารกึ่งตัวนำและโลหะมาสัมผัสกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมที่รอยต่อเช่นเดียวกับรอยต่อแบบพีเอ็น ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมรอยต่อ

ขณะอยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนเราเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าภายใน  $V_{bi}$  (built-in voltage) ซึ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำจะต้องเอาชนะเพื่อที่จะข้ามไปยังด้านโลหะ นอกจากนี้บริเวณรอยต่อยังเกิดกำแพงศักย์  $\phi_B$  (barrier height) กันอิเล็กตรอนจากด้านโลหะที่พยายามจะข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำอีกด้วย  $V_0$  คือ ค่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิกับระดับเวเลนซ์(กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี) การหาค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน  $V_{bi}$  และค่าความสูงกำแพงศักย์  $\phi_B$  สามารถคำนวณจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อโดยอาศัยสมการดังนี้

$$\phi_B = V_0 + V_{bi} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_V}{N_A} \quad (2.11)$$

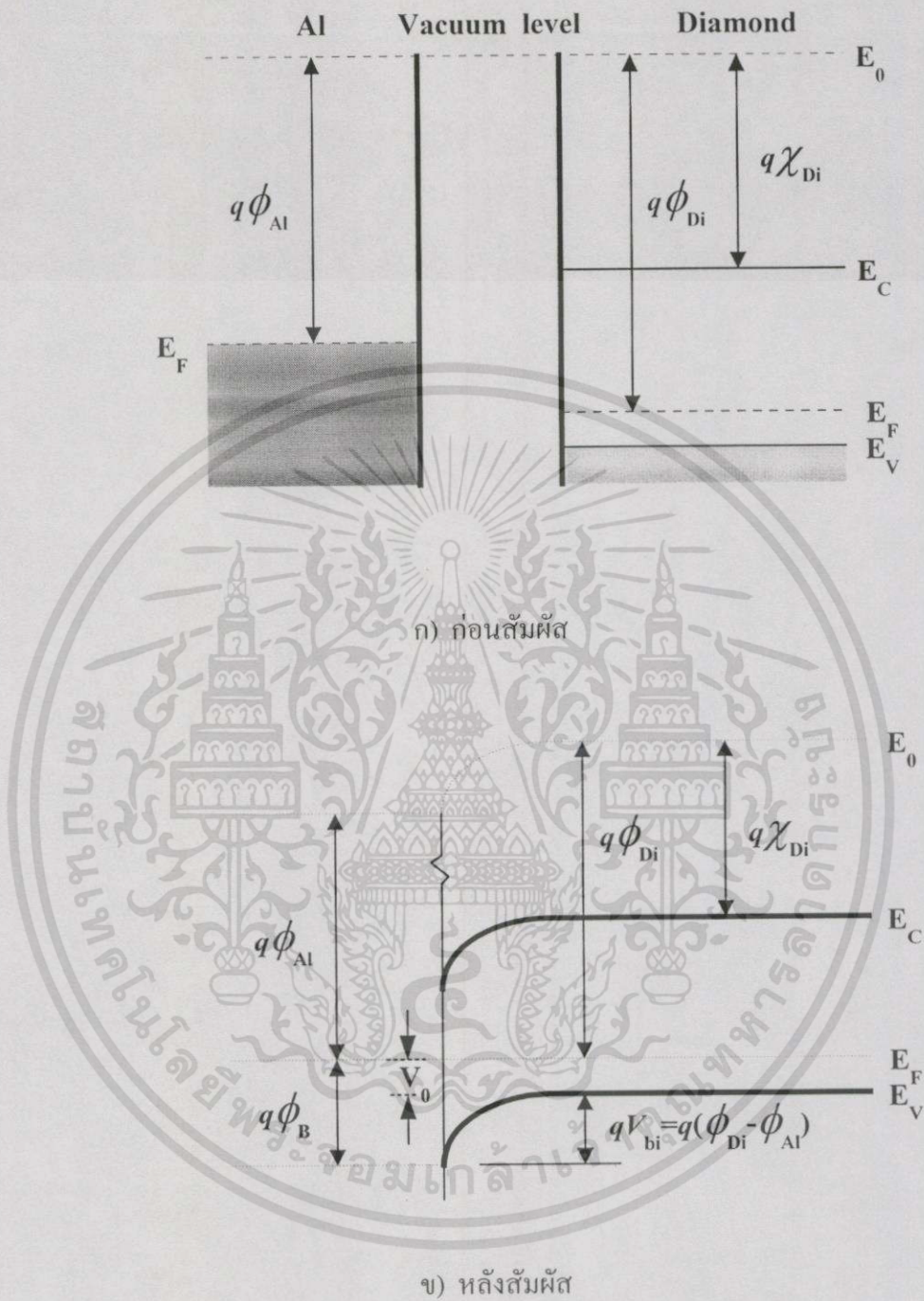
และ

$$N_A = \frac{2}{q\epsilon_s A^2} \left[ \frac{d(I/C^2)}{dV} \right] \quad (2.12)$$

โดยค่า  $\frac{d(I/C^2)}{dV}$  หาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{C^2}$  กับ แรงดันไบเอส  $V$  และค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน  $V_{bi}$  หาได้จากจุดตัดของกราฟกับแกน X

#### 2.2.3.4 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อฟิล์มเพชรกับโลหะออลูมิเนียม

รอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะออลูมิเนียมจัดเป็นรอยต่อแบบชอตต์กี คือ เมื่อนำวัสดุทั้งสองมาสัมผัสกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกที่รอยต่อและยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว แผนภาพโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะออลูมิเนียมทั้งก่อนและหลังสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรและโลหะอลูมิเนียมก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน  
 ก) ก่อนสัมผัส ข) หลังสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือทำซ้ำอย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

แสงและวัสดุมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด เช่น วัสดุสะท้อนแสงได้ วัสดุดูดกลืนแสงได้ วัสดุหักเหแสงได้ วัสดุเปล่งแสงได้ เป็นต้น ดังนั้นการใช้งานของสิ่งประดิษฐ์ทางแสงจึงต้องใช้ปรากฏการณ์ต่างๆเหล่านี้เป็นหลักในการทำงาน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแสงและสารกึ่งตัวนำ เพื่อจะศึกษาพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างแสงกับสารกึ่งตัวนำ

#### 2.3.1 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

การดูดกลืนแสงโดยสารกึ่งตัวนำนับเป็นพื้นฐานสำคัญของการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อสารกึ่งตัวนำดูดกลืนแสงแล้วจะทำให้เกิดประจุพาหะอิสระขึ้นซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานทางแสงให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสงสามารถอธิบายด้วยสมการทางฟิสิกส์ที่พิจารณาว่าโฟตอนฟลักซ์ที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำจะลดลงกับระยะทางที่เข้าไปข้างในสารกึ่งตัวนำ โดยจะลดลงอย่างเอ็กโพเนนเชียลและสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการ

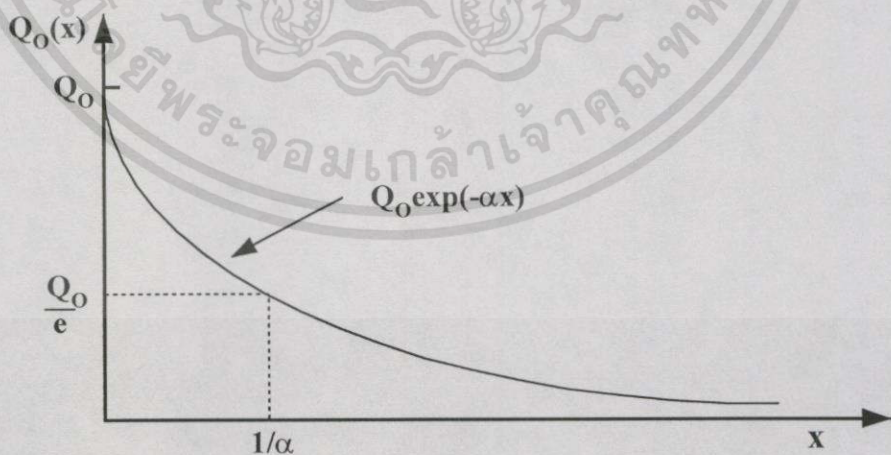
$$Q(x) = Q_0 \exp(-\alpha x) \tag{2.13}$$

โดยที่

$Q(x)$  คือ โฟตอนฟลักซ์ที่ความลึก  $x$  จากผิวสารกึ่งตัวนำ

$Q_0$  คือ โฟตอนฟลักซ์ที่ผ่านผิวสารกึ่งตัวนำเข้าไปด้านใน ( $\text{photon} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ )

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



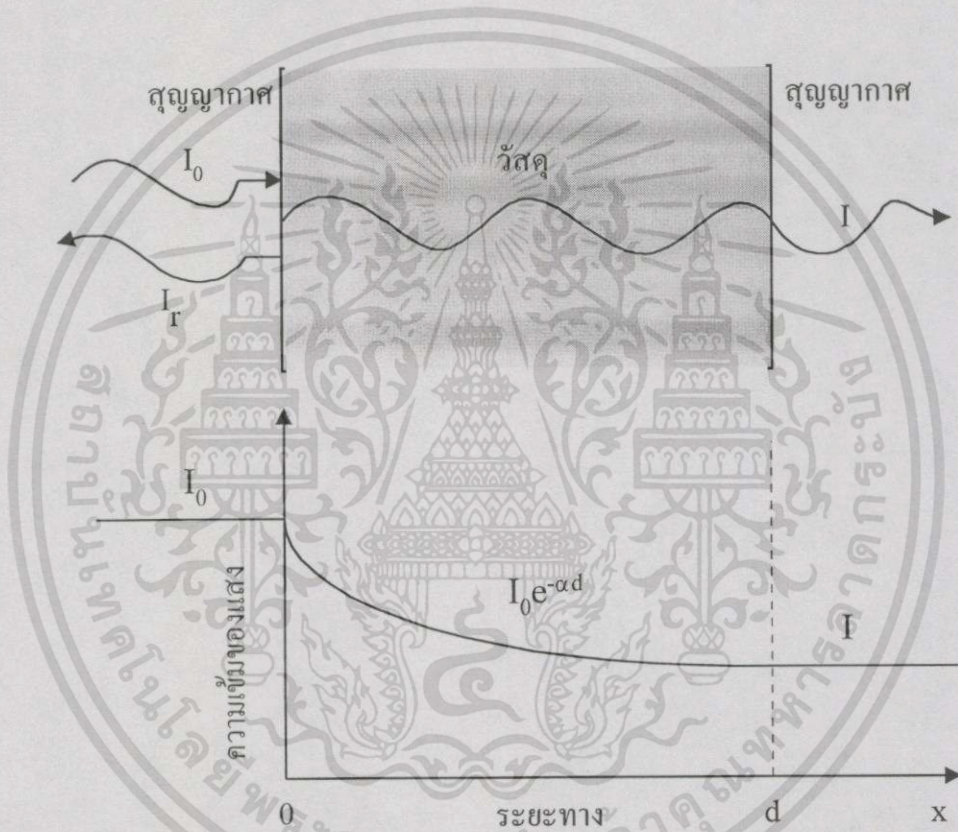
รูปที่ 2.10 การลดลงของโฟตอนฟลักซ์เมื่อผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของโฟตอนฟลักซ์ที่ลดลงเกิดจากปรากฏการณ์ดูดกลืนโฟตอนภายในสารกึ่งตัวนำ และรูปที่ 2.10 แสดงการลดลงของโฟตอนฟลักซ์เมื่อผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ โดยส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคือระยะทางที่โฟตอนฟลักซ์ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำแล้วมีค่าลดลง  $1/e$  เท่าของค่าเริ่มต้น

2.3.2 ปรากฏการณ์ดูดกลืนแสง

เมื่อแสงเดินทางกระทบวัสดุบางส่วนของแสงจะสะท้อนกลับที่ผิววัสดุบางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปข้างในวัสดุและถูกวัสดุดูดกลืน



รูปที่ 2.11 การดูดกลืนแสงและการสะท้อนแสงของวัสดุ

จากรูปที่ 2.11 ให้  $I_0$  คือความเข้มของแสงที่เดินทางไปกระทบวัสดุ  $R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)  $T$  คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (transmittance) และ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( optical absorption coefficient) จะได้ว่า

$$\text{ความเข้มของแสงสะท้อน } I_r = RI_0 \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นแสงที่เดินทางผ่านเข้าไปในวัสดุจะเหลือ  $= I_0 - I_r = (1 - R)I_0$

ต่อจากนั้นแสงที่เดินทางเข้าไปในวัสดุจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงในวัสดุลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง  $d$  ดังนั้นความเข้มแสงที่ทะลุผ่านออกจากวัสดุ  $T$  มีค่าเท่ากับ

$$T = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.15)$$

สาเหตุที่ทำให้แสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งถูกดูดกลืนในวัสดุ คือ อนุภาคอิเล็กตรอนหรือไอออนหรือนิวเคลียส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุนั้นมีประจุไฟฟ้าและมีโมเมนต์แม่เหล็ก จึงมีอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคเหล่านี้และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่าง เช่น

- 1) การเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอะตอมเดี่ยวๆ
- 2) การเปลี่ยนแปลงระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ
- 3) การเกิดเอกซิตอน (exciton)
- 4) การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนและโฮลระหว่างระดับพลังงานของสารเจือปนหรือแก่ปัสเตดที่เกิดจากจุดบกพร่อง
- 5) การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอิสระ (free carriers) ภายในแถบพลังงานเดียวกันในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ
- 6) การเปลี่ยนสถานะของระดับพลังงานของอะตอมเมื่ออะตอมต้นหรือหมุนรอบตัวเอง
- 7) การกระตุ้นให้เกิดการโพลาไรเซชันชนิดต่างๆ ได้แก่ โปลาไรเซชันชนิดอิเล็กตรอน โพลาไรเซชันชนิดไอเรียนเทชัน และโพลาไรเซชันชนิดไอออน
- 8) การกระตุ้นให้โครงสร้างผลึกชนิดไอออนเกิดการสั่น
- 9) การดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจากโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียสหรือโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน

ในจำนวนกลไกทั้งหมดนี้ ชนิดที่ 1)-5) มีอิเล็กตรอนเป็นตัวการสำคัญ ชนิดที่ 5)-8) มีอะตอมและไอออนเป็นตัวการสำคัญ และชนิดที่ 9) มีสนามแม่เหล็กแสดงอิทธิพลสำคัญ[7]

การดูดกลืนแสงทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่จุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในกรณีฉนวนและสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (fundamental absorption) และเรียกความยาวคลื่นแสงของสเปกตรัมที่มีการดูดกลืนแสงนี้ว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (absorption edge) การดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ในบางครั้งเราจำเป็นต้องแสดงลักษณะแถบพลังงานโดยให้เป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number :  $k$ ) ของอิเล็กตรอน ลักษณะของแถบพลังงานในรูปฟังก์ชันของ  $k$  จะได้แถบพลังงานที่มีรูปร่างสูงเป็นเส้นโค้งต่างๆ ในกรณีของยอดสูงสุดของ

แถบเวเลนซ์อยู่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่ตำแหน่งของ  $k = 0$  พอดีเราเรียกสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ว่ามีแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) ส่วนในกรณีที่ยกขยงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน เรียกสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ว่า แถบพลังงานแบบไม่ตรง (indirect band gap)

ในการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนั้นมักกฎอยู่ข้อหนึ่งเรียกว่า กฎการเลือก (selection rule) หรือบางครั้งเรียกว่า กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservative rule) ซึ่งมีใจความสำคัญว่า “ ในการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนั้น อิเล็กตรอนจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม (ค่า  $k$  จะต้องไม่เปลี่ยนแปลง)” ดังนั้นการดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบตรงจึงอยู่ในแนวคิ่งซึ่งเป็นการรักษาโมเมนตัมด้วย แต่สำหรับการดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรงนั้น เนื่องจากจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันไม่ได้อยู่ในแนวคิ่งกับจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ จึงไม่มีสถานะพลังงานที่จะรองรับอิเล็กตรอน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะกระโดดขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนขึ้นไปแล้วเปลี่ยนค่าโมเมนตัมโดยการมีอันตรกิริยากับโครงผลึก (lattice) ซึ่งจะต้องมีการรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมกับ โครงผลึกที่กำลังตั้งอยู่ในปรากฏการณ์นี้ ค่าโมเมนตัมของระบบจะยังคงอนุรักษ์ไว้คิ่งที่จึงจะทำให้การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรงเกิดขึ้นได้ การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานไม่ตรงจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนมีการรับหรือคายพลังงาน โฟนอน ( $\epsilon_p$ ) ให้กับ โครงผลึกการรับหรือคายพลังงาน โฟนอนนี้จะช่วยให้การเปลี่ยนสถานะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน} \quad \epsilon_f - \epsilon_i = \hbar\omega \pm \epsilon_p$$

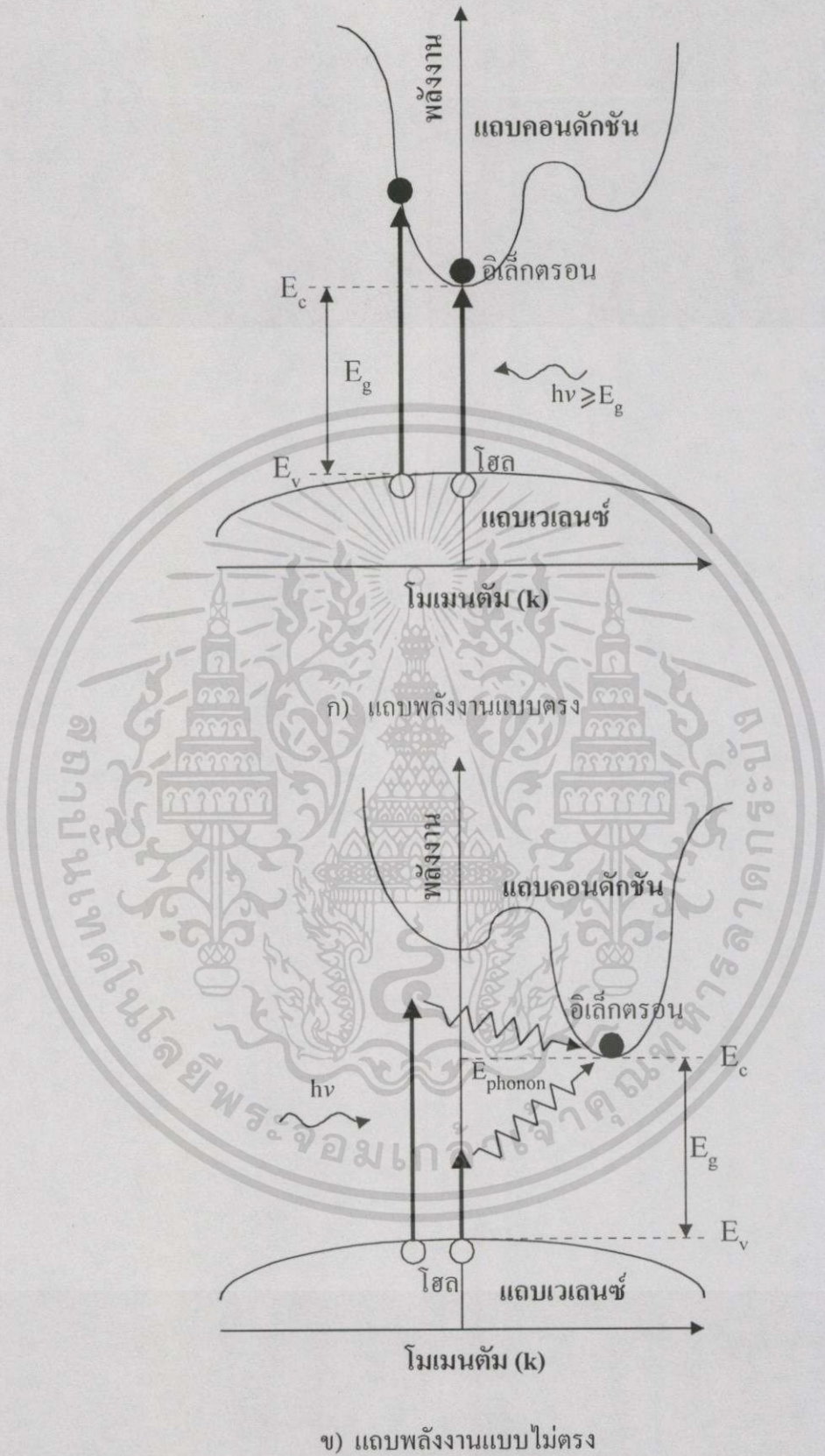
$$\text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad k_2 = k_1 \pm k_p$$

โดยที่

- $\epsilon_p$  : พลังงานโฟตอน
- $\epsilon_i$  : พลังงานของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
- $\epsilon_f$  : พลังงานของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ
- $k_1$  : โมเมนตัมของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
- $k_2$  : โมเมนตัมของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ
- $k_p$  : โมเมนตัมของโฟนอน

เครื่องหมาย + ในพจน์ด้านขวาเป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนรับพลังงานหรือรับ โมเมนตัมจากโฟนอน และเครื่องหมาย - เป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนต้องคายพลังงานหรือคายโมเมนตัมให้แก่โฟนอน รูปที่ 2.12 แสดงขั้นตอนการดูดกลืนแสงแบบพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดแถบพลังงานแบบตรงและแถบพลังงานแบบไม่ตรง การดูดกลืนแสงแบบพื้นฐานบางที่อาจเรียกว่าการดูดกลืนแสงแบบอินทรีนซิกเพราะกลไกสำคัญที่เกิดขึ้นอาศัยการดูดกลืนพลังงาน โฟตอนของเวเลนซ์อิเล็กตรอนเป็นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การดูดกลืนแสงพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ ก) แถบพลังงานแบบตรง ข) แถบพลังงานแบบไม่ตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบพื้นฐานสามารถหาได้จากสมการ[8]

$$\alpha = \frac{2q^2(2m_r)^{\frac{5}{2}}(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}}}{3m^2h^2cn_r h\nu} \quad (2.16)$$

โดยที่

$$m_r = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$m$  = มวลของอิเล็กตรอนอิสระในสุญญากาศ

$m_e$  = มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ

$m_h$  = มวลประสิทธิผลของโฮลในสารกึ่งตัวนำ

$n_r$  = ดัชนีหักเห

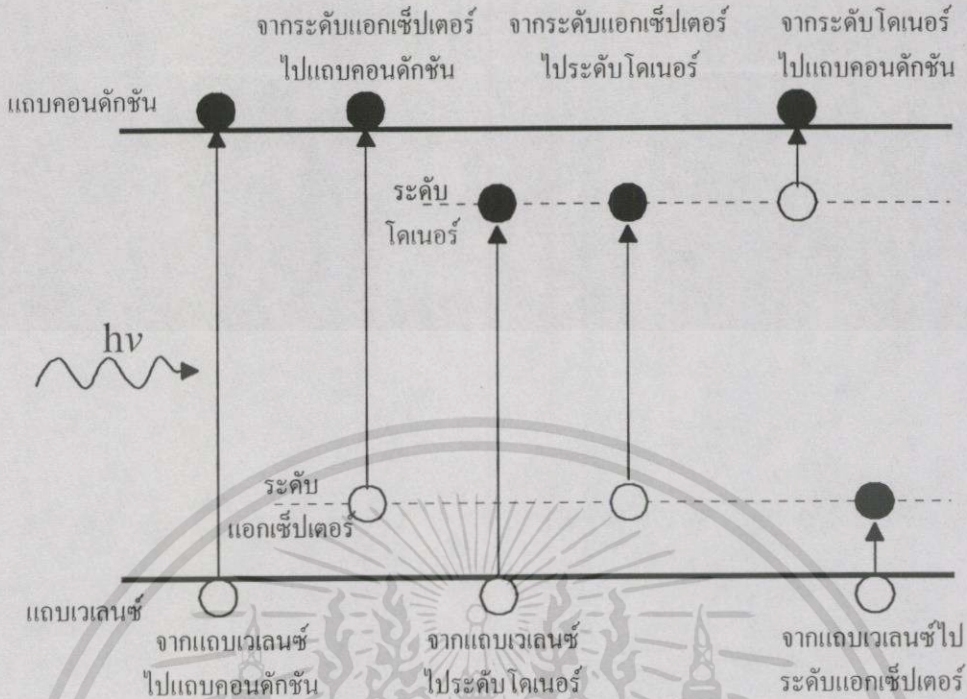
### 2.3.3 การดูดกลืนแสงด้วยเอกซิตอน

ในสารกึ่งตัวนำการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดไปสู่แถบคอนดักชันและเหลือโฮลไว้ในแถบเวเลนซ์นั้น บางครั้งถ้าการกระตุ้นมีพลังงานไม่เพียงพอ อาจทำให้อิเล็กตรอนและโฮลยังคงมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันให้เบียดกันอยู่เรียกว่า เอกซิตอน (exciton) เอกซิตอนเป็นคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ไม่เป็นอิสระแต่อยู่ในสภาพจับคู่กัน เกิดขึ้นเพราะพลังงานโฟตอนของแสงไม่สูงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนและโฮลเป็นอิสระต่อกัน ถ้าสังเกตการดูดกลืนแสงที่ทำให้เกิดเอกซิตอน จะพบว่าสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงมีรูปร่างแหลมและมีค่าพลังงานโฟตอนน้อยกว่าขนาดของช่องว่างเล็กน้อย

### 2.3.4 การดูดกลืนแสงในช่องว่างแถบพลังงาน

การดูดกลืนแสงในช่องว่างแถบพลังงานหรือการดูดกลืนแสงแบบเอ็กทริซิกเป็นการดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อเติมสารเจือปนหรืออะตอมแปลกปลอมเข้าสู่ผลึกสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดระดับพลังงานต่างๆขึ้นในแถบพลังงานต้องห้าม เราเรียกระดับในช่องว่างแถบพลังงาน (gap state) โดยระดับในช่องว่างแถบพลังงานเหล่านี้สามารถเป็นศูนย์กลางของการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ด้วย รูปที่ 2.13 แสดงการดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานต่างๆในช่องว่างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานต่างๆในช่องว่างแถบพลังงาน

โดยปกติอะตอมสารเจือที่เติมเข้าไปจะมีพลังงานกระตุ้น (activation energy) น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ดังนั้นโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่าขอบของการดูดกลืนแสงแบบพื้นฐานจึงสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากระดับสารเจือไปยังแถบคอนดักชันได้ในกรณีของอะตอมสารเจือโคเนอร์หรืออะตอมสารเจือผู้ให้ และสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังระดับสารเจือในกรณีของสารเจือแอกเซ็ปเตอร์หรือสารเจือผู้รับ ดังนั้นการดูดกลืนแสงแบบนี้จึงเกี่ยวข้องกับกลไกการดูดกลืนพลังงานโฟตอน 2 แบบ คือการดูดกลืนพลังงานโฟตอนโดยอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำและการดูดกลืนโฟตอนโดยเวเลนซ์อิเล็กตรอน

เราสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบอ็กทริเนอริกได้จากสมการ[8]

$$\alpha = \frac{2^9 \pi N_I h q^2}{3 m_e n_r \Delta E_I} \left( \frac{\Delta E_I}{h\nu} \right)^4 \frac{\exp \left[ -4 \left( 1 - \frac{\Delta E_I}{h\nu} \right) \arctan \left( 1 - \frac{\Delta E_I}{h\nu} \right) \right]}{1 - \exp \left[ -2\pi \left( 1 - \frac{\Delta E_I}{h\nu} \right) \right]} \quad (2.18)$$

เมื่อ

$N_I$  = ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ

$\Delta E_I$  = พลังงานไอออไนซ์ของสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ

อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในแถบคอนดักชันในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับพลังงานจากแสงจะถูกเร่งให้โมเมนตัมมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงและอิเล็กตรอนก็มีพลังงานเพิ่มขึ้น เราเรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ (free electron absorption หรือ free carrier absorption) การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นแสงที่ยาวมากๆ

### 2.3.6 การดูดกลืนแสงด้วยโพลาริเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริก

การวางวัสดุไดอิเล็กตริกไว้ในสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการแตกขั้วเป็นโพลาริเซชัน (polarization) และถ้าสนามไฟฟ้ามีการกลับขั้วไปมาก็จะทำให้โพลาริเซชันนั้นสั่นตามและเกิดการดูดกลืนพลังงานจากสนามไฟฟ้าได้เนื่องจากแสงก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีสนามไฟฟ้าอยู่ในตัว ดังนั้นแสงจึงถูกโพลาริเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริกดูดกลืนได้ ย่านความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนจะมีค่าเท่าไรนั้นจะขึ้นกับชนิดของโพลาริเซชันว่าเป็นชนิดใด

### 2.3.7 การดูดกลืนแสงด้วยการสั่นของโครงผลึก

ตามปกติอะตอมที่ประกอบกันเป็นวัสดุนั้น ณ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ไม่ได้อยู่นิ่งเฉย แต่จะมีการสั่นรอบๆตำแหน่งสมดุลเสมอ และถ้าเป็นอะตอมที่มีขั้วไฟฟ้าแบบไอออนอยู่บ้าง ก็จะทำให้ไอออนบวกและลบสั่นสลับข้างกัน เมื่อเป็นเช่นนั้นถ้ามีแสงมากระทบวัสดุเช่นนี้ แสงที่มีความถี่เท่ากับการสั่นของไอออนก็จะถูกวัสดุนั้นดูดกลืน

## 2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง

การตรวจรับหรือวัดแสงมีส่วนสำคัญมากในการนำแสงเพื่อมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากแสงมีความยาวคลื่นต่างๆและมีความเข้มแสงมากน้อยต่างกันตามสภาพการใช้งาน ดังนั้นการคิดค้นและประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแสงให้มีความเหมาะสมกับย่านความยาวคลื่นที่ใช้งานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำแสงมาใช้ให้ได้ประโยชน์สูงสุด โดยหลักสำคัญของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ดีคือ การให้การตอบสนองที่ดีกับแสงความยาวคลื่นย่านที่ต้องการใช้งานและให้การตอบสนองที่ต่ำกับความยาวคลื่นแสงในช่วงอื่น นอกจากนั้นยังควรมีการตอบสนองเชิงเวลาที่เร็ว มีสัญญาณรบกวนต่ำ ใช้แรงดันไบแอสต่ำ มีความเสถียรกับอุณหภูมิแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง มีขนาดเล็ก และราคาประหยัด ทั้งนี้คุณสมบัติต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงและลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดต่างๆในแง่ของหลักการทำงานและวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงต่างๆของอุปกรณ์ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความเข้าใจถึงจุดเด่นและข้อของอุปกรณ์แต่ละแบบ

### 2.4.1 อุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) [9]

อุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดแสงประเภทโฟโตอิเล็กทริกแบบภายในที่มีโครงสร้างง่ายที่สุดเนื่องจากใช้สารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียวและไม่จำเป็นต้องใช้รอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อมีแสงมาตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำจะทำให้ค่าความต้านทานของวัสดุลดลง

#### 2.4.1.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน

ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์แสดงในรูปที่ 2.14 โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ได้รับพลังงานและถูกกระตุ้นให้กระโดดขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล เมื่อเราให้ไบแอสแรงดันจะทำให้ประจุพาหะเดินทางไปที่ขั้วโลหะและเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าโฟโตขึ้น ถ้าให้  $\Delta n$  คือจำนวนประจุพาหะอิเล็กตรอนที่เกิดเนื่องจากแสง และ  $\Delta p$  คือ จำนวนประจุพาหะโฮลที่เกิดเนื่องจากแสง จะได้สภาพความนำแสง (photoconductivity)  $\sigma$  ที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\sigma = q(n_0 + \Delta n)\mu_e + q(p_0 + \Delta p)\mu_p \quad (2.19)$$

โดยที่

$n_0$  คือ จำนวนประจุพาหะอิเล็กตรอนในภาวะสมดุลไม่ได้รับแสง

$p_0$  คือ จำนวนประจุพาหะโฮลในภาวะสมดุลไม่ได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปเมื่อมีแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดประจุพาหะอิสระเนื่องจากแสง  
อัตราการเกิดประจุพาหะ (carrier generation rate) สามารถหาได้จากสมการ (กรณีชนิดพี)

$$g_0 = \frac{n - n_0}{\tau_n} = \frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{\alpha P_{op}}{\hbar \omega} \quad (2.20)$$

หรือ (กรณีชนิดเอ็น)

$$g_0 = \frac{p - p_0}{\tau_p} = \frac{\Delta p}{\tau_p} = \frac{\alpha P_{op}}{\hbar \omega} \quad (2.21)$$

โดยที่

$\tau_n$  คือ ชั่วอายุพาหะอิเล็กตรอน

$\tau_p$  คือ ชั่วอายุพาหะโฮล

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$P_{op}$  คือ ความเข้มแสงตกกระทบ

$\omega$  คือ ความถี่แสง

และสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าโฟโตได้จากสมการ (กรณีชนิดพี)

$$I_p = q g_0 \tau_n (\mu_e + \mu_h) \frac{wd}{l} V \quad (2.22)$$

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ ประกอบด้วยกระแส 2 ชนิดรวมกัน คือ  
กระแสไฟฟ้ามืด (dark current)  $I_d$  และกระแสไฟฟ้าโฟโต (photocurrent)  $I_p$

$$I = I_d + I_p \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$I_d = \sigma_0 w \frac{d}{l} V \quad (2.24)$$

และ

$$I_p = \Delta \sigma w \frac{d}{l} V \quad (2.25)$$

โดยที่

$\sigma_0$  คือ สภาพความนำแสงในภาวะสมดุลไม่ได้รับแสง

$\Delta \sigma$  คือ สภาพความนำแสงที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้  $T_n$  คือ เวลาที่อิเล็กตรอนใช้ในการเดินทางจากขั้วไฟฟ้าด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง (electron transit time) มีค่าเท่ากับ

$$T_n = \frac{L^2}{V \cdot \mu_n} \quad (2.26)$$

ในกรณีของโฮลก็เช่นเดียวกัน

$$T_p = \frac{L^2}{V \cdot \mu_p} \quad (2.27)$$

โดยที่  $L$  คือ ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

$V$  คือ แรงดันไบแอส

และจากนิยามอัตราการเพิ่มกระแสไฟฟ้าโฟโต คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนพาหะที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้าต่อจำนวนพาหะที่ผลิตด้วยแสงจะเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่กำหนดประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์ โดยสามารถหาอัตราส่วนนี้ได้จากสมการที่ 2.28 [10]

$$G = \frac{\tau_n}{T_n} = \frac{\tau_p}{T_p} = \frac{I_p}{qg_0 w l d} \quad (2.28)$$

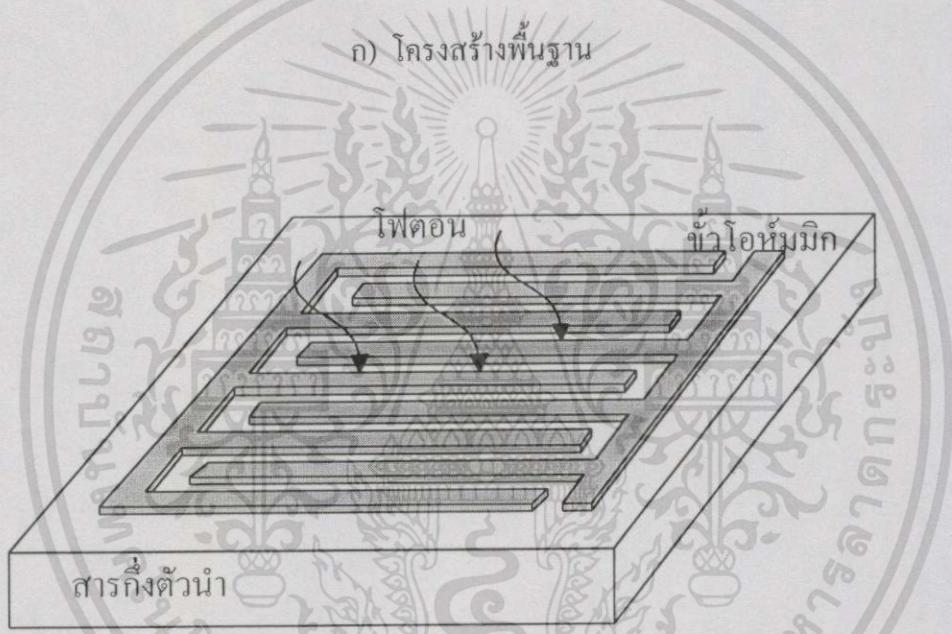
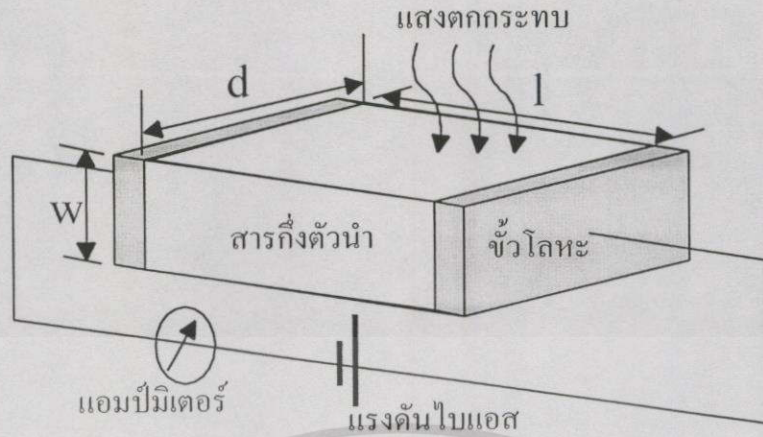
โดยที่

$G$  คือ อัตราการเพิ่มกระแส

$\tau_n$  คือ ชั่วอายุพาหะอิเล็กตรอน

$\tau_p$  คือ ชั่วอายุพาหะโฮล

$g_0$  คือ อัตราการเกิดประจุพาหะ



รูปที่ 2.14 โครงสร้างอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ ก) โครงสร้างพื้นฐาน ข) โครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะแบบพลาณา

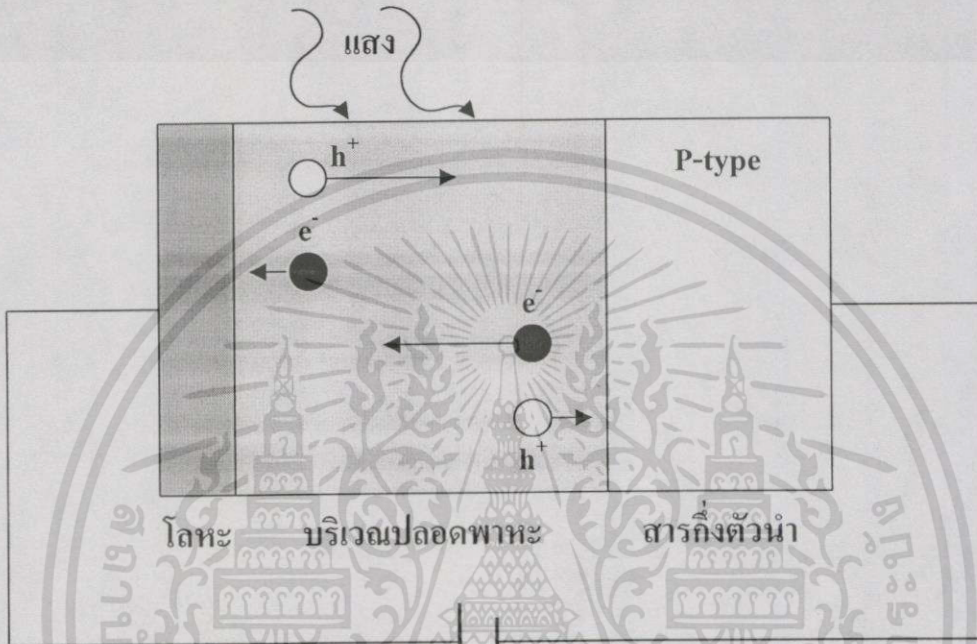
2.4.2 อุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอด[11]

ขอตต์กีโฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดแสงประเภทโฟโตอิเล็กทริกแบบภายในที่มีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ โดยเมื่อมีแสงตกกระทบบริเวณรอยต่อจะเกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น

2.4.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอด

ขอตต์กีโฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงอินพุตเป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบ โดยพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างเอกซอร์นเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $h\nu \geq E_g$ ) แสงก็จะถูกดูดกลืนและพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบคอนดักชันและเหลือโฮลไว้ที่แถบเวเลนซ์ สนามไฟฟ้าจากรอยต่อจะพัดพาอิเล็กตรอนและโฮลไปยังโลหะและสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ชนิดกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.15 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ชนิดกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด

กระแสไฟฟ้าโฟโต ( $I_p$ ) ที่เกิดจากประจุพาหะอิสระเนื่องจากแสงเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าสามารถหาได้จากผลต่างของกระแสไฟฟ้าวัดย้อนกลับขณะได้รับการฉายด้วยแสง ( $I_L$ ) กับกระแสไฟฟ้ามืด ( $I_d$ ) ดังนั้น  $I_p = I_L - I_d$

โดยที่กระแสไฟฟ้าโฟโตสามารถหาได้จากสมการ

$$I_p = \frac{\eta q P_{op}}{h\nu} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency) หาได้จากอัตราส่วนระหว่างจำนวนพาหะที่เดินทางไปถึงขั้วไฟฟ้าต่อจำนวนโฟตอนตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกระแสไฟฟ้ามืดของซอตต์กีโฟโตไดโอดเกิดได้จากหลายสาเหตุด้วยกันซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$I_d = I_{d-G-R} + I_{d-diffusion} + I_{d-surface} \quad (2.30)$$

เมื่อ

$I_{d-G-R}$  คือ กระแสไฟฟ้ามืดที่เกิดจากการกำเนิดและรวมตัวของพาหะ (generation and recombination)

โดยที่

$$I_{d-G-R} \propto \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

$I_{d-diffusion}$  คือ กระแสไฟฟ้ามืดที่เกิดจากการแพร่ของประจุพาหะ

โดยที่

$$I_{d-diffusion} \propto \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)$$

$I_{d-surface}$  คือ กระแสไฟฟ้ามืดที่เกิดจากกระแสรั่วที่บริเวณผิว (surface leakage)

#### 2.4.2.2 กลไกการดูดกลืนแสงและการเกิดกระแสไฟฟ้าโฟโต

เมื่อมีแสงตกกระทบบสารกึ่งตัวนำและมีกรไบแอสย้อนกลับที่รอยต่อ จะเกิดกลไกการดูดกลืนแสงในลักษณะต่างๆตามหมายเลขในรูปที่ 2.16 ดังต่อไปนี้

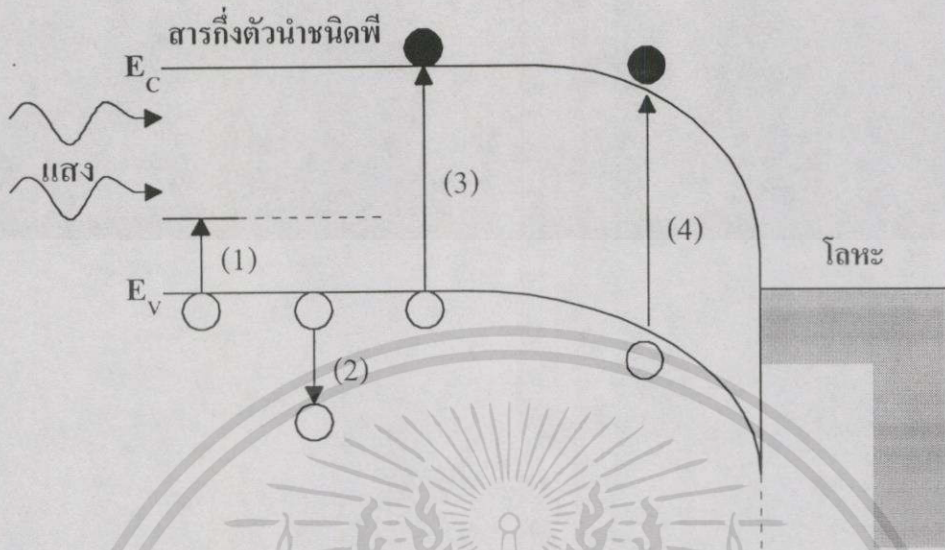
1) เป็นการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำระหว่างแถบเวเลนซ์และระดับแอกเซ็ปเตอร์ แต่ในที่สุดประจุพาหะอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ก็จะตกลงมารวมตัวกับโฮล จึงทำให้ไม่มีผลต่อกระแสเอาต์พุตมากนัก

2) เป็นการดูดกลืนแสงโดยโฮลอิสระ (free hole absorption) ในแถบเวเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ โดยเพียงแต่ระดับพลังงานของโฮลจะลดลงและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นจึงไม่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

3) เป็นการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งใกล้บริเวณปลอดพาหะมาก โดยพาหะอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่ซึมเข้าไปในบริเวณชั้นปลอดพาหะและอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะพัดให้ไหลไปสู่ชั้นโลหะ ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีผลต่อกระแสเอาต์พุต

4) เป็นการดูดกลืนแสงและผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลในชั้นปลอดพาหะ โดยอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะพัดแยกจากกันให้ไหลไปยังโลหะและสารกึ่งตัวนำตามลำดับ ซึ่งการดูดกลืนแสงชนิดนี้จะมีผลต่อกระแสเอาต์พุตมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

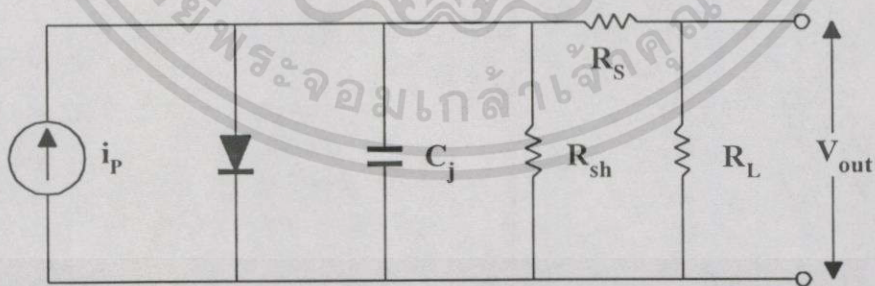


รูปที่ 2.16 กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆในรอยต่อขอตักิโฟโตไดโอด (ไบแอสย้อนกลับ)

2.4.2.3 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด

วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดแสดงในรูปที่ 2.17 โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

$I_p$ : กระแสไฟฟ้าโฟโต  $C_j$ : ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ  $R_s$ : ความต้านทานอนุกรม  $R_{sh}$ : ความต้านทานขนัต์  $R_L$ : ความต้านทานโหลด  $I_s$ : กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับอิมิตัว



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.2.4 การเกิดสัญญาณรบกวนในกระแสโฟโต[12]

โฟโตไดโอดจะมีความสามารถในการวัดแสงความเข้มต่ำๆ ได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณรบกวน(noise current)ที่เกิดในกระแสโฟโต สัญญาณรบกวนในกระแสโฟโต  $i_n$  เกิดจาก

1) สัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอล  $i_j$  (thermal noise หรือ Johnson noise) เกิดจากความต้านทานแบบซันด์

2) สัญญาณรบกวนชนิดชอตต์  $i_s$  (shot noise) เกิดจากกระแสไฟฟ้ามืดและกระแสโฟโต สัญญาณรบกวนรวมในกระแสโฟโต  $i_n$  มีค่าดังนี้

$$i_n = \sqrt{i_j^2 + i_s^2} \quad (2.31)$$

โดยที่

$$i_j = \sqrt{4kTB \left( \frac{1}{R_{sh}} + \frac{1}{R_L} \right)} \quad (2.32)$$

และกรณีกระแสไฟฟ้ามืด

$$i_d = \sqrt{2qI_d B} \quad (2.33)$$

กรณีเมื่อมีแสงตกกระทบ

$$i_p = \sqrt{2qI_p B} \quad (2.34)$$

ดังนั้นสัญญาณรบกวนชนิดชอตต์

$$i_s = i_p + i_d \quad (2.35)$$

#### 2.4.2.5 เวลาตอบสนองของโฟโตไดโอด

ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดได้แก่ เวลาที่นับตั้งแต่ได้รับแสงจนกระทั่งเกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกมา โดยหลักการของปรากฏการณ์ทางแสงแล้วการดูดกลืนและการเกิดคู่ของประจุพาหะจะใช้เวลาสั้นมาก ดังนั้นการล่าช้าของเวลากว่าจะได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกมา จึงขึ้นอยู่กับแพ็คเกจอร์ตัวอื่นๆมากกว่า ในกรณีของโฟโตไดโอดแพ็คเกจอร์สำคัญที่มีอิทธิพลต่อความเร็วในการตอบสนองอุปกรณ์ได้แก่

(1) เวลาพัดพา  $T_{drift}$  (drift time) คือ เวลาที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นปลอดพาหะ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T_{drift} = \frac{W^2}{\mu V_R} \quad (2.36)$$

โดย  $W$  คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

$\mu$  คือ ความคล่องตัวพาหะ

$V_R$  คือ แรงดันไบแอสย้อนกลับ

(2) เวลาแพร่ซึม  $T_{diff}$  (diffusion time) คือ เวลาที่พาหะที่เกิดนอกบริเวณปลอดพาหะใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นปลอดพาหะ

$$T_{diff} = \frac{d^2}{2D_c} \quad (2.37)$$

โดย  $d$  คือ ระยะทางการแพร่

$D_c$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อย

(3) ค่าคงที่เวลา  $T_{RC}$  (RC time constant) ของวงจรภายนอก เกิดจากเวลาที่ต้องใช้ในการดิสชาร์จประจุไฟฟ้าของรอยต่อผ่านความต้านทานโหลด จาก 90% ของค่าสูงสุด ( $V_0$ ) ถึง 10% ของค่า  $V_0$  ( $V = V_0 \exp(-t/RC)$ )

$$T_{RC} = 2.2 R_L C_j \quad (2.38)$$

โดย  $R_L$  คือ ความต้านทานโหลด

$C_j$  คือ ความจุไฟฟ้าของรอยต่อ

ในจำนวนแฟกเตอร์เวลาทั้งสามชนิดที่กล่าวมาแล้วถ้าตัวใดมีค่านานสุดตัวนั้นจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการตอบสนองหรือถ้าแฟกเตอร์ทั้งสามชนิดมีอิทธิพลใกล้เคียงกันเราจะใช้ค่าเฉลี่ยของทั้งสามตัว

#### 2.4.2.6 แบนด์วิดท์ของอุปกรณ์โฟโตไดโอด

ความถี่ซึ่งทำให้กำลังเอาต์พุตของอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงลดลง 3 dB เรียกว่าความถี่ตัด (cutoff frequency) หรือแบนด์วิดท์ (bandwidth) ซึ่งมีค่าดังสมการ (2.39)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = \frac{1}{2\pi RC} \quad (\text{Hz}) \quad (2.39)$$

โดยที่ R คือ ความต้านทาน

C คือ ความจุไฟฟ้า

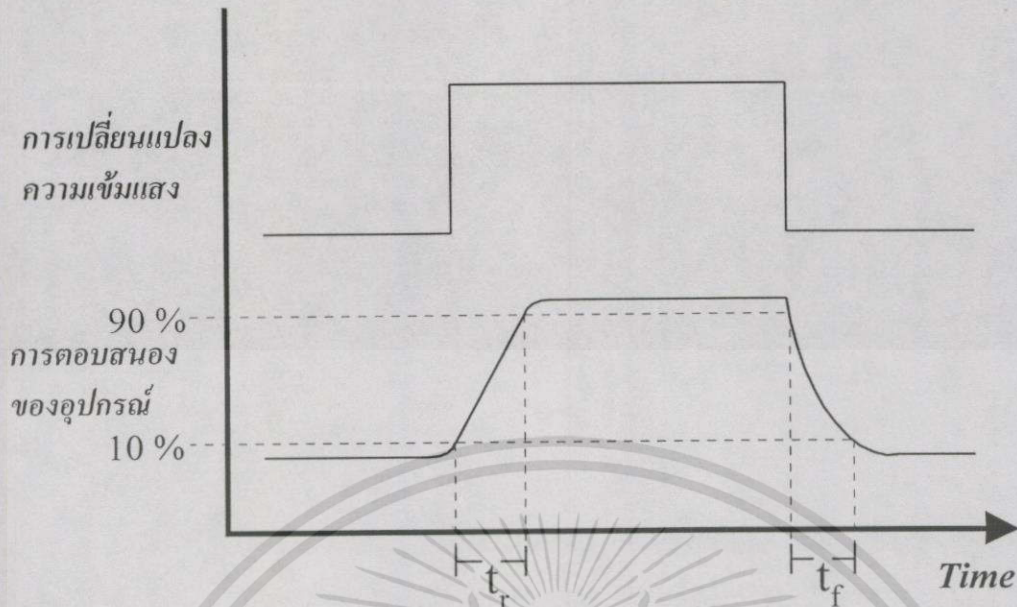
ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้นว่าค่าความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดจะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์สำคัญสามตัว หากเราพิจารณารูปที่ 2.18 ค่าเวลาขาขึ้น ( $t_r$ ) หมายถึงช่วงเวลาที่สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงจาก 10% ไปถึง 90% ซึ่งค่า  $t_r$  นี้จะอยู่ภายใต้อิทธิพลของแฟกเตอร์ทั้งสาม ตัวข้างต้น โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.40

$$t_r = \left[ (T_{drift})^2 + (T_{diff})^2 + (T_{RC})^2 \right]^{1/2} \quad (2.40)$$

ในกรณีของโฟโตไดโอดสามารถพิจารณาประมาณได้ว่าแฟกเตอร์สองตัวแรกมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่ RC ดังนั้นเราสามารถประมาณได้ว่า

$$B = \frac{0.35}{t_r} \quad (2.41)$$

ในการใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัดแสงในบางครั้งต้องการผลตอบสนองที่เร็วมาก ซึ่งอาจถึงไมโครวินาที หรือนาโนวินาที ดังนั้นเวลาตอบสนองจึงมีส่วนสำคัญในการเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับงานที่ใช้งาน เวลาตอบสนอง คือ การวัดการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองของอุปกรณ์กับเวลาเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยน โดยที่  $t_r$  (rise time) กำหนดจากเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองจาก 10% ถึง 90% ของการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทั้งหมด และ  $t_f$  (fall time) คือ เวลาที่ใช้ในการลดลงของการตอบสนองจาก 90% ถึง 10% ของค่าการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทั้งหมด รูปที่ 2.18 แสดงวิธีการหาค่าเวลาตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง



รูปที่ 2.18 เวลาตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่เปลี่ยนแปลงกับความเข้มแสง

#### 2.4.2.7 ผลการตอบสนองเชิงสเปกตรัม (spectral response) [13][14]

โดยปกติอุปกรณ์ตรวจวัดแสงจะมีผลการตอบสนองไม่เท่ากันถ้าความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่า ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (spectral response)  $R(\lambda)$  ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ

$$R(\lambda) = \frac{J_L(\lambda)}{P_{op}(\lambda)} \quad (2.42)$$

โดยที่

$J_L(\lambda)$  คือ ความหนาแน่นกระแสโฟโต

$P_{op}(\lambda)$  คือ ความเข้มแสงตกกระทบบ

### บทที่ 3

## เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด

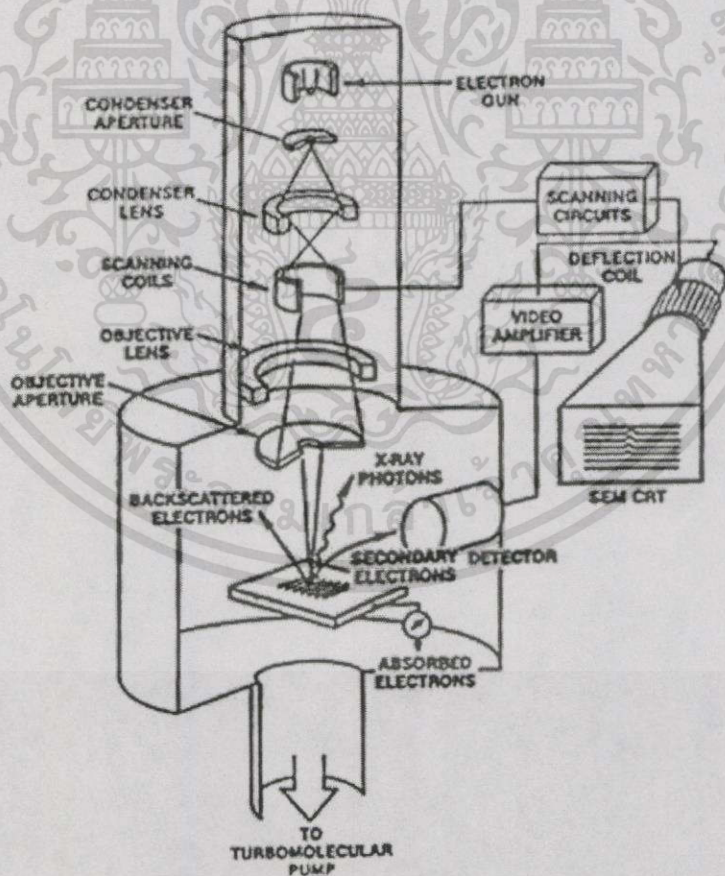
### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชร[15]

#### 3.1.1 จุดทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

เทคนิคจุดทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscopy) หรือ SEM เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวและศึกษาโครงสร้างของวัสดุ มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายวิชา โดยเทคนิค SEM นี้มีจุดเด่นที่สำคัญอยู่ 2 ประการคือ

1. สามารถให้รูปที่มีความชัดลึกสูง (high depth of field)
2. สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง (high spatial resolution)

ซึ่งส่วนประกอบและลักษณะการทำงาน of เครื่อง SEM ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

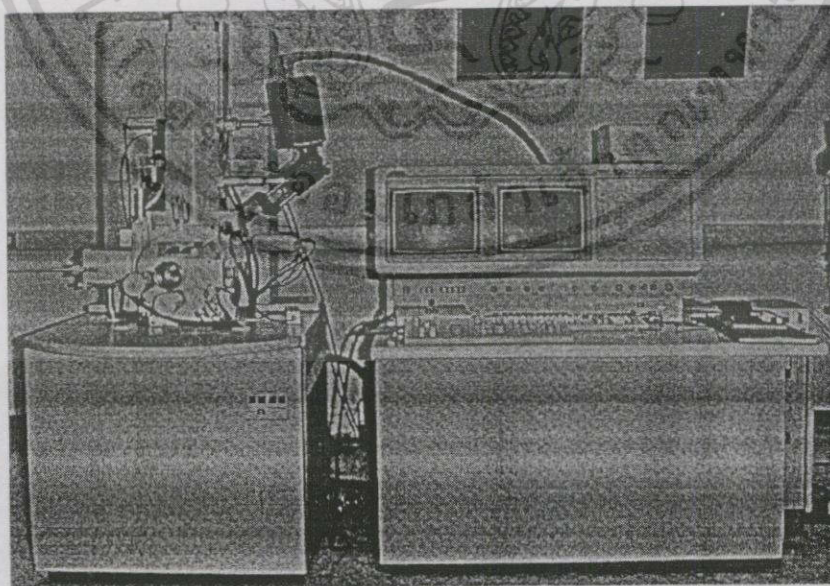


รูปที่ 3.1 แผนภาพหลักการทำงาน of เครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ในส่วนบนสุดของรูปจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron source) หรือที่เรียกว่า “ปืนอิเล็กตรอน” (electron gun) ซึ่งนับได้ว่าเป็นหัวใจของ SEM การทำงานจะเริ่มต้นจากการที่อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 kV. โดยทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) จำนวน 2 ชุด หรือมากกว่า ส่วนปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) ซึ่งเป็นช่องเปิดที่มีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (first condenser lens) อาจนับได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์ของอิเล็กตรอน (electron optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมายโดยมีคอยล์กวาดรูป (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม คล้ายกับการกวาดรูปบนจอโทรทัศน์ เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุจะเกิดอันตรกิริยาขึ้นภายในวัตถุ และจะให้สัญญาณต่าง ๆ ออกมา ซึ่งสัญญาณต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกตรวจจับและถูกนำไปแสดงผลในที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร โดยเครื่อง SEM ที่ใช้เป็นเครื่องของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6301F ซึ่งเป็นกล้องที่ใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อีมิสชัน (cold field emission electron gun) ทำให้มีความสว่างสูง และสามารถใช้กำลังแยกแยะได้สูงมากในระดับ 1.4 nm ที่ 30 kV และมีกำลังขยายสูงสุดถึง 200,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.2

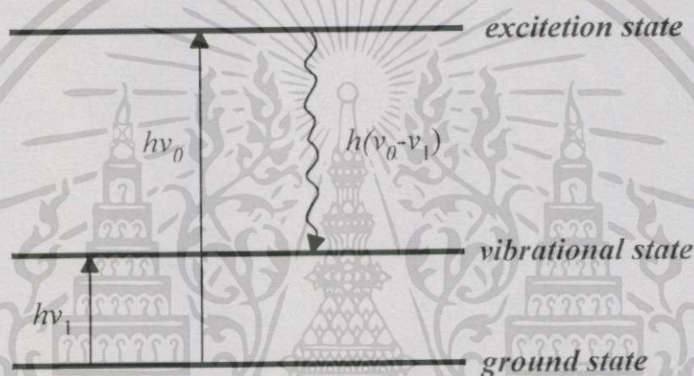


รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายเครื่อง SEM ของ JEOL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 พูเรียร์ทรานสฟอร์มรามานสเปกโตรสโกปี ( FT-RAMAN )

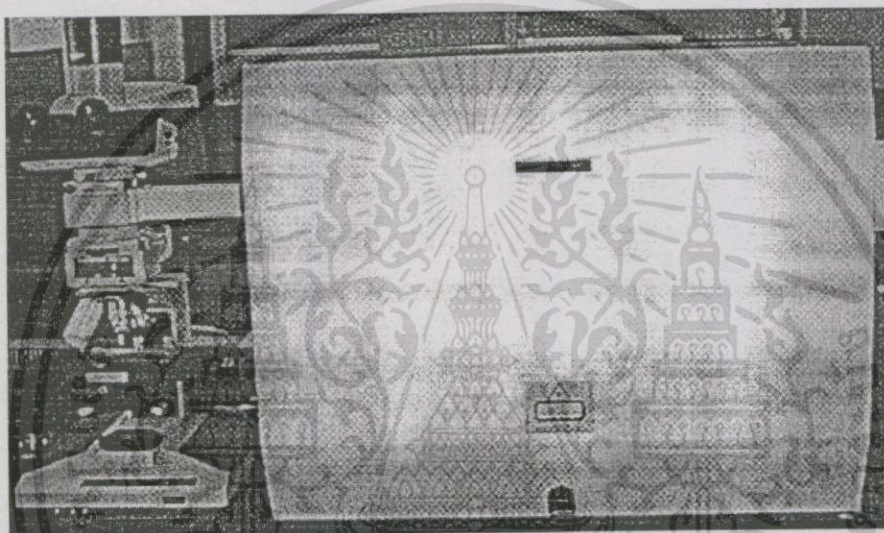
เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับอะตอมของวัสดุ โดยจะอาศัยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการชนของคลื่นแสงที่มีความเข้มสูงกับอะตอมของวัสดุ ทำให้คลื่นแสงนั้นเกิดการกระเจิง โดยแสงที่กระเจิงออกมาจะมีความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เรียกปรากฏการณ์ในลักษณะเช่นนี้ว่า Raman Scattering สำหรับการตรวจสอบสารตัวอย่างใด ๆ Raman Scattering สามารถเกิดขึ้นได้โดยการใช้ลำแสงโมโนโครมาติกที่มีความเข้มสูงเช่น ลำแสงเลเซอร์ (laser beam) ยิ่งผ่านเข้าไปยังวัสดุตัวอย่าง แล้วเกิดการกระเจิงของแสงขึ้น โดยแสงที่กระเจิงออกมาจะมีความถี่เปลี่ยนแปลงลดลงจากความถี่เดิมของแสงที่ตกกระทบ ดังแสดงในรูป 3.3



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ทำให้เกิด Raman Scattering

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อโฟตอนจากแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน  $h\nu_0$  ผ่านเข้าไปในอะตอมของวัสดุตัวอย่าง จะเกิดอันตรกิริยาขึ้นโดยมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปทำให้เกิดการรบกวนการจัดตัวของอิเล็กตรอน (electronic configuration) ทำให้อิเล็กตรอนนั้นกระโดดขึ้นไปสู่สถานะใหม่ที่เราเรียกว่า สถานะกระตุ้น (excitation state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร จึงต้องตกกลับลงมาสู่สถานะเดิม โดยมีการคายพลังงานออกมามีค่าเท่ากับ  $h(\nu_0 - \nu_i)$  ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปมีค่าเท่ากับ  $h\nu_i$  จะถูกใช้ไปสำหรับทำให้เกิดการสั่น (vibration) ของอะตอมในโครงผลึก โดยพลังงาน  $h\nu_i$  ที่ถูกดูดกลืนนี้จะอยู่ในย่านของอินฟราเรด ดังนั้นพลังงานที่เหลือ  $h(\nu_0 - \nu_i)$  จึงเป็นพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั่นเอง โดยสเปกตรัมของแสงที่ได้ออกมาจะถูกเรียกว่า Stokes line จากกลไกข้างต้นนี้เองจึงทำให้เกิดเทคนิค FT-Raman สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบชนิดของวัสดุตัวอย่างได้ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเพื่อการตรวจพิสูจน์ ซึ่งสเปกตรัมของวัสดุชนิดเดียวกันจะต้องมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคนิครามานสเปกโตรสโกปีมาใช้เพื่อทำการวิเคราะห์การมีคุณสมบัติเป็นเพชรของฟิล์มที่สร้างได้ โดยสเปกตรัมรามานของเพชรธรรมชาติจะมียอดสูงสุดของสเปกตรัมที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  ดังนั้นถ้าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองมีคุณสมบัติเป็นเพชรจะต้องมียอดสเปกตรัมใกล้เคียงกับค่า  $1332\text{ cm}^{-1}$  โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ (FT-Raman spectrometer) ที่นำมาใช้วิเคราะห์นี้เป็นเครื่อง Renishaw รุ่น System 2000 ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ในช่วงสเปกตรัม  $4000\text{--}200\text{ cm}^{-1}$  ภาพถ่ายแสดงในรูปที่ 3.4

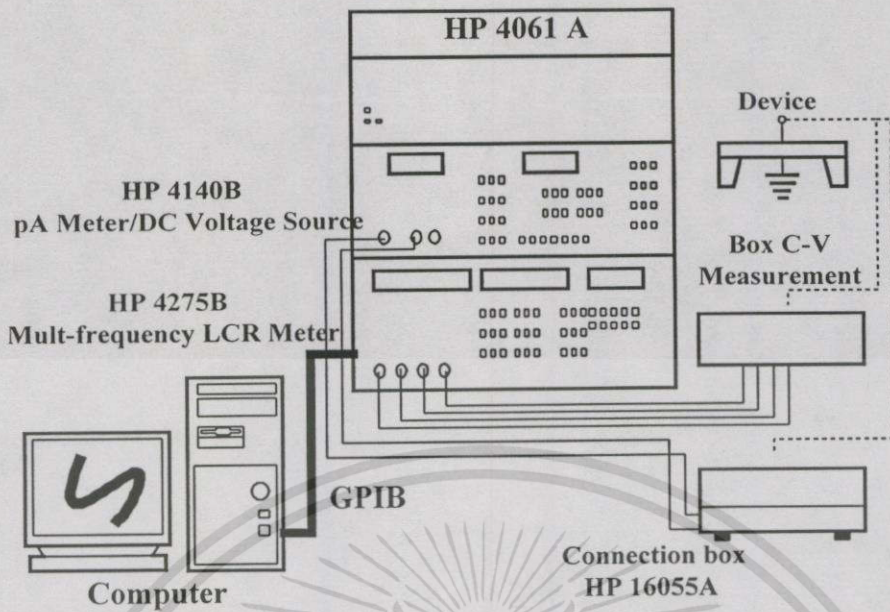


รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่อง FT-Raman spectrometer ของ Renishaw

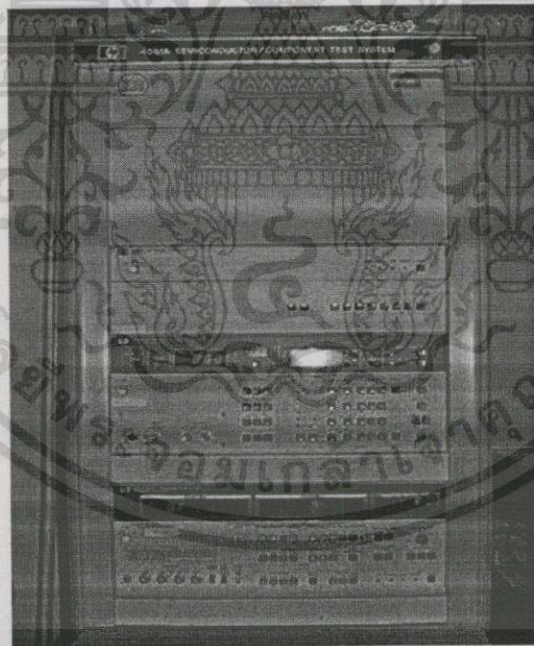
### 3.2 เครื่องมือวัดคุณลักษณะกระแสแรงดันและความจุไฟฟ้าแรงดัน

การศึกษาคุณลักษณะกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ( $I-V$ ) และคุณลักษณะความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ( $C-V$ ) ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง HP 4061 A Semiconductor/ Component Test System ซึ่งเครื่องมือชุดนี้จะประกอบไปด้วย HP4140 B Meter/ DC Voltage Source และ เครื่อง HP4275 B Multi-frequency LCR Meter โดยชุดเครื่องมือวัดนี้จะต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วย GPIB ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งจะสามารถควบคุมการวัดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนไว้สำหรับเครื่อง HP4061A โดยเฉพาะ [16] และรูปที่ 3.6 แสดงภาพถ่ายเครื่อง HP4061A ซึ่งประกอบด้วยเครื่อง HP4140 B Meter/ DC Voltage Source และ เครื่อง HP4275 B Multi-frequency LCR Meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ภาพจำลองชุดเครื่องมือวัด HP4061 A ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายเครื่อง HP4061A

### 3.3 เครื่องมือวัดทางแสง

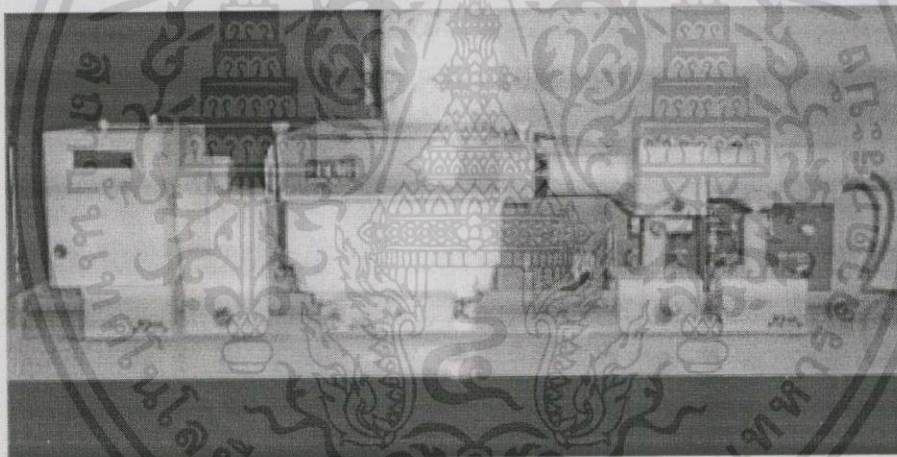
ในงานวิจัยนี้การทดลองส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมทางแสงของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ดังนั้นชุดเครื่องมือวัดทางแสงที่ใช้ในการทดลองจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการทดลองและวิธีการจัดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. ต้นกำเนิดแสง (light source) ในการทดลองใช้หลอดควิเวทอเรียม
2. ตัวตัดแสง (chopper) ใช้เพื่อตัดแสงให้เป็นแบบพัลส์ (pulse) ซึ่งจะช่วยให้ลดสัญญาณรบกวนได้[17]

3. โมโนโครมาเตอร์(monochromator)ใช้เพื่อเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการโดยภายในประกอบด้วยช่องผ่านแสง (slits) กระจกและเลนส์ (mirror and lens) ส่วนที่ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ ได้แก่ ฟิลเตอร์ (filters) ปริซึม(prism) และเกรตติง (grating)

4. เครื่องวัดแสง (radiation detector) เป็นหัววัดแสงโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier) มีสภาพความไวสูงและสามารถวัดแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 - 900 นาโนเมตร เราใช้เครื่องมือนี้ในการวัดสเปกตรัมของต้นกำเนิดแสง ภาพถ่ายเครื่องมือวัดทางแสงแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายชุดเครื่องมือวัดทางแสงที่ใช้ในการทดลอง

## บทที่ 4

### การออกแบบและการสร้าง

การที่อุปกรณ์ตรวจวัดแสงจะมีประสิทธิภาพการทำงานสูงนั้นนอกจากจะขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์แล้ว การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ก็เป็นส่วนที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบโครงสร้างและวิธีการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โดยในการทดลองอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ใช้มีสองแบบ คือ โครงสร้างแบบโฟโตคอนดักเตอร์ และแบบชอตต์กีไดโอด ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 การออกแบบโฟโตคอนดักเตอร์

หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์โครงสร้างแบบโฟโตคอนดักเตอร์ คือ เมื่อมีแสงตกกระทบวัสดุ จะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล และเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพนำไฟฟ้า( $\sigma$ ) โดยที่ประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลเมื่อได้รับแรงดันไบแอสจะวิ่งไปที่ขั้วโลหะบวกและลบตามลำดับ

จากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.51 การออกแบบให้อุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าในปริมาณมากๆและมีการตอบสนองที่เร็ว จึงควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยๆและใช้วัสดุที่มีค่าความคล่องตัวประจุพาหะสูงๆ รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์

#### วัสดุที่ใช้ในการสร้างโฟโตคอนดักเตอร์

ในการทดลองวัสดุที่ใช้สำหรับการสร้างอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์มีทั้งหมด 1 วัสดุ คือ วัสดุขั้วโลหะ การทดลองเราออกแบบให้ความกว้างของขั้วโลหะ( $w$ )คงที่ มีค่าเท่ากับ 20 ไมครอน และมีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ( $L$ ) เท่ากับ 20 40 60 และ 80 โดยที่พื้นที่การรับแสงคงที่ เท่ากับ 4.47 ตารางมิลลิเมตร พื้นที่รับแสงหาได้จากสมการ

$$Area = d \times nl \quad (4.1)$$

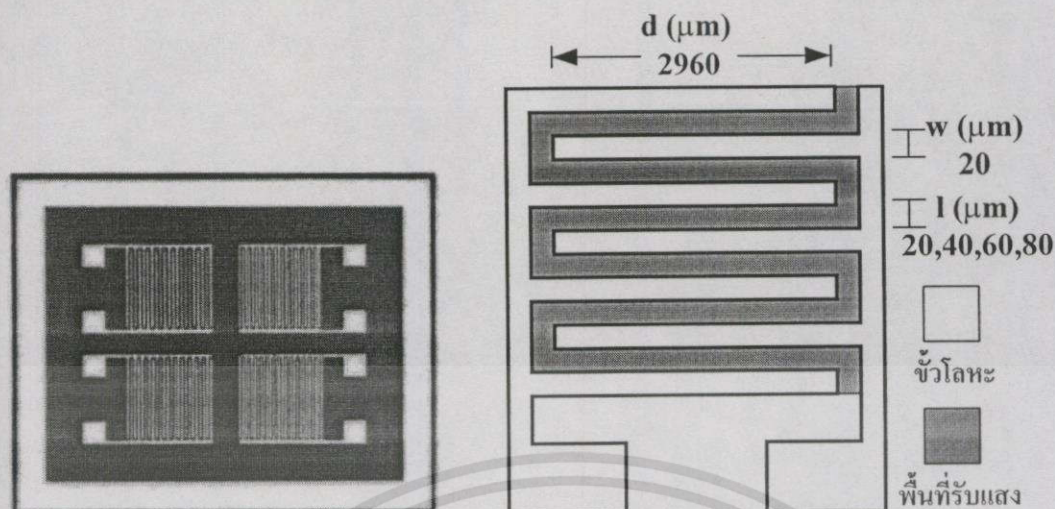
โดยที่  $d$  คือ ความยาวของขั้วไฟฟ้า

$n$  คือ จำนวนระยะห่างระหว่างขั้ว

$l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว

รูปที่ 4.1 แสดงภาพมาตรฐานการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโฟโตคอนดักเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 มาสก์สร้างอุปกรณ์ตรวจจับแสงโฟโตคอนดักเตอร์

#### 4.2 การออกแบบขอตักโฟโตไดโอด

รอยต่อขอตักเกิดจากการสัมผัสกันระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว โดยเมื่อให้ไบแอสย้อนกลับแก่รอยต่อจะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ซึ่งบริเวณปลอดประจุพาหะนี้จะมีผลอย่างมากในการรับแสงแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โดยประจุพาหะทั้งสองชนิดจะถูกปิดไปยังขั้วโลหะทั้งสองด้วยความต่างศักย์ภายในบริเวณรอยต่อ การออกแบบให้มีบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างมากๆจะทำให้ได้ปริมาณของคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสงเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็เป็น การเพิ่มระยะการเดินทางของประจุพาหะมากขึ้นทำให้เกิดความล่าช้าและมีความน่าจะเป็นสูงที่ปริมาณพาหะจะไปถึงขั้วโลหะมีปริมาณลดลง

ฟิล์มเพอร์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ (polycrystalline) ซึ่งมีเส้นพรมแดนของผลึก (grain boundaries) จำนวนมาก ดังนั้นอุปกรณ์ทางแสงแบบพลาแน (planar) ที่สร้างบนฟิล์มเพอร์จะประสบกับปัญหาของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสงต้องเดินทางผ่านเส้นพรมแดนของผลึก [18] ทำให้เกิดการลดลงของปริมาณประจุพาหะและทำให้เวลาตอบสนองของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากประจุพาหะต้องใช้เวลาในการเดินทางผ่านเส้นพรมแดนของผลึก ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับแสงแบบขอตักโฟโตไดโอดในวิธานิพันธ์ฉบับนี้จึงออกแบบให้อุปกรณ์ทำงานในแนวตั้งซึ่งเป็นทิศทางขนานไปกับเส้นพรมแดนของผลึกทำให้สามารถลดอิทธิพลของเส้นพรมแดนของผลึกที่มีต่อทิศทางการเดินของกระแสไฟฟ้าได้ และนอกจากนี้การออกแบบให้บริเวณปลอดพาหะมีความกว้างใกล้เคียงกับขนาดของผลึก (grain size) จะทำให้ประจุพาหะอิสระที่เกิด

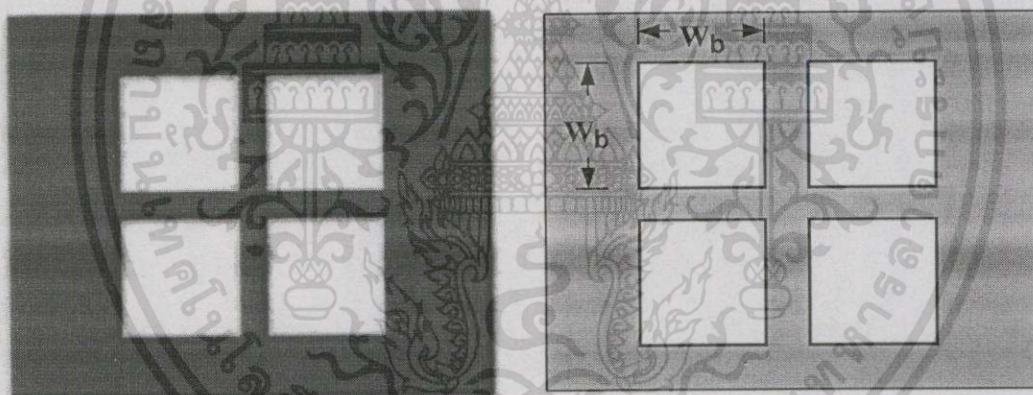
แสงในบริเวณรอยต่อเคลื่อนที่ไปยังขั้วโลหะโดยไม่ผ่านเส้นพรมแดนผลึก ซึ่งเสมือนหนึ่งว่าประจุพาหะเดินทางใน โครงสร้างแบบผลึกเดี่ยว(single crystalline)

### วัสดุที่ใช้ในการสร้างขอตัก์โฟโตไดโอด

ในการทดลองเราใช้วัสดุในการสร้างทั้งหมด 2 วัสดุ ประกอบด้วยวัสดุไดอะแฟรม และ วัสดุขั้วโลหะ

#### 1. วัสดุไดอะแฟรม

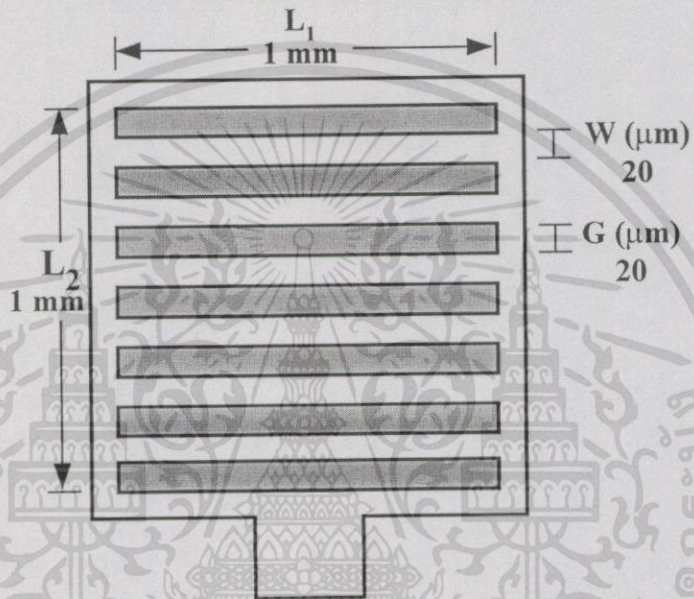
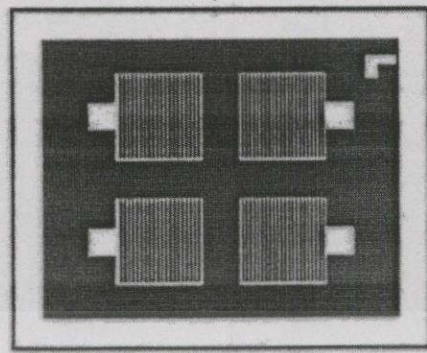
การทดลองเราออกแบบขอตัก์โฟโตไดโอดให้มีพื้นที่รอยต่อขอตัก์  $1.0 \times 1.0$  ตารางมิลลิเมตร  $2.0 \times 2.0$  ตารางมิลลิเมตรและ  $3.0 \times 3.0$  ตารางมิลลิเมตร ดังนั้นในการออกแบบวัสดุไดอะแฟรมจึงต้องออกแบบขนาดความกว้างและยาว ( $W_b \times W_b$ ) ให้มีขนาด 391x391 ไมครอน ขนาด 1391x1391 ไมครอน และขนาด 2391x2391 ไมครอนตามลำดับ รายละเอียดวิธีการออกแบบไดอะแฟรมแสดงในหัวข้อต่อไป รูปที่ 4.2 แสดงวัสดุไดอะแฟรม



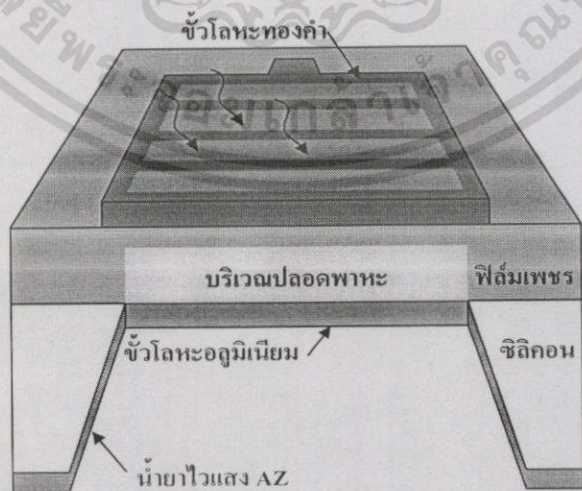
รูปที่ 4.2 วัสดุไดอะแฟรม

#### 2. วัสดุขั้วโลหะ

การทดลองเราออกแบบวัสดุขั้วโลหะให้มีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะด้านบน ( $G$ ) เท่ากับ 20 ไมครอน และมีความยาวของขั้วโลหะ ( $W$ ) เท่ากับ 20 ไมครอน ในการทดลองเราออกแบบให้ขอตัก์โฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รอยต่อขอตัก์  $(L_1 \times L_2)$   $1.0 \times 1.0$  ตารางมิลลิเมตร  $2.0 \times 2.0$  ตารางมิลลิเมตร และ  $3.0 \times 3.0$  ตารางมิลลิเมตร รูปที่ 4.3 แสดงวัสดุการสร้างอุปกรณ์ขอตัก์โฟโตไดโอด และรูปที่ 4.4 แสดงภาพจำลองโครงสร้างอุปกรณ์ขอตัก์โฟโตไดโอด



รูปที่ 4.3 มาสก์ขั้วโลหะ



รูปที่ 4.4 ภาพจำลองโครงสร้างอุปกรณ์ชนิดค็อกกีโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การออกแบบไดอะแฟรม [19]

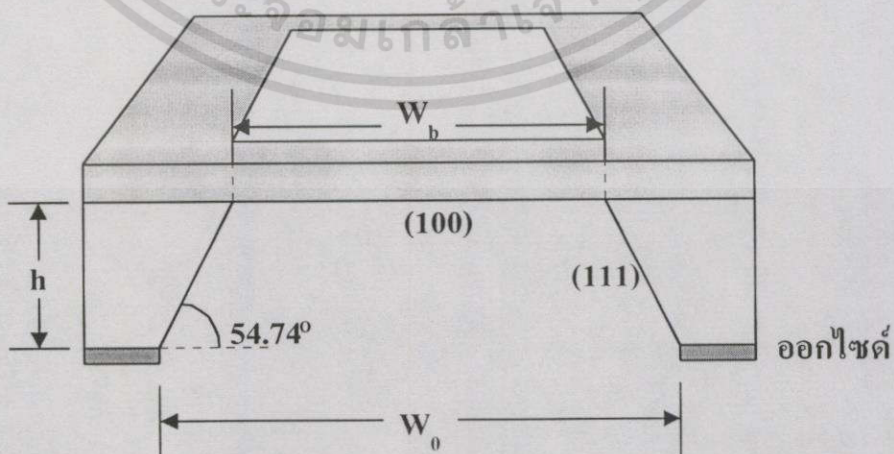
โครงสร้างของอุปกรณ์ขอตคทีโฟโตไดโอดประกอบด้วยไดอะแฟรมบางของฟิล์มเพชร เป็นส่วนสำคัญ ด้วยเหตุนี้การกัดซิลิคอนบางส่วนออกเพื่อให้เหลือเป็นไดอะแฟรมของฟิล์มเพชร จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการสร้างอุปกรณ์ ไดอะแฟรมของฟิล์มเพชรเกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอน ระบาย (100) ออกโดยสารละลายที่มีลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซโทรปิก(anisotropic)คือการ กัดที่ตัวกัด(etchant) ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายจะกัดเนื้อสารในทิศทางหรือระนาบต่างๆของผลึก ไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

ดังนั้นการออกแบบปากหลุมจึงมีความสัมพันธ์กับความกว้างของก้นหลุม ถ้าเปิดปากหลุม กว้างเท่ากับ  $W_0$  และทำการกัดจนได้ลึกเท่ากับ  $h$  จะได้ขนาดความกว้างของก้นหลุม  $W_b$  ดังสมการ

$$W_b = W_0 - \frac{2h}{\tan(54.74^\circ)} \cong W_0 - \sqrt{2}h \quad (4.2)$$

ถ้าต้องการความกว้างปากหลุม 3000 ไมครอน และแผ่นซิลิคอนมีความหนา 430 ไมครอน ดังนั้นต้องเปิดปากหลุมเท่ากับ  $W_b = 3000 - \sqrt{2}(430) = 2391$  ไมครอน

ในการทดลองเราใช้สารละลายที่เกิดจากการผสมระหว่างเอธิลีนไดอะมีน(Ethylenediamine) กับไพโรแคตทอล(Pyrocatechol) และน้ำบริสุทธิ์(DI water) หรือที่นิยมเรียกว่า EPD โดยมีอัตรา ส่วน E 50 ml : P 8 กรัม : DI 16 ml ทำการกัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กวนสารละลายด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที มีอัตราการกัดซิลิคอนประมาณ 1.50 ไมครอนต่อนาที ใช้ชั้นออกไซด์ หนาประมาณ 7000 อังสตรอม เป็นชั้นกันการกัดซิลิคอน โดยสารละลาย EPD จะไม่กัดฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.5 ภาคตัดขวางแสดงลักษณะการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การกัดฟิล์มเพชร

การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีการศึกษาผลของการลดความหนาของชั้นฟิล์มเพชรว่าจะมีผลอย่างไรต่อการทำงานของอุปกรณ์ขดขั้วโพโตไดโอด ดังนั้นการหาวิธีการลดชั้นฟิล์มเพชรให้บางลงจึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับการทดลองหัวข้อนี้ และในการทดลองเราเปลี่ยนขนาดความหนาของฟิล์มเพชร 3 ค่า คือ 8 ไมครอน 7 ไมครอน และ 6 ไมครอน การลดความหนาฟิล์มเพชรสามารถทำได้สองวิธี วิธีแรกคือการลดระยะเวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรและวิธีที่สองคือการกัดฟิล์มเพชรออกให้บางลง ในการทดลองเราเลือกใช้วิธีการกัดฟิล์มเพชรออกด้วยเทคนิคการกัดแบบไมโครเวฟพลาสมา[20][21]โดยในการกัดฟิล์มเพชรออกเราจะกัดจากด้านล่างซึ่งเป็นด้านที่ติดกับซิลิกอน ในการทดลองนี้เครื่องไมโครเวฟพลาสมามีอัตราการกัดฟิล์มเพชรประมาณ 0.2 ไมครอนต่อนาที ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนผสมกับออกซิเจนมีอัตราการไหลก๊าซ 50 มิลลิลิตรต่อนาที และควบคุมความดัน 8.5 ทอร์รี่ รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองการกัดแบบพลาสมาเพื่อลดความหนาของฟิล์มเพชร

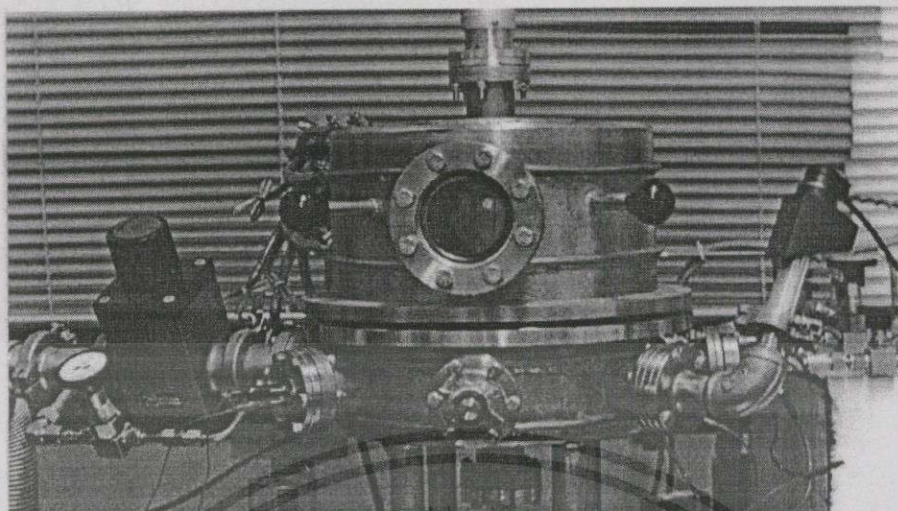


รูปที่ 4.6 แบบจำลองการกัดฟิล์มเพชรด้วยพลาสมา

#### 4.5 มาตรฐานและลำดับการสร้าง

##### 4.5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ฟิล์มเพชรถูกสังเคราะห์บนฐานรองซิลิกอนด้วยวิธีการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายเครื่องสร้างฟิล์มเพชร ฟิล์มเพชรสร้างบนฐานรองซิลิกอนโดยใช้แหล่งจ่ายเป็นไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและผสมด้วยสารละลายโบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) สำหรับสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็กทรีนซิก



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

#### 4.5.2 โฟโตคอนดักเตอร์

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบโฟโตคอนดักเตอร์บนฟิล์มเพชรมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.5.2.1 การเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น

ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดพีระนาบ (100) สภาพต้านทาน 18-22 โอห์ม-เซนติเมตร ความหนาแผ่นผลึก 420-430 ไมโครเมตร นำมาตัดให้ได้ขนาดกว้าง 1.2 เซนติเมตร และยาว 1.5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปทำความสะอาดพื้นผิวเริ่มต้น (initial clean) วิธีการทำความสะอาดเริ่มต้นผิวแผ่นซิลิคอนก่อนนำไปใช้งานแสดงในภาคผนวก ก.

##### 4.5.2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

นำแผ่นผลึกซิลิคอนที่เตรียมได้จากข้อ 4.5.2.1 มาขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 1 ไมครอน แล้วนำแผ่นซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าเสร็จแล้วไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง CVD จากนั้นนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มาทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารเคมีตามวิธีการที่แสดงในภาคผนวก ข.

##### 4.5.2.3 การเปิดมาสก์ขั้วโลหะ

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้นำมาเปิดมาสก์ขั้วโลหะ โดยใช้เทคนิคลิโทกราฟี (lithography) ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 4620 เป็นตัวป้องกันแสง ขั้นตอนของกระบวนการลิโทกราฟีมีดังนี้

1. เคลือบน้ำยาไวแสง AZ 4620 ด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 4600 รอบต่อนาที
2. อบฟิล์มให้แห้งที่อุณหภูมิ 95 ° C เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ฉายแสงหลังจากที่ซ้อนทับแบบเป็นที่ถูกต้องแล้ว เป็นเวลา 60 วินาที
4. ล้างภาพด้วยการจุ่มในสารละลาย AZ developer 2 ครั้ง ครั้งละ 120 วินาทีและ 60 วินาที

ตามลำดับ

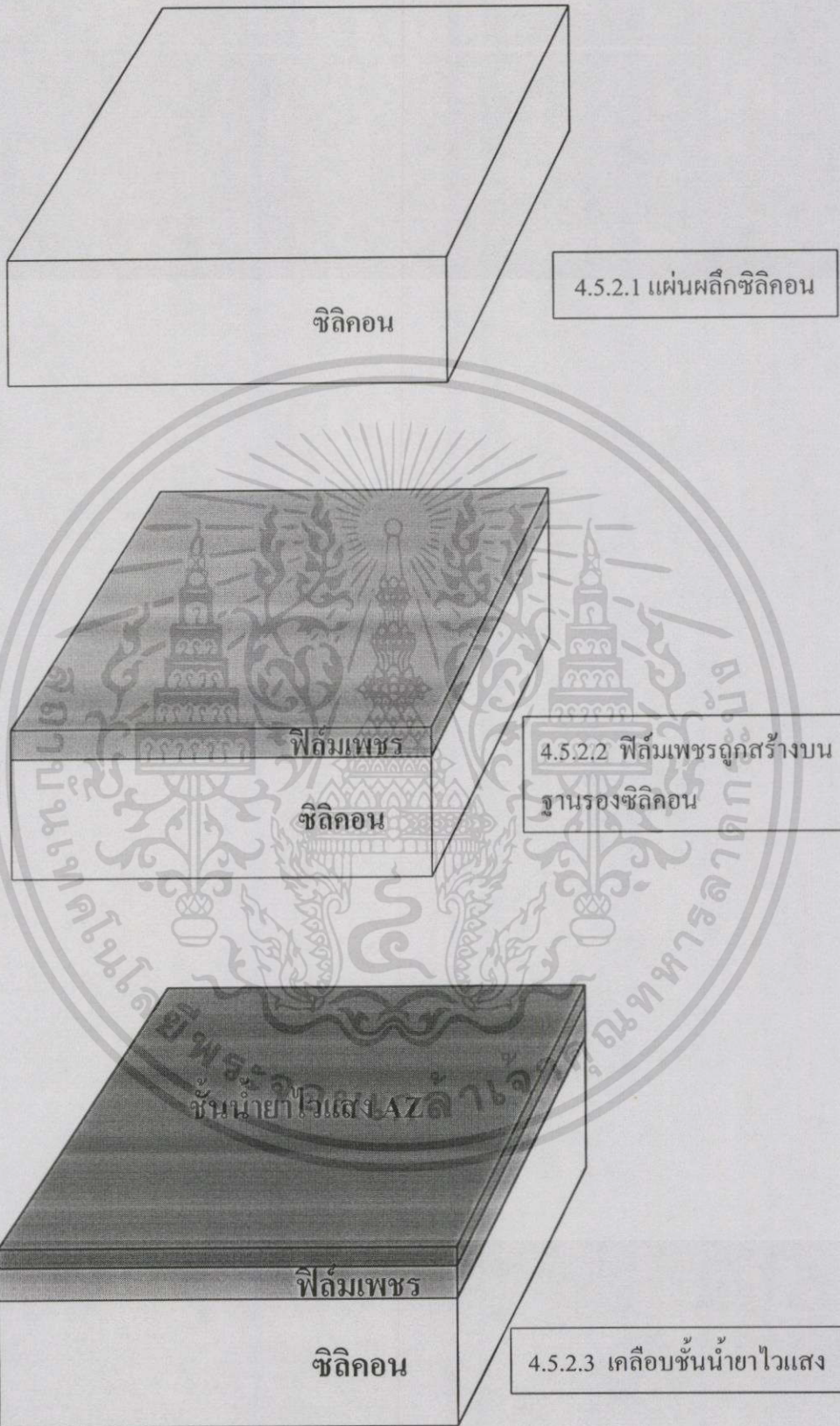
5. ล้างในน้ำบริสุทธิ์ และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
6. อบฟิล์มให้แห้งที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที

#### 4.5.2.4 การเคลือบชั้นโลหะในสุญญากาศ

ฟิล์มเพชรที่เคลือบด้วยน้ำยาไวแสงและเปิดมาสกแล้ว ถูกนำมาสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporator) โดยโลหะจะเคลือบทับทั้งส่วนที่เป็นน้ำยาไวแสงและส่วนที่เปิดมาสกเป็นช่องไว้

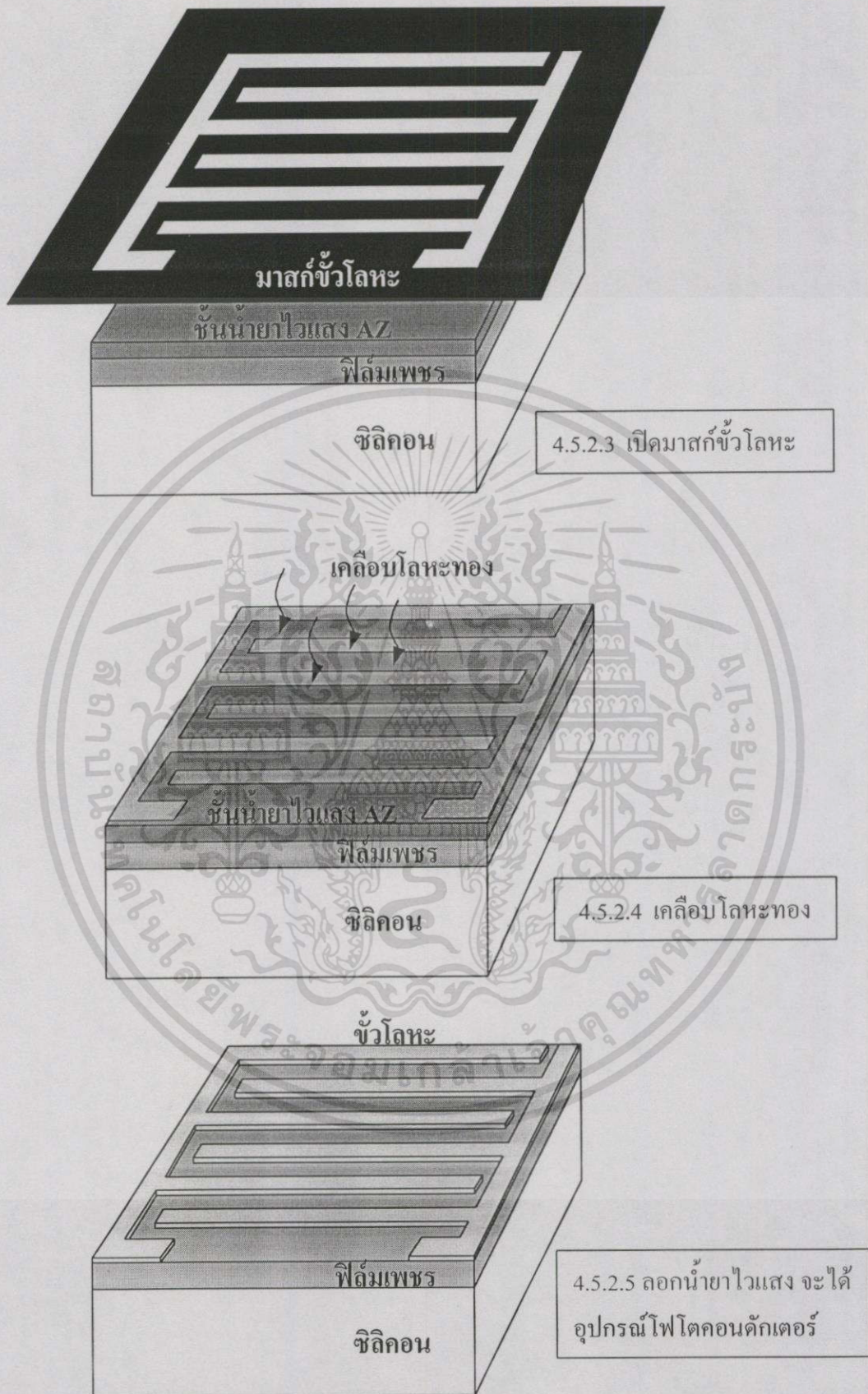
#### 4.5.2.5 การลอกชั้นน้ำยาไวแสง

ทำการลอกชั้นโลหะในส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้เทคนิคลิฟทออฟ (liftoff) ซึ่งเป็นวิธีการลอกชั้นน้ำยาไวแสงออกโดยใช้สารเคมีอะซิโตนเป็นตัวกัดชั้นน้ำยาไวแสงให้หลุดออกเหลือแต่ชั้นโลหะเป็นลวดลายตามที่ต้องการ รายละเอียดของเทคนิคการลิฟทออฟแสดงในภาคผนวก ก. ภาพจำลองขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์แสดงในรูปที่ 4.8 และภาพถ่ายอุปกรณ์ที่สร้างได้จากขั้นตอนข้างต้นแสดงในรูปที่ 4.9



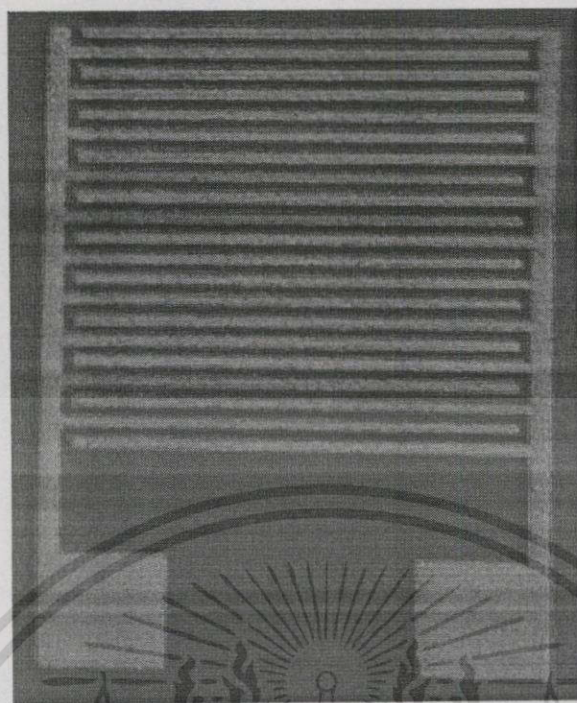
รูปที่ 4.8 ภาพจำลองขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. อุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์เดี่ยว



ข. อุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์สร้างบนฟิล์มเพชรขนาด  $1.2 \times 1.5 \text{ cm}^2$

#### รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5.3 ซอตต์กีโฟโตไดโอด

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบซอตต์กีไดโอด

#### 4.5.3.1 แผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

นำแผ่นซิลิคอนมาตัดให้ได้ขนาดกว้าง 1.2 เซนติเมตรและยาว 1.5 เซนติเมตร และทำความสะอาดพื้นผิวตามวิธีการในภาคผนวก ก. จากนั้นสร้างชั้นออกไซด์หนาประมาณ 7000 อังสตรอม เพื่อเป็นชั้นป้องกันการกัดด้วยสารเคมีในขั้นตอนการสร้างไดอะเฟรม

#### 4.5.3.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

แผ่นซิลิคอนที่สร้างชั้นออกไซด์ถูกนำมาลอกชั้นออกไซด์ด้านหน้าซิลิคอนที่ผิวขัดมันออก จากนั้นขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 1 ไมครอน แล้วนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง CVD

#### 4.5.3.3 การกัดไดอะเฟรม

นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มากัดไดอะเฟรมตามทีออกแบบไว้ด้วยสารละลาย EPD โดยมีชั้นออกไซด์เป็นตัวป้องกันส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาการกัด

#### 4.5.3.4 การเคลือบโลหะอลูมิเนียม

นำฟิล์มเพชรที่กัดเป็นไดอะเฟรมเรียบร้อยแล้วมาสร้างรอยต่อซอตต์กีบริเวณด้านล่าง โดยใช้วิธีการเคลือบโลหะอลูมิเนียมในสุญญากาศ จากนั้นนำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร ต่อ นาที เป็นเวลา 10 นาที

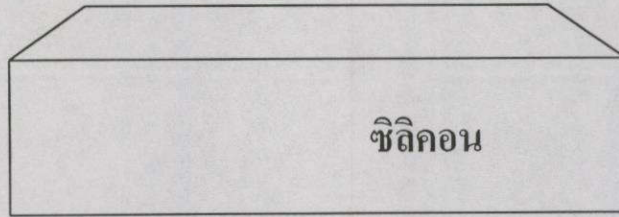
#### 4.5.3.5 การเคลือบขั้วโลหะทองคำ

นำฟิล์มเพชรที่สร้างได้จากข้อ 4.5.3.4 มาสร้างขั้วไฟฟ้าทองคำด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ โดยอาศัยเทคนิคลิโทกราฟีใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ เป็นตัวป้องกันเพื่อให้ได้ลวดลายตามที่ออกแบบไว้

#### 4.5.3.6 การลอกชั้นน้ำยาไวแสง

นำฟิล์มเพชรที่เคลือบโลหะทองคำแล้ว มาลอกชั้นน้ำยาไวแสง AZ ออกด้วยวิธีลิฟออฟโดยใช้สารเคมีอะซิโตนเป็นตัวทำปฏิกิริยาซึ่งจะได้ขั้วโลหะทองเป็นลวดลายตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร ต่อ นาที เป็นเวลา 10 นาที

รูปที่ 4.10 แสดงภาพจำลองขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ซอตต์กีโฟโตไดโอด รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายไดอะเฟรมฟิล์มเพชร และรูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์ซอตต์กีโฟโตไดโอดที่สร้างได้ตามวิธีการข้างต้น



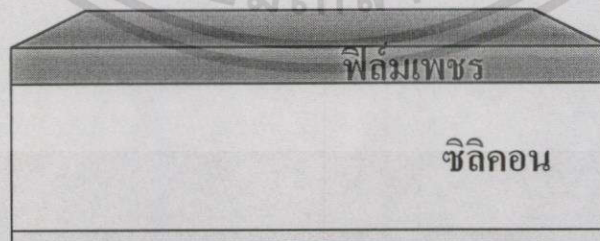
4.5.3.1 แผ่นชิลิคอนเริ่มต้น



4.5.3.1 สร้างชั้นออกไซด์



4.5.3.2 ลอกชั้นออกไซด์ด้านหน้าออก

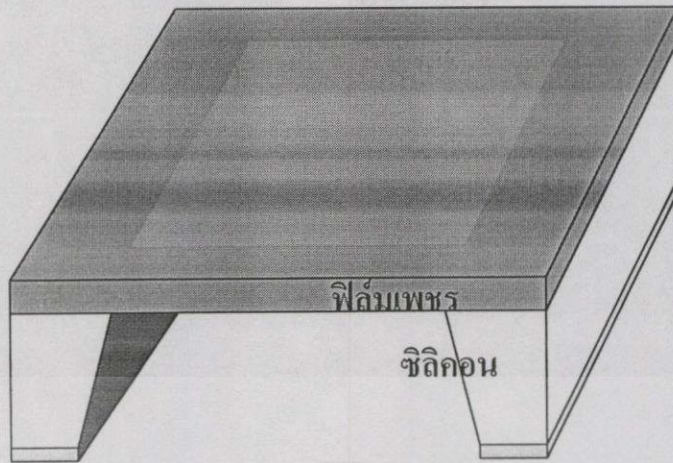


ชั้นออกไซด์

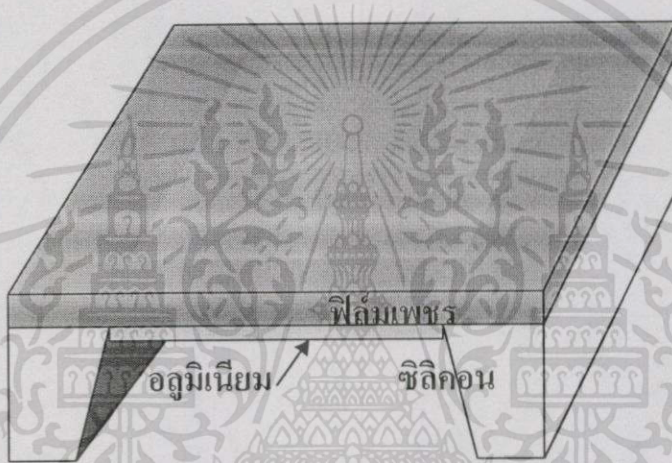
4.5.3.2 สร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองชิลิคอน

รูปที่ 4.10 ภาพจำลองขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ขอตักกีโฟโตไดโอด

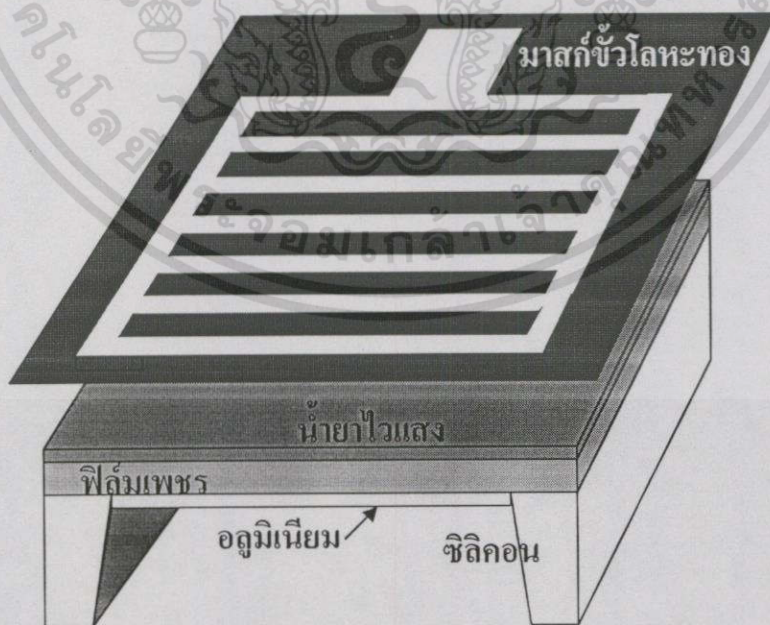
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.5.3.3 กัดซิลิคอนออกเหลือแต่ไดอะเพรมฟิล์มเพชร



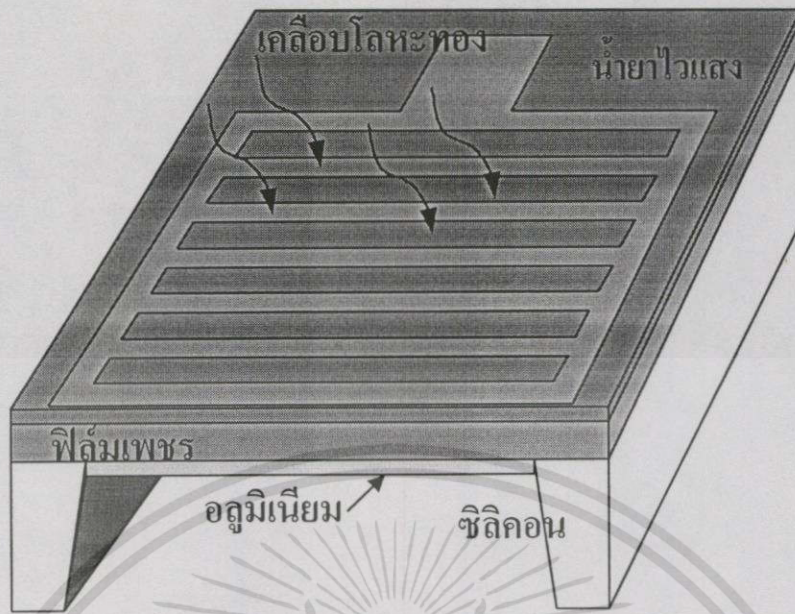
4.5.3.4 เคลือบโลหะอลูมิเนียมค้ำล่าง



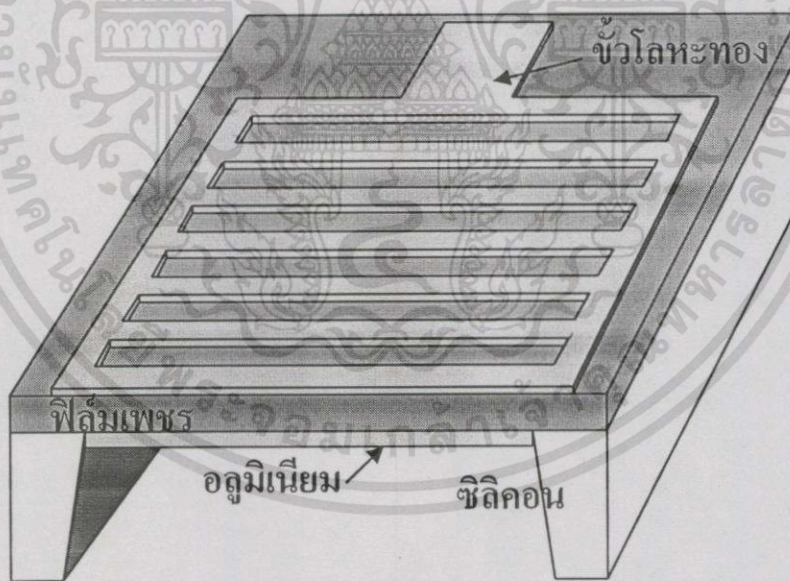
4.5.3.5 เปิดมาสก์ขั้วโลหะทอง

รูปที่ 4.10 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



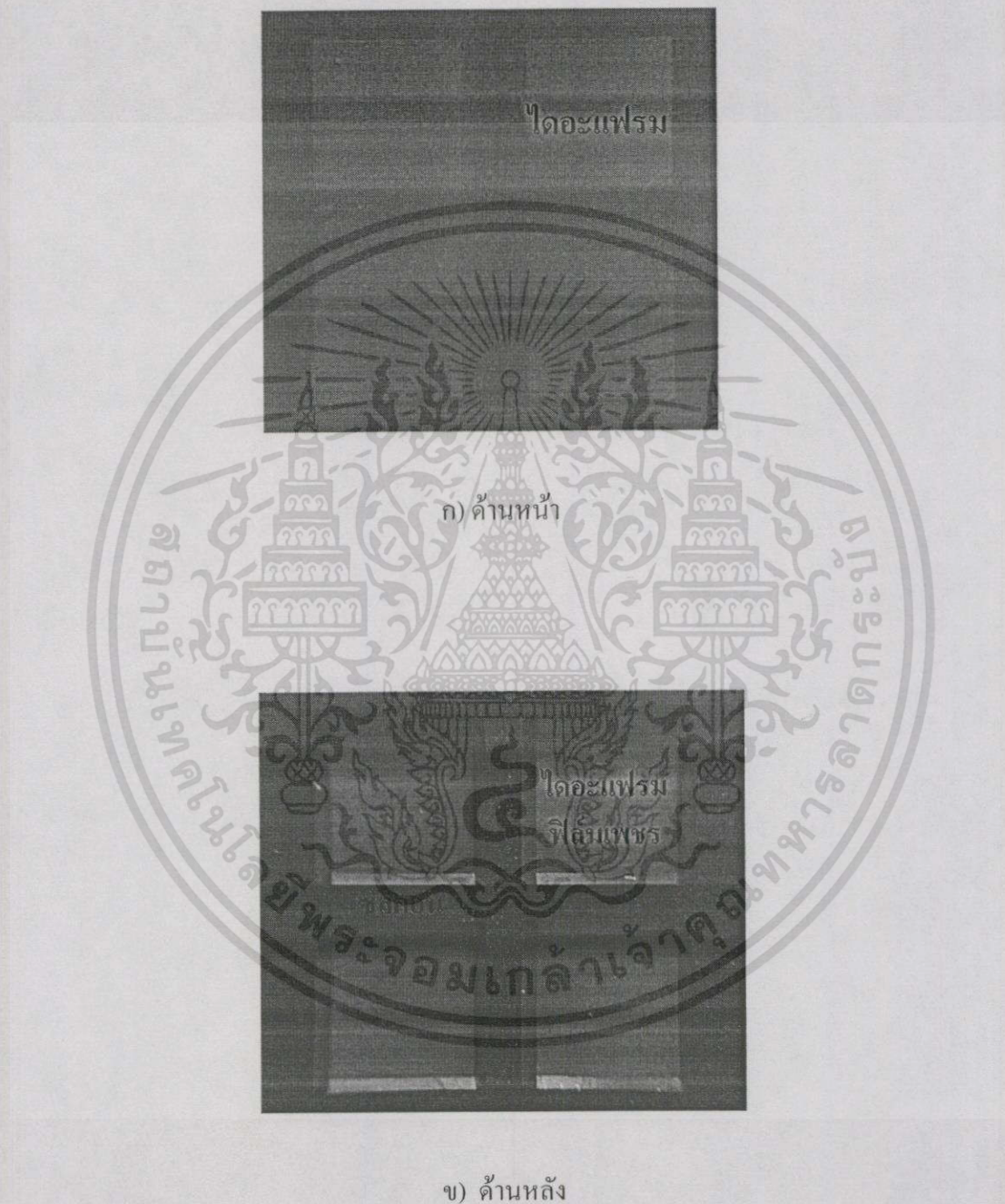
4.5.3.5 เคลือบโลหะทองแล้วนำไปลิฟทออฟ



4.5.3.6 อุปกรณ์ซอตต์กีโฟโตไดโอดที่สร้างเสร็จแล้ว

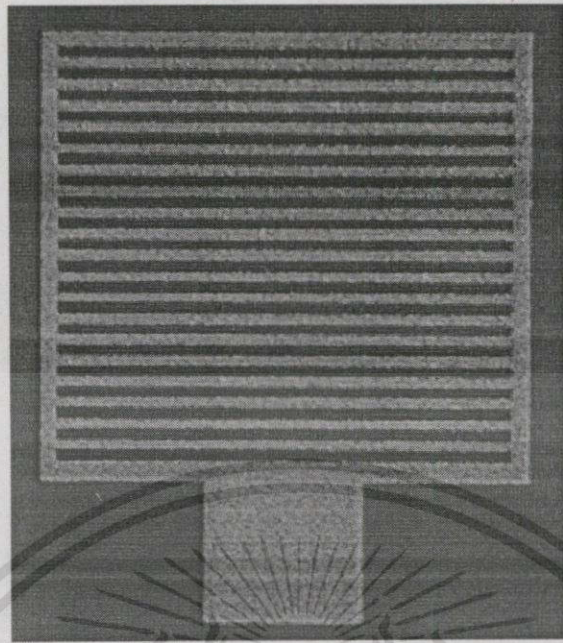
รูปที่ 4.10 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

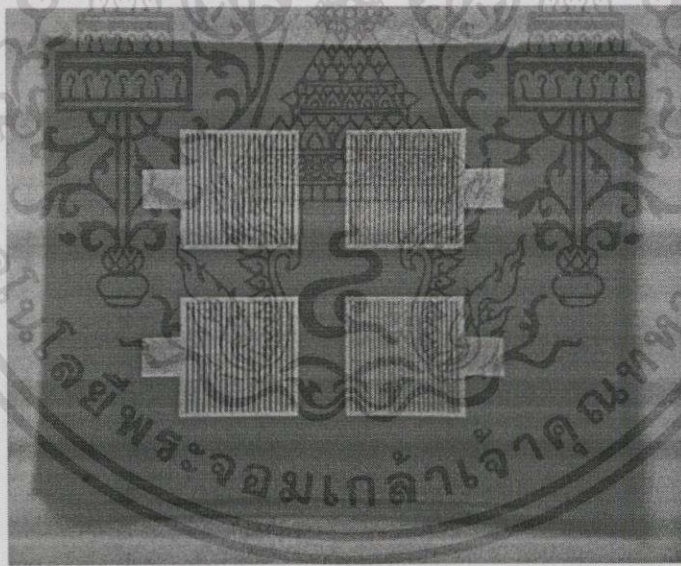


รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายไดอะแฟรมฟิล์มเพชรที่เกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอนด้วยสารละลาย EPD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) อุปกรณ์เดี่ยว



จ. อุปกรณ์ชนิดตัดตีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรขนาด  $1.2 \times 1.5 \text{ cm}^2$

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายอุปกรณ์ชนิดตัดตีโฟโตไดโอดที่สร้างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

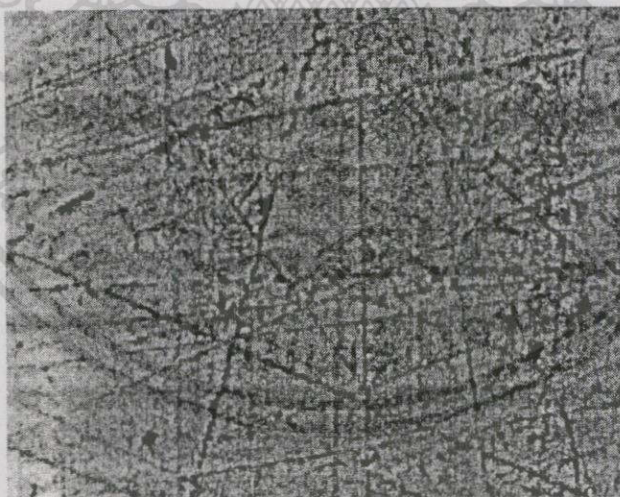
### การทดลองและผลการทดลอง

#### 5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการ CVD แบบลวดความร้อนที่ความดันต่ำ ฟิล์มเพชรถูกสร้างบนฐานรองซิลิกอน โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและผสมด้วยสารละลายโบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) สำหรับฟิล์มเพชรชนิดเอกซ์ทรีนซิก รายละเอียดวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแสดงในหัวข้อต่อไป

##### 5.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิกอน

ฟิล์มเพชรถูกสร้างลงบนฐานรองซิลิกอนที่ทำการขีดผิวหน้า (scratch) ด้วยครีมเพชร สาเหตุที่ต้องขีดผิวหน้าของซิลิกอนด้วยครีมเพชรก่อนนำไปสร้างฟิล์มเพชรนั้น ก็เพื่อให้ง่ายต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชร โดยการเกิดเพชรจะเริ่มต้นเกิดที่รอยขีดก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ การสร้างฟิล์มเพชรในการทดลองนี้เราใช้ฐานรองเป็นซิลิกอนระนาบ (100) ขีดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 1 ไมครอน ภาพซิลิกอนที่ขีดผิวหน้าแล้วแสดงในรูปที่ 5.1 จากนั้นจึงนำซิลิกอนที่ขีดผิวหน้าเรียบร้อยแล้วไปเข้าเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

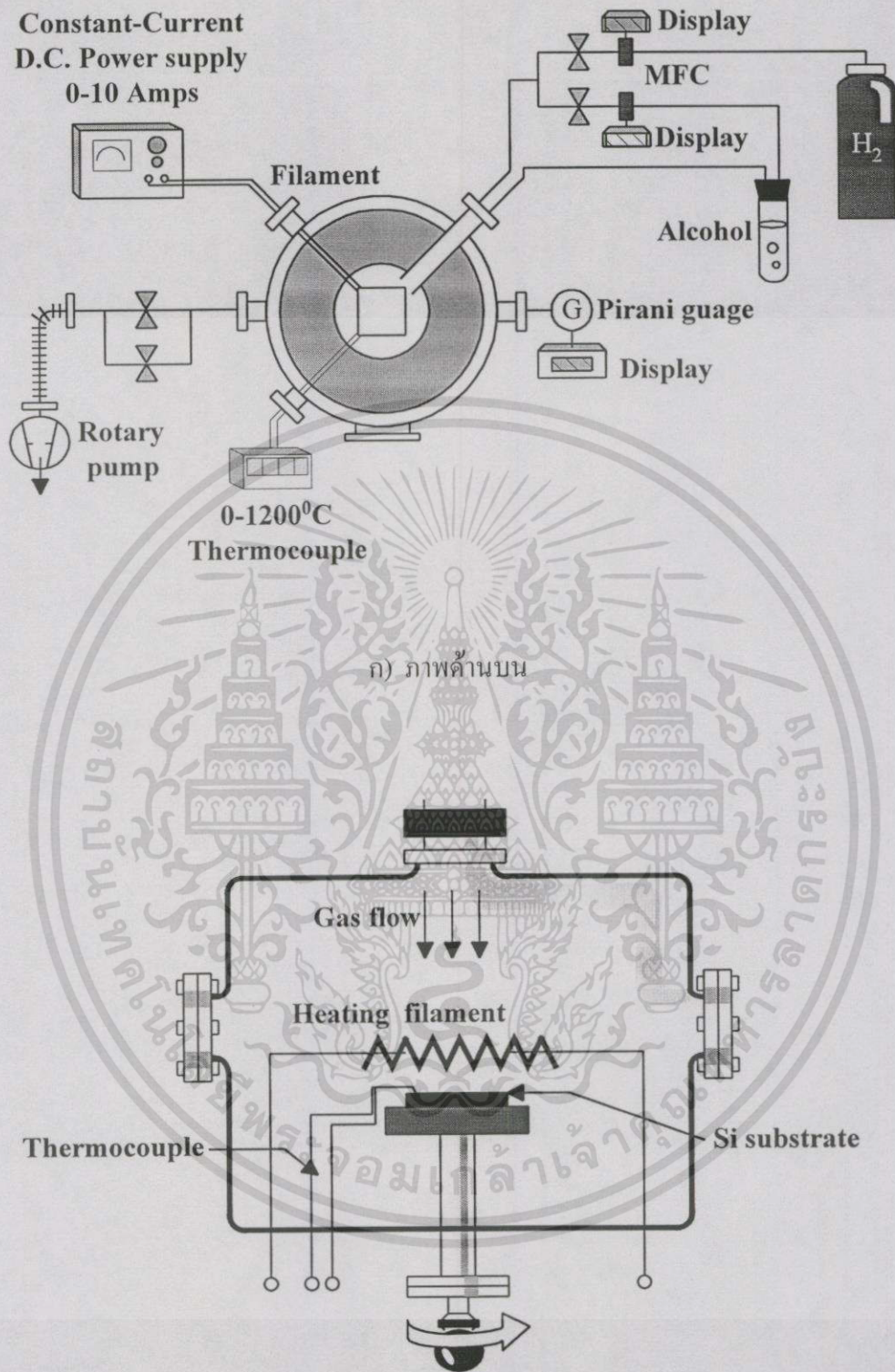


รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขีดด้วยครีมเพชร

##### 5.1.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

แผนภาพไดอะแกรมของระบบเครื่องสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบลวดความร้อนที่ความดันต่ำแสดงในรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ภาพด้านบน

ข) ภาพตัดขวางด้านหน้า

รูปที่ 5.2 แผนภาพไอโซแกรมของระบบเครื่องสร้างฟิล์มเพชร ก) ภาพด้านบน ข) ภาพตัดขวางด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการCVDแบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ ระยะห่างระหว่างไส้ทั้งสแตงกับฐานรองซิลิคอนจะมีผลต่อขนาดของเม็ดผลึกเพชร โดยที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์เท่ากัน จากการทดลองพบว่าถ้าลดระยะห่างระหว่างไส้ทั้งสแตงกับฐานรองซิลิคอนลงจะทำให้ขนาดของเม็ดผลึกเพชรใหญ่ขึ้น โดยในการทดลองระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยระบบนี้คือ 3 มิลลิเมตร เนื่องจากฐานรองซิลิคอนจะอยู่ใกล้กับลดทั้งสแตงมากโดยบริเวณนี้จะมีความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัวมากทำให้การก่อตัวเป็นผลึกเพชรเกิดขึ้นได้เร็ว ในขณะที่ระยะห่างจากไส้ทั้งสแตงมากขึ้นความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัวจะลดลงทำให้การก่อตัวของผลึกเพชรช้าลงด้วย สำหรับระยะห่างต่ำกว่า 3 มิลลิเมตรลงมา จะเกิดการแพร่กระจายของอุณหภูมิของไส้ลดทั้งสแตงมายังฐานรองซิลิคอนมากทำให้อุณหภูมิต่ำลงสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส อีกทั้งความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัวมีปริมาณมากทำให้ได้ผลึกเพชรรูปร่างเป็นแบบบอล (ball shape)

นอกจากนี้ในการทดลองพบว่าความดันที่ใช้ในขณะที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะมีผลต่อขนาดพื้นของฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอน ผลการทดลองพบว่าที่ความดันต่ำการกระจายตัวของฟิล์มเพชรจะได้พื้นที่มากกว่าที่ความดันสูง ทั้งนี้เนื่องจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำช่วงอายุ(lift time) ของก๊าซที่แตกตัวจะมีค่ามากกว่าช่วงอายุของก๊าซแตกตัวที่ความดันสูง ดังนั้นที่ความดันต่ำจะทำให้การเกิดนิวเคลียสสามารถกระจายตัวได้บริเวณกว้าง ทำให้ได้พื้นที่ฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในขณะเดียวกันถ้าความดันต่ำเกินไปก็จะทำให้อัตราการเกิดผลึกเพชรลดลงเนื่องจากปริมาณก๊าซที่จะเกิดปฏิกิริยาตกลงทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์นานขึ้น ในการทดลองพบว่าค่าความดันที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 150 ทอร์ สำหรับอัตราส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่อไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์จะเป็นตัวแปรสำคัญในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนปริมาณของเอทิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม คือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จะได้ฟิล์มเพชรที่มีปริมาณของคาร์บอนกราฟไฟท์และอะมอร์ฟัสคาร์บอนน้อยลง

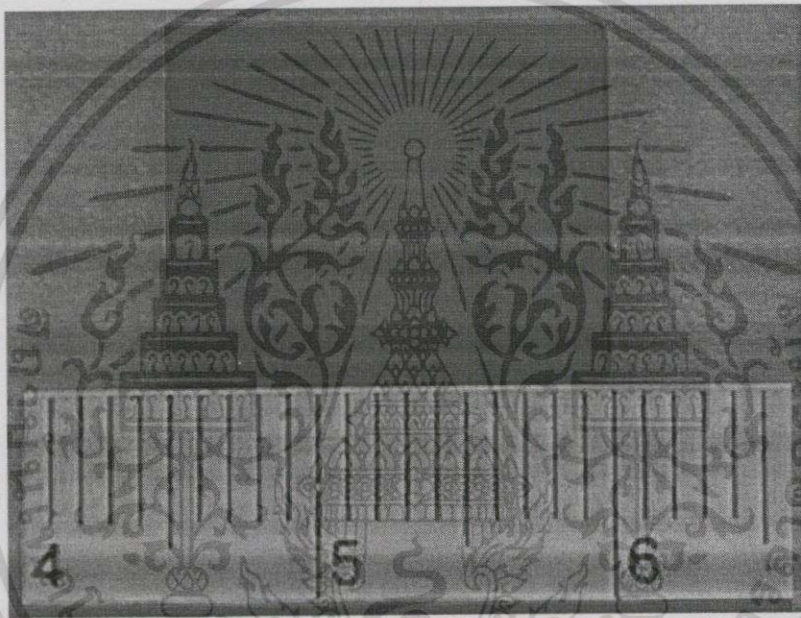
ฟิล์มเพชรที่ใช้นามาสร้างเป็นอุปกรณ์ต่างๆในการวิจัยนี้จะสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนโดยใช้แหล่งจ่ายเป็นไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์สำหรับฟิล์มชนิดอินทรีนซิกและผสมด้วยสารละลายโบรอนไดรอกไซด์ ( $B_2O_3$ ) สำหรับสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็กซ์ทรีนซิก โดยมีอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนเป็น 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm ( วิธีการคำนวณอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนแสดงในภาคผนวก ง ) โดยมีเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรดังนี้ [22]

1. อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส วัดด้วย thermocouple ที่สัมผัสอยู่บนผิวของฐานรองซิลิคอน
2. อุณหภูมิไส้ทั้งสแตง 2000 องศาเซลเซียส วัดด้วยกล้องวัดอุณหภูมิแบบ portable radiation thermometer ของ CHINO
3. ระยะห่างระหว่างไส้ลดทั้งสแตงกับฐานรองซิลิคอน 3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 50-100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ควบคุมโดย mass flow controller (MFC)
5. อัตราการไหลของแอลกอฮอล์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ควบคุมโดย mass flow controller (MFC)
6. ควบคุมความดันที่ 150 ทอร์ วัดด้วย pirani guage
7. เวลาในการสร้างฟิล์ม 3 ชั่วโมง ได้ฟิล์มเพชรพื้นที่ขนาด 1.2 x 1.5 ตารางเซนติเมตร ความหนาประมาณ 8 ไมโครเมตร

อัตราการก่อตัวของผลึกเพชรประมาณ 0.045 ไมครอนต่อนาที ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ แสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ (ระยะเวลาสังเคราะห์ฟิล์ม 3 ชั่วโมง ความหนาฟิล์ม 8 ไมครอน พื้นที่ขนาด 1.2 x 1.5 cm<sup>2</sup>)

## 5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้

นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ตามวิธีการในหัวข้อ 5.1 มาศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่สร้างได้ โดยแบ่งออกเป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง SEM และการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยรามานสเปกโทรสโคปี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 5.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ CVD ถูกนำมาถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของฟิล์มเพชรทั้งชนิดอินทรีนซิกและเอกซ์ทรีนซิก แสดงในรูปที่ 5.4 จากภาพถ่าย SEM ฟิล์มเพชรมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบระนาบ (111) และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

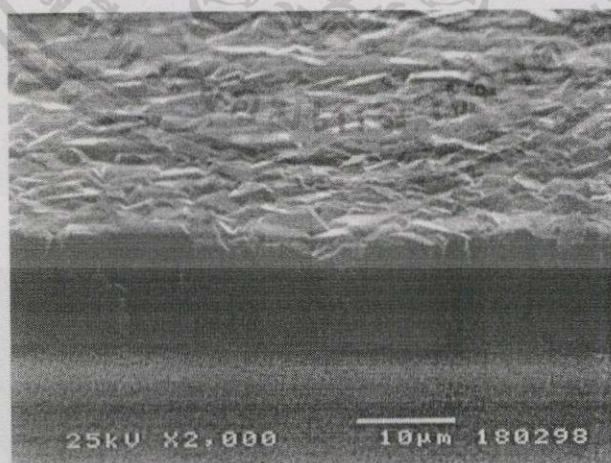
ลักษณะโครงสร้างฟิล์มเพชรจะเหมือนกันทั้งชนิดอินทรีนซิกและชนิดที่เติมอะตอมสารเจือโบรอน ซึ่งแสดงว่าการผสมโบรอน ไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) กับเอทิลแอลกอฮอล์จะไม่ีผลรบกวนต่อการก่อผลึกของเพชร ดังนั้นจึงได้ฟิล์มเพชรชนิดเอกซ์ทรีนซิกที่มีลักษณะภายนอกเหมือนกับชนิดอินทรีนซิกทุกประการเพียงแต่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นฟิล์มเพชรชนิดพีเท่านั้น นอกจากนี้ภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มเพชรซึ่งแสดงในรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างของฟิล์มเพชรที่เป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ ซึ่งประกอบไปด้วยผลึกหลายๆผลึกเรียงต่อกันและมีเส้นพรมแดนของผลึก (grain boundary) จำนวนมาก



ก) อินทรีนซิก

ข) เอกซ์ทรีนซิก

รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและเอกซ์ทรีนซิกด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 3500 เท่า (ระยะเวลาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร 2 ชั่วโมง 15 นาที ความหนาประมาณ 6 ไมครอน)



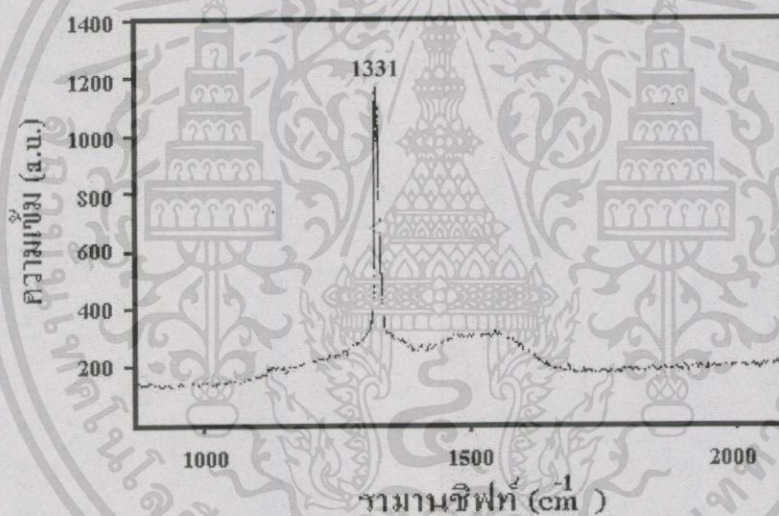
รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายตัดขวางฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 2000 เท่า

(ระยะเวลาสังเคราะห์ฟิล์มเพชร 3 ชั่วโมง ได้ความหนาประมาณ 8 ไมครอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยรามานสเปกโทรสโคปี

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโคปีเพื่อพิสูจน์ว่ามีคุณสมบัติเป็นเพชรหรือไม่ โดยสเปกตรัมรามานนั้นสามารถแยกชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชร กราไฟท์ และอะมอร์ฟัสได้ โดยปกติเพชรธรรมชาติจะมียอดของสเปกตรัมรามานเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $1332\text{ cm}^{-1}$  ดังนั้นถ้าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรจะต้องมียอดของสเปกตรัมรามานใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ รูปที่ 5.6 แสดงสเปกตรัมรามานของฟิล์มเพชรชนิดเอกซ์ทรินซิก (1000 ppm) จากกราฟพบว่าสเปกตรัมรามานของฟิล์มเพชรมียอดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่ง  $1331\text{ cm}^{-1}$  ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยรามานสเปกโทรสโคปีจึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรจริงและในการทดลองพบว่าสเปกตรัมรามานของฟิล์มเพชรทั้งชนิดอินทรินซิกและเอกซ์ทรินซิกจะมียอดของสเปกตรัมค่าใกล้เคียงกัน

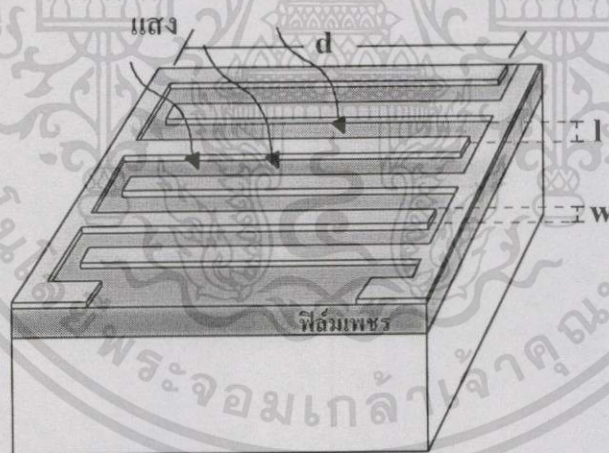


รูปที่ 5.6 สเปกตรัมรามานของฟิล์มเพชร

### 5.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชรด้วยอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์

#### 5.3.1 ผลการตอบสนองสเปกตรัมแสงของฟิล์มเพชร

โดยปกติวัสดุจะมีผลการตอบสนองไม่เท่ากันถ้าความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในการนำสารกึ่งตัวนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงจึงจำเป็นต้องทราบช่วงสเปกตรัมแสงที่สารกึ่งตัวนำชนิดนั้นให้การตอบสนองได้ดี ทั้งนี้เพื่อจะได้นำอุปกรณ์ไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมในสารกึ่งตัวนำพลังงานโฟตอนของแสงที่จะถูกดูดกลืนและทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้จะต้องมีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน( $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำ และตามทฤษฎีการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ ถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่าน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะไม่เกิดการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นแสงที่จะถูกดูดกลืนได้ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\frac{hc}{E_g}$  หรือ  $\frac{1240}{E_g} (nm)$  ในกรณีของฟิล์มเพชรซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 5.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นค่าพลังงานโฟตอนของแสงที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้จะต้องมีค่ามากกว่า 5.5 อิเล็กตรอน โวลต์ หรือที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 225 นาโนเมตร



รูปที่ 5.7 ภาพจำลองโครงสร้างอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์

การศึกษาผลการตอบสนองสเปกตรัมแสงของฟิล์มเพชรที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยใช้ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกสร้างเป็นโครงสร้างแบบโฟโตคอนดักเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.7 อุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์มีขนาดความกว้าง 3 มิลลิเมตร ยาว 3 มิลลิเมตร มีความกว้างขั้วโลหะทองคำ( $W$ )

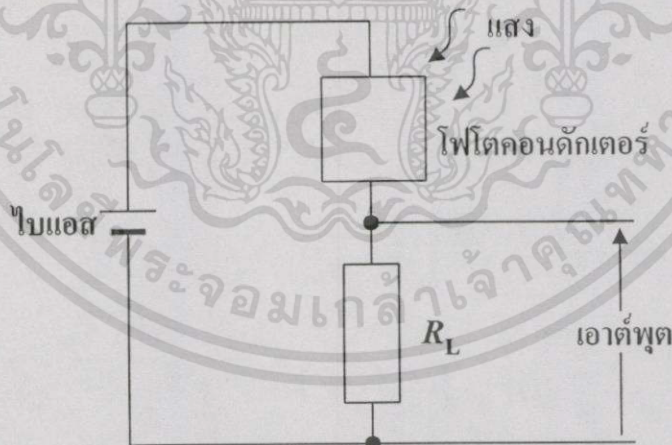
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20 ไมโครเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ( $L$ ) เท่ากับ 20 ไมโครเมตร มีความยาวของขั้วโลหะ ( $d$ ) เท่ากับ 2980 ไมโครเมตร และมีพื้นที่รับแสง 3.99 ตารางมิลลิเมตร

นำอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์มาฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 180 ถึง 800 นาโนเมตร เลือกความยาวคลื่นแสงด้วยเครื่องโมนโครมาเตอร์ (monochromator) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดควิเทอริียม (deuterium lamp) ความเข้มแสง  $0.8 \text{ mW/cm}^2$  ไบแอสแรงดันระหว่างขั้วโลหะ 10 โวลต์ และใช้ความต้านทานโหลด ( $R_L$ )  $3k\Omega$  รูปที่ 5.8 แสดงแผนภาพวิธีการต่อชุดเครื่องมือวัดทางแสงและรูปที่ 5.9 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชร

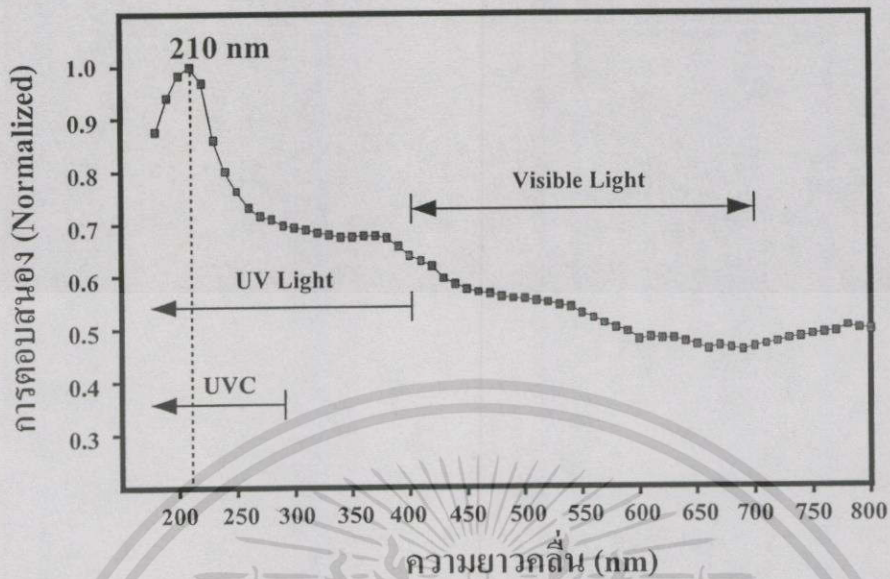


รูปที่ 5.8 แผนภาพการต่อชุดเครื่องมือวัดทางแสง



รูปที่ 5.9 แผนภาพแสดงการต่อวงจรวัดอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

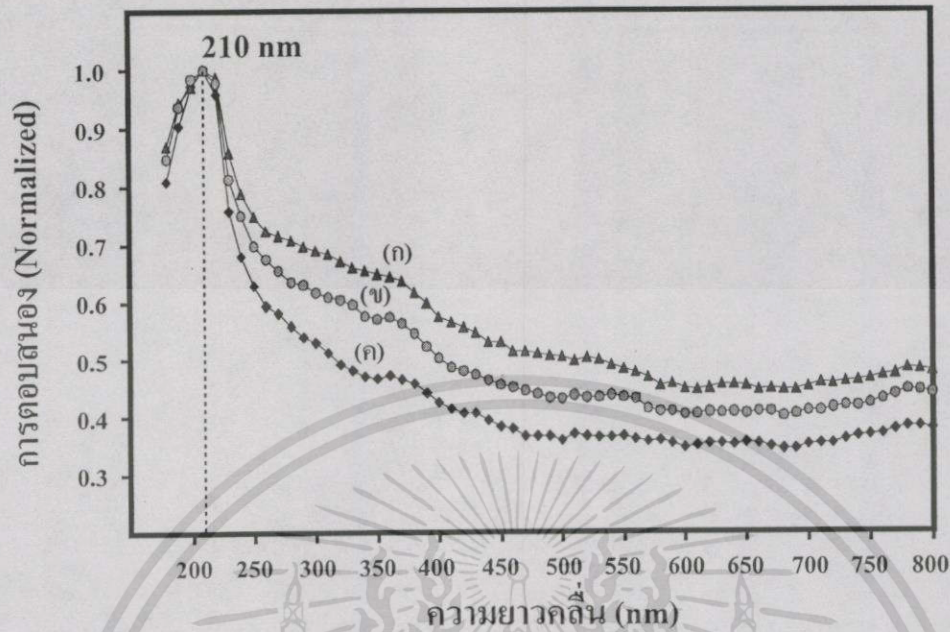


รูปที่ 5.10 สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

ผลการศึกษาสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชรโดยใช้อุปกรณ์แบบโฟโตคอนดักเตอร์แสดงในกราฟรูปที่ 5.10 พบว่าฟิล์มเพชรมีการตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดีกว่าความยาวคลื่นช่วงตามองเห็น โดยเฉพาะช่วงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 270 นาโนเมตรจะให้การตอบสนองได้ดี ดังนั้นในการนำฟิล์มเพชรไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงจึงควรนำไปใช้ใน ช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่นสั้น (deepUV) ย่านของ UVC (ความยาวคลื่นน้อยกว่า 280 นาโนเมตร) และจากกราฟสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชรพบว่าจุดสูงสุดของการตอบสนองอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 210 นาโนเมตร ในหัวข้อต่อไปเราจะศึกษาสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชรที่มีการเติมอะตอมสารเจือโบรอน

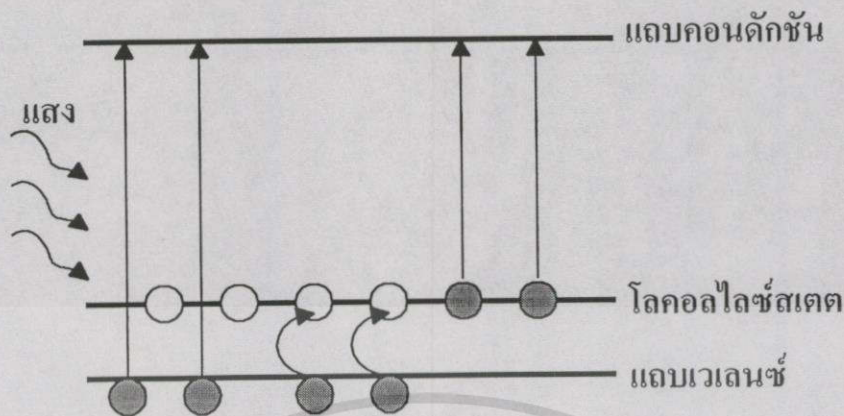
### 5.3.2 ผลการเติมอะตอมสารเจือโบรอนที่มีต่อการตอบสนองสเปกตรัมแสงของฟิล์มเพชร

ฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือโบรอนในอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอน 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm ถูกนำมาสร้างเป็นโครงสร้างแบบโฟโตคอนดักเตอร์โดยมีขนาดเท่ากับอุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก จากนั้นนำมาฉายด้วยแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยไบแอสแรงดันระหว่างขั้วโลหะ 10 โวลต์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชร ก)10 ppm ข)100 ppm และค)1000 ppm

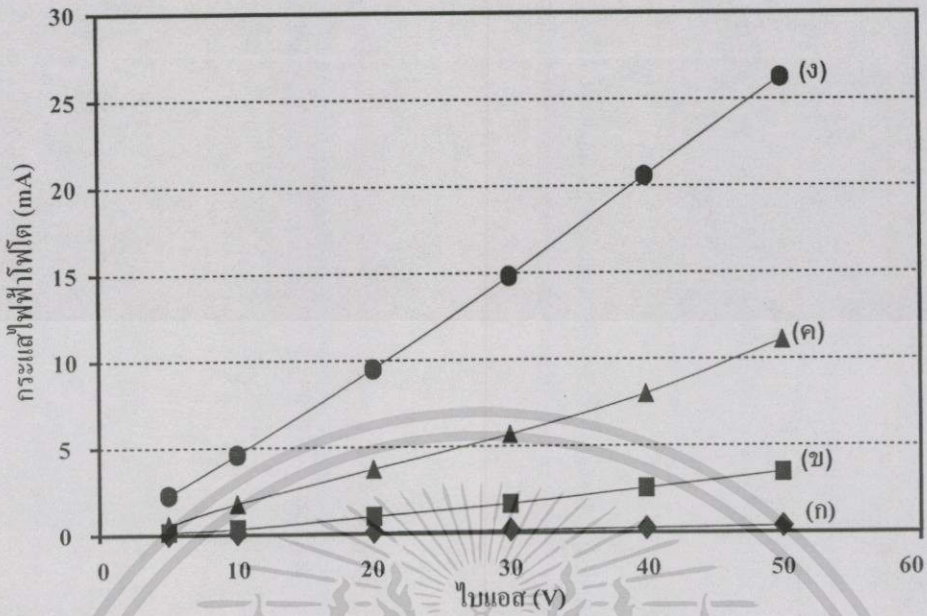
จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแตกต่างระหว่างการตอบสนองต่อแสงช่วงอัลตราไวโอเลตกับการตอบสนองต่อแสงในช่วงตามองเห็นมีค่าต่างกันมากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการตรวจวัดแสงเฉพาะช่วงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่นสั้นสาเหตุที่ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นอะตอมสารเจือโบรอนแล้วฟิล์มเพชรมีการตอบสนองต่อแสงเฉพาะช่วงอัลตราไวโอเลตเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากการเติมอะตอมสารเจือโบรอนทำให้เกิดระดับพลังงาน โคลอโลคัลไลซ์สเตต (localized states) ขึ้นบริเวณเหนือแถบเวเลนซ์ดังแสดงในรูปที่ 5.12 และระดับพลังงาน โคลอโลคัลไลซ์ก็มีค่าใกล้เคียงกับแถบเวเลนซ์ของฟิล์มเพชร[23] ทำให้พลังงานโฟตอนตกกระทบที่มีค่าใกล้เคียงช่องว่างแถบพลังงานสามารถกระตุ้นให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้มากขึ้น ในขณะที่ความยาวคลื่นมากหรือค่าพลังงานโฟตอนต่ำจะไม่สามารถกระตุ้นให้เกิดคู่พาหะได้ ดังนั้นจึงทำให้การตอบสนองบริเวณใกล้เคียงกับช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มมากขึ้นในขณะที่การตอบสนองในช่วงอื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า



รูปที่ 5.12 แผนภาพจำลองแถบพลังงาน โลคอลไลซ์สเตต

### 5.3.3 การไบแอสแรงดันกับปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโต

ในหัวข้อที่แล้วเราได้ศึกษาเกี่ยวกับสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชรทั้งชนิดอินทรีนซิกและเอกซ์ทรีนซิก ซึ่งพบว่าฟิล์มเพชรทั้งสองชนิดให้การตอบสนองที่ดีต่อแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่นสั้น ในขณะที่ให้การตอบสนองต่ำกับความยาวคลื่นแสงตามองเห็น ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำฟิล์มเพชรมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเลต โดยปกติอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ดีควรมีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากแสงในปริมาณสูงๆ เพราะจะทำให้อุปกรณ์ยังสามารถใช้งานได้ในปริมาณความเข้มแสงต่ำๆ ดังนั้นในหัวข้อนี้เราจะศึกษาการเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบโฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบแอสขั้วไฟฟ้าทั้งสอง นำฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและเอกซ์ทรีนซิกที่สร้างเป็นอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์มาฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นที่ตรงกับยอดสูงสุดของสเปกตรัมการตอบสนอง และทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบแอสที่ขั้วโลหะตั้งแต่ 5 โวลต์จนถึง 50 โวลต์ เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสที่มีต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตของอุปกรณ์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตกับค่าแรงดันไบแอส

ก) อินทรีนซิก ข) 10 ppm ค) 100 ppm และ ง) 1000 ppm

จากการทดลองในรูปที่ 5.13 ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแรงดันไบแอสสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$I_p = \Delta\sigma \frac{wd}{l} V \tag{5.1}$$

เมื่อ  $I_p$  คือ กระแสไฟฟ้าโฟโต

$\Delta\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อรับแสง

โดยที่

$$\Delta\sigma = qG_0\tau_n(\mu_n + \mu_p) \tag{5.2}$$

และ

$$G_0 = \frac{\alpha P_{op}}{h\omega} \tag{5.3}$$

เมื่อ  $G_0$  คือ อัตราการเกิดพาหะ

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$P_{op}$  คือ ความเข้มแสงตกกระทบ

$\omega$  คือ ความถี่แสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเมื่อฉายแสงให้กับอุปกรณ์ที่ความยาวคลื่นแสงคงที่ค่าหนึ่งค่า  $\Delta\sigma$  จะมีค่าคงที่ เนื่องจากที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่งอัตราการเกิดพาหะจะมีค่าคงที่เมื่อความเข้มแสงตกกระทบคงที่ ส่วนตัวแปรอื่นๆที่เป็นขนาดของอุปกรณ์ก็มีค่าคงที่เช่นกัน ดังนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสจะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพาหะที่เกิดจากแสงจะถูกเร่งด้วยค่าสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วที่เพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณพาหะเดินทางไปถึงขั้วไฟฟ้าได้มากขึ้นก่อนจะมีการรวมตัวกัน (recombination) สำหรับค่ากระแสไฟฟ้ามีคี่เช่นเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสปริมาณกระแสไฟฟ้ามีคี่จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังสมการ(5.2)

$$I_d = \sigma_0 \frac{wd}{l} V \quad (5.4)$$

เมื่อ  $I_d$  คือ กระแสไฟฟ้ามีคี่

$\sigma_0$  คือ สภาพนำไฟฟ้าเมื่อไม่ได้รับแสง

จากการทดลองพบว่าการเพิ่มแรงดันไบแอสขั้วไฟฟ้าจะทำให้ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์สามารถนำไปใช้งานได้ที่ความเข้มแสงต่ำๆ แต่ในขณะเดียวกันก็เป็น การสิ้นเปลืองพลังงานและยังมีข้อเสีย คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้ามีคี่จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันซึ่งจะทำให้ การตรวจวัดแสงมีสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 5.13 พบว่าที่แรงดันไบแอสคงที่ค่าหนึ่งเมื่อปริมาณ อนุกรมสารเจือโบรอนมากขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตมากขึ้นด้วย แต่ก็ทำให้ปริมาณ กระแสไฟฟ้ามีคี่เพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ามีคี่กับปริมาณความ เข้มข้นของอนุกรมสารเจือโบรอนกระแสไฟฟ้ามีคี่จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอนุกรมสารเจือโบรอนเพิ่ม ขึ้น เนื่องจากค่าสภาพความนำไฟฟ้าเมื่อไม่ได้รับแสงของฟิล์มเพชรที่มีอนุกรมโบรอนในปริมาณ มากจะมีค่าสูงซึ่งสอดคล้องกับสมการ

$$\sigma_0 = q(n_0)\mu_e + q(p_0)\mu_h \quad (5.5)$$

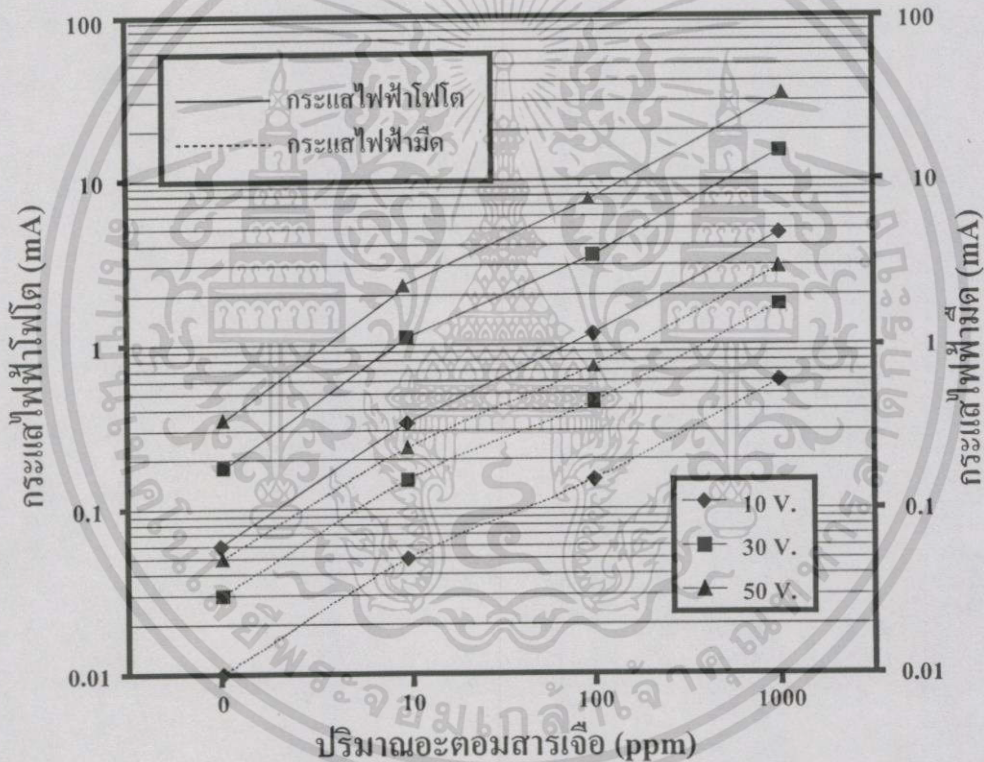
เมื่อ  $n_0, p_0$  คือ จำนวนประจุพาหะอิเล็กตรอนและ โฮลตามลำดับ เมื่อไม่ได้รับแสง

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีคี่กับปริมาณความเข้มข้น อนุกรมสารเจือโบรอน แสดงในกราฟรูปที่ 5.14 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณอนุกรมสารเจือ มากขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีคี่เพิ่มขึ้น โดยกระแสไฟฟ้าโฟโตจะเพิ่มขึ้น จาก 0.06 มิลลิแอมแปร์ (ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก) เป็น 4.6 มิลลิแอมแปร์ (ฟิล์มเพชร 1000 ppm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไบแอส 10 โวลต์ และสำหรับกระแสไฟฟ้ามีค่าจะเพิ่มขึ้นจาก 0.01 มิลลิแอมแปร์ (ฟิล์มเพชรชนิด อินทรินซิก) เป็น 0.6 มิลลิแอมแปร์ (ฟิล์มเพชร 1000 ppm) ที่ไบแอส 10 โวลต์ เมื่อพิจารณาจาก สมการที่ 2.22 พบว่ากระแสไฟฟ้าโฟโตจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราการเกิดประจุพาหะเพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์มเพชรที่มีการเติมอะตอมสารเจือมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตมากขึ้น โดย เมื่อนำสมการที่ 2.20 แทนลงในสมการที่ 2.22 จะได้ค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตดังสมการที่ 5.6

$$I_p = q \frac{\alpha P_{op}}{h\omega} \tau (\mu_e + \mu_p) \frac{wdV}{l} \tag{5.6}$$



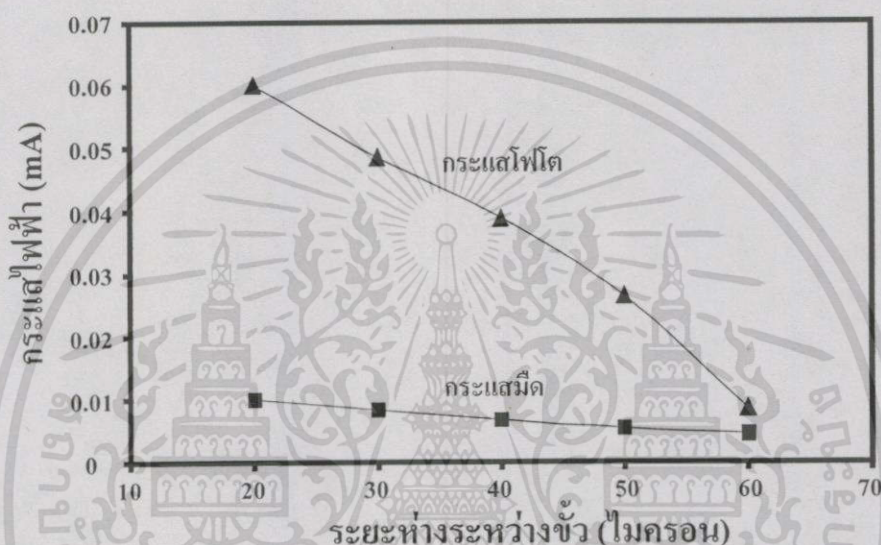
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืดกับปริมาณความเข้มข้น อะตอมสารเจือโบรอน

5.3.4 ผลการออกแบบขั้วโลหะที่มีต่อการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการปรับปรุงโครงสร้างของอุปกรณ์แบบโฟโตคอนดักเตอร์ จากภาพโครงสร้างของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงระยะห่าง ระหว่างขั้วโลหะโอห์มมิกทั้งสอง (l) จะมีผลต่อระยะทางในการเคลื่อนที่ของประจุพาหะไปยังขั้วไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้าทั้งสองและนอกจากนี้ยังมีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้ามีดด้วยซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (5.1) และ (5.2) โดยการทดลองเราใช้อุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ให้ไบแอสแก่ อุปกรณ์ 10 โวลต์ นำมาวัดกระแสไฟฟ้ามีดโดยไม่ต้องฉายแสง ต่อจากนั้นวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า โฟโตโดยนำอุปกรณ์ฉายด้วยแสงความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ความเข้มแสง  $0.8 \text{ mW/cm}^2$  กราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีดกับการเปลี่ยนแปลงระยะห่าง ระหว่างขั้วแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและปริมาณกระแสไฟฟ้ามีดกับระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ (ไบแอส 10 โวลต์)

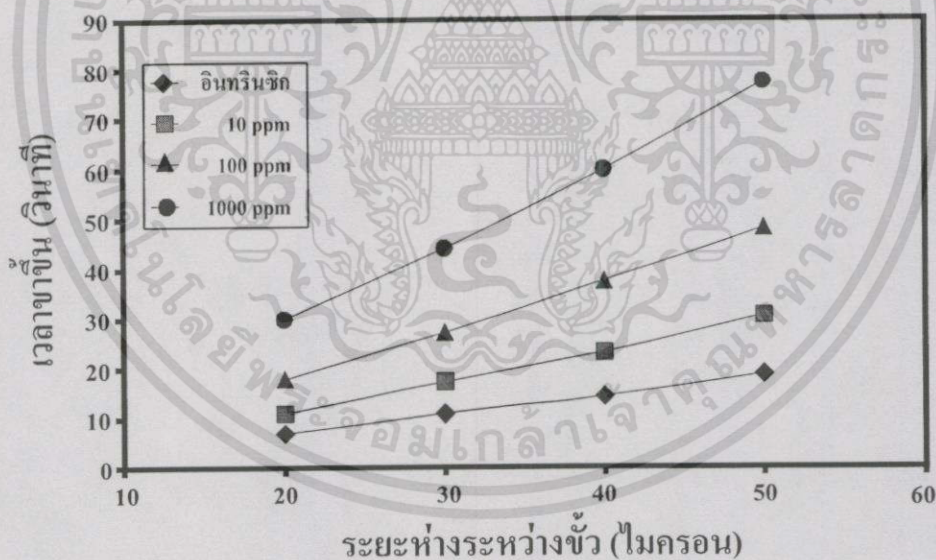
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเราเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วโลหะมากขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้ามีดลดลงแต่ก็ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตลดลงด้วย ซึ่งจะมีผลให้การวัดแสงที่ปริมาณความเข้มแสงน้อยๆกระทำได้ยากขึ้น อัตราการลดลงของกระแสไฟฟ้าโฟโตเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วมีค่าลดลงประมาณ 1 ไมโครแอมแปร์ต่อไมครอน ในขณะที่อัตราการลดลงของกระแสไฟฟ้ามีดเมื่อเพิ่มระยะห่างมีค่าลดลงประมาณ 0.15 ไมโครแอมแปร์ต่อไมครอน สังเกตจากกราฟรูปที่ 5.15 การลดลงของกระแสไฟฟ้าโฟโตเมื่อระยะห่างขั้วมากขึ้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้ามีดนั้นลดลงอย่างค่อนข้างช้า เนื่องจากโดยปกติฟิล์มเพชรซึ่งมีความกว้างช่องว่างแถบพลังงานกว้างเกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุพาหะส่วนเกินจึงเป็นไปได้ยาก แต่ในขณะที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตนั้นจะขึ้นกับจำนวนประจุพาหะที่เกิดจากแสงเดินทางไปถึงขั้วโลหะดังนั้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นประจุพาหะจึงเดินทางไปถึงขั้วได้น้อยลงเนื่องจากมีโอกาสเกิดการรวมตัวกันก่อนไปถึงขั้วไฟฟ้ามากขึ้นเป็นไปตามสมการที่ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้กราฟรูปที่ 5.16 เป็นการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาขาขึ้นกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วโลหะจะทำให้ระยะเวลาในการตอบสนองมีค่ามากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากประจุพาหะต้องใช้เวลาดำเนินทาง (transit time) ไปยังขั้วไฟฟ้ามากขึ้น

$$\left( t_{tr} = \frac{1}{2} \frac{l}{v_s} \right)$$

จากการทดลองอัตราการเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาขาขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วของอุปกรณ์ชนิดอินทรีนซิก 10ppm 100ppm และ 1000ppm เป็น 0.39, 0.65, 1.0 และ 1.58 วินาทีต่อไมครอน ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ที่เติมอะตอมสารเจือปนมากขึ้นจะมีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาตอบสนองต่อการเพิ่มระยะห่างมากกว่าอุปกรณ์ที่ไม่เติมอะตอมสารเจือปน เนื่องจากอุปกรณ์ที่มีการเติมสารเจือปนมากกว่าจะมีค่าความคล่องตัวประจุพาหะต่ำ ดังนั้นผลการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วจึงมีผลต่อค่าเวลาตอบสนองมากกว่า นอกจากนี้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ช่วงเวลาตอบสนองของอุปกรณ์มีค่ามากขึ้น ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์ให้ได้ปริมาณของกระแสไฟโตสูงๆและมีช่วงเวลาตอบสนองรวดเร็วจึงควรลดระยะห่างระหว่างขั้วโลหะให้แคบลงแต่ก็ควรคำนึงถึงปริมาณกระแสมีดและพื้นที่รับแสงให้เหมาะสมด้วย

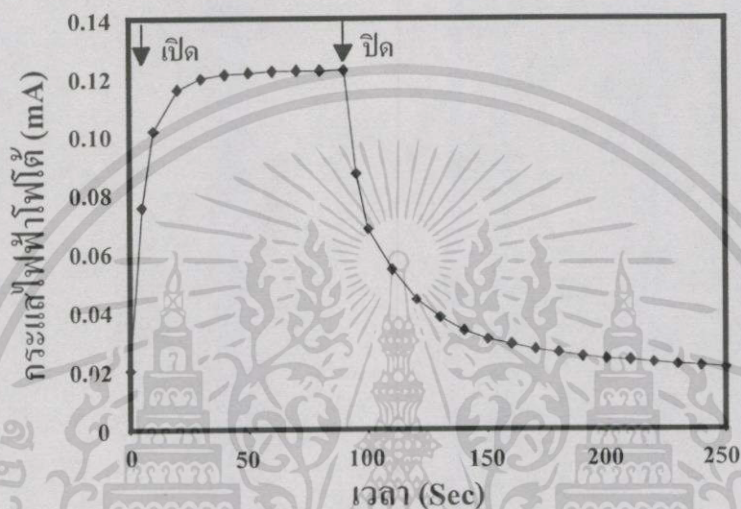


รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างขั้วกับช่วงเวลาขาขึ้นของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและเอกซ์ทรีนซิก

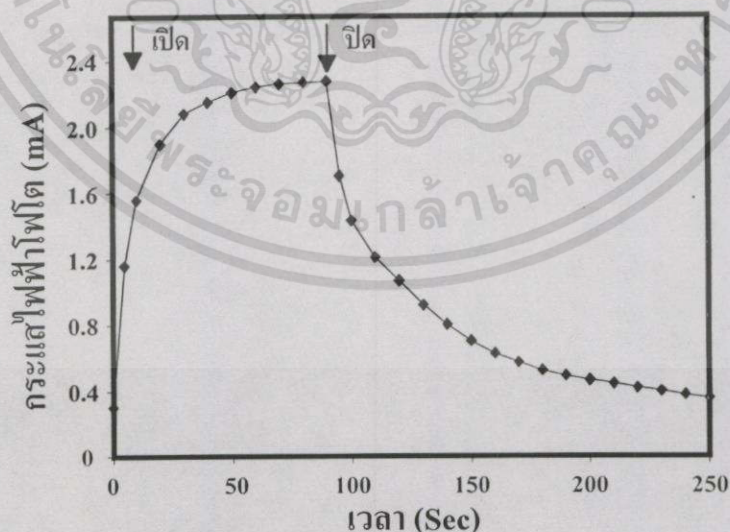
### 5.3.5 ผลของการเติมอะตอมสารเจือปนโรนที่มีต่อการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์

หัวใจสำคัญสำหรับสิ่งประดิษฐ์ประเภทเซ็นเซอร์นั้นคือต้องมีความไวในการทำงานสูง โดยมีการตอบสนองที่รวดเร็วกับสิ่งที่ตรวจวัด ในอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงก็เช่นเดียวกันควรมีผลการตอบสนองเชิงเวลาที่รวดเร็ว ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาผลการตอบสนองเชิงเวลาของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรทั้งชนิดอินทรินซิกและเอกซ์ทรินซิก โดยนำอุปกรณ์ตรวจวัดแสงมาฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ให้ไบแอสแรงดัน 20 โวลต์ แล้วทำการเปลี่ยนความเข้มแสงด้วยการเปิดปิดชุดเตอร์และวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าโฟโตกับเวลา ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.17 และ 5.18 นอกจากนี้เรายังคำนวณเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (fall time) ที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาณอะตอมสารเจือโบรอน ซึ่งผลการทดลองแสดงในกราฟรูปที่ 5.19

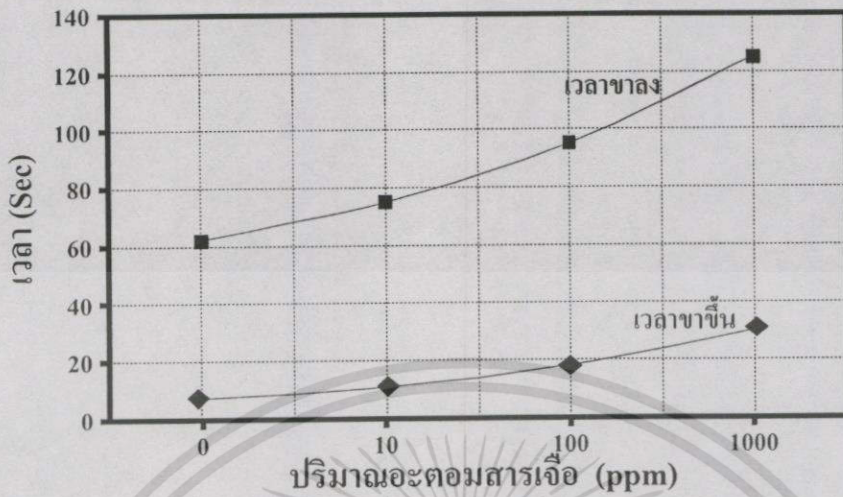


รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตกับระยะเวลาตอบสนองของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตกับระยะเวลาตอบสนองของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดเอกซ์ทรินซิก (B/C 100 ppm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

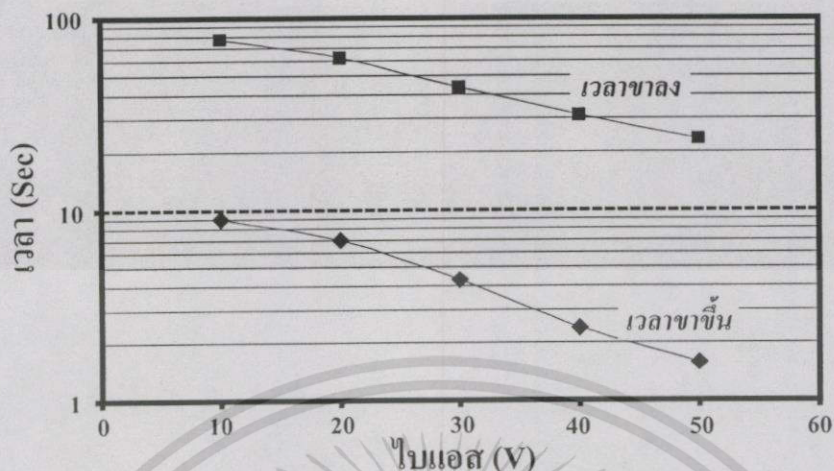


รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงกับปริมาณอะตอมสารเจือโบรอน

จากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่มีการเติมอะตอมสารเจือมากขึ้นจะมีความเร็วในการตอบสนองลดลง โดยอุปกรณ์มีช่วงเวลาขาขึ้นเพิ่มขึ้นจาก 7 วินาทีไปเป็น 30 วินาทีเมื่ออุปกรณ์สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและชนิดที่เติมอะตอมสารเจือ 1000 ppm ตามลำดับ และมีการเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาขาลงจาก 62 วินาทีไปเป็น 125 วินาที เมื่ออุปกรณ์สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและชนิดที่เติมอะตอมสารเจือ 1000 ppm ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณอะตอมสารเจือเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะลดลงทำให้ประจุพาหะใช้เวลาในการเดินทางนานขึ้น

### 5.3.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสที่มีต่อการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์

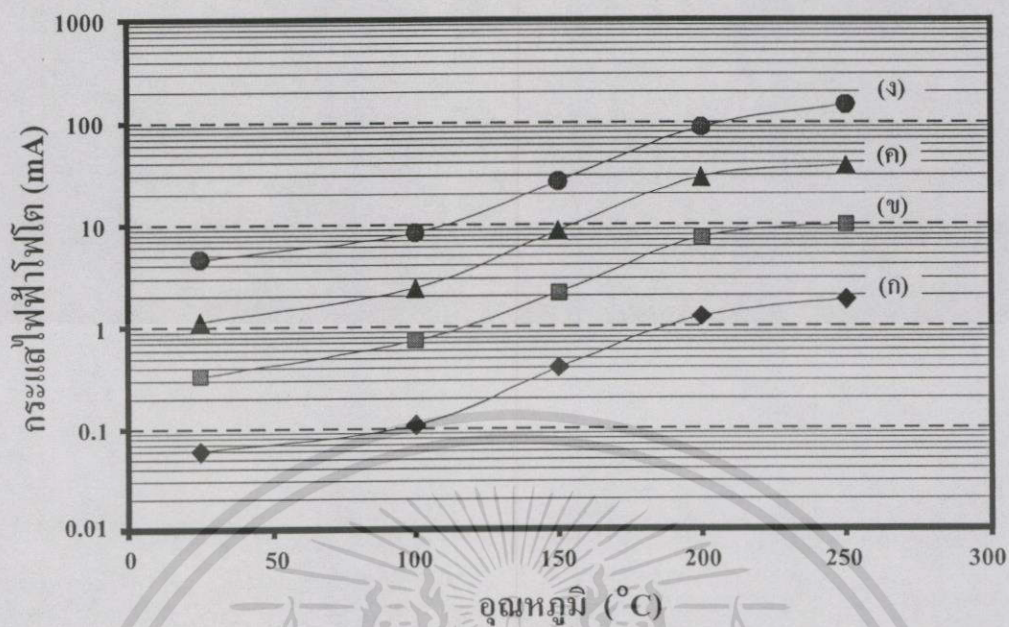
ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบแอสที่มีต่อช่วงเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงของอุปกรณ์ ในการทดลองเราใช้อุปกรณ์สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก โดยผลการทดลองแสดงในกราฟรูปที่ 5.20 ซึ่งจากกราฟพบว่าอุปกรณ์จะให้การตอบสนองที่เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันไบแอส ทั้งนี้เนื่องจากประจุพาหะจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนการลดลงของช่วงเวลาคอบสนองเมื่อเพิ่มค่าไบแอสเป็น 0.18 วินาทีต่อโวลต์สำหรับเวลาขาขึ้นและ 1.35 วินาทีต่อโวลต์ สำหรับเวลาขาลง



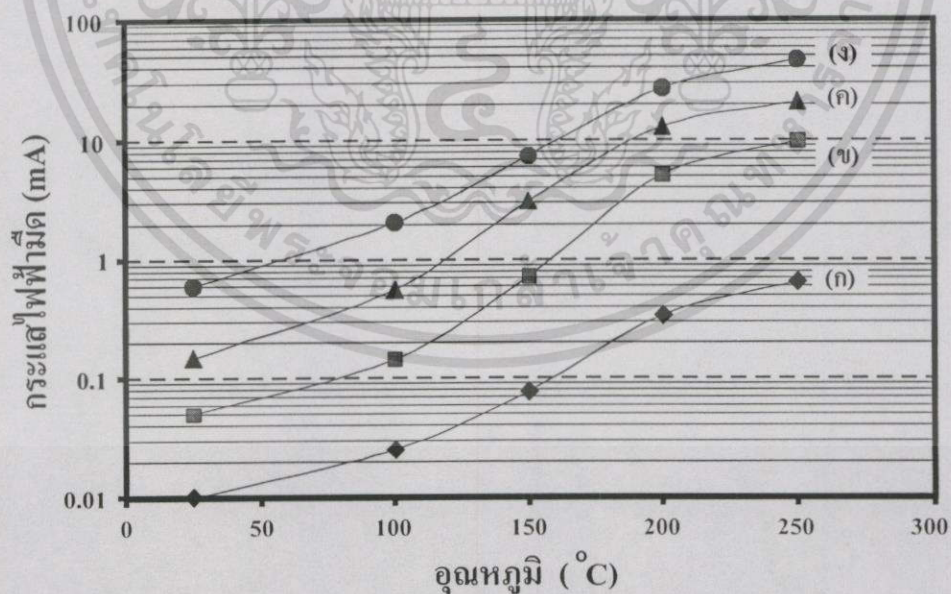
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงกับแรงดัน โวลต์

### 5.3.7 เสถียรภาพของอุปกรณ์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

การทดลองในหัวข้อนี้จะศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณกระแสไฟฟ้า โฟโตและกระแสไฟฟ้ามืดของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรทั้งชนิดอินทรินซิกและเอกซ์ทรินซิก โดยการทดลองจะนำอุปกรณ์มาฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร โวลต์แรงดันกับอุปกรณ์ 10 โวลต์และให้ความร้อนแก่อุปกรณ์โดยใช้แพลทินัมไมโครฮีตเตอร์[24] ผลการทดลองแสดงในกราฟรูปที่ 5.21 ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนซิลิคอนหรือวัสดุอื่นที่มีความกว้างช่องว่างแถบพลังงานแคบ[8] จากกราฟอุปกรณ์จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตมากที่สุดในช่วงของอุณหภูมิ 100 °C ถึง 200 °C ซึ่งมีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าโฟโตต่ออุณหภูมิดังนี้ อุปกรณ์ชนิดอินทรินซิกมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าโฟโต 0.01 mA/°C อุปกรณ์ชนิด 10 ppm 0.06 mA/°C อุปกรณ์ชนิด 100 ppm 0.12 mA/°C และอุปกรณ์ 1000 ppm 0.8 mA/°C จากผลการทดลองสรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่มีการเติมอะตอมสารเจือในปริมาณต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าโฟโตเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต่ำสุด พิจารณากราฟรูปที่ 5.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้ามืดกับอุณหภูมิพบว่ากระแสไฟฟ้ามืดของฟิล์มเพชรจะมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส และการเปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส โดยฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกมีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้ามืดกับอุณหภูมิ 0.003 mA/°C ฟิล์มเพชร 10 ppm 0.05 mA/°C ฟิล์มเพชร 100 ppm 0.12 mA/°C และฟิล์มเพชร 1000 ppm 0.24 mA/°C ตามลำดับ



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้าโฟโต ก) ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก  
ข) ฟิล์มเพชรชนิดเอกซ์ทรินซิก 10 ppm ค) 100ppm และ ง) 1000ppm



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระแสไฟฟ้ามืด ก) ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก  
ข) ฟิล์มเพชรชนิดเอกซ์ทรินซิก 10 ppm ค) 100ppm และ ง) 1000ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

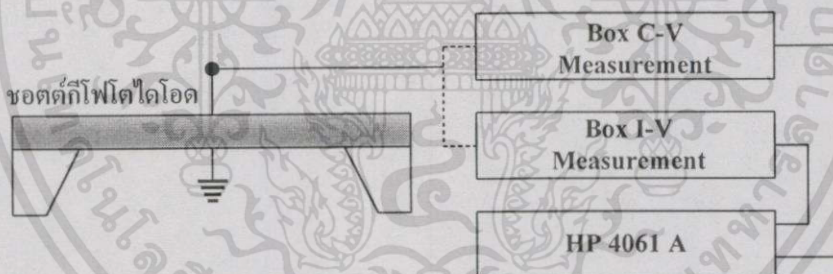
### 5.3.8 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในหัวข้อทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพอสรุปคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชรได้ว่า ฟิล์มเพชรจะทำให้การตอบสนองต่อแสงได้ดีในช่วงแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่นสั้น โดยเฉพาะในช่วง UVC จะทำให้การตอบสนองได้ดีที่สุด โดยเมื่อมีการเติมปริมาณอะตอมสารเจือให้กับฟิล์มเพชร จะทำให้ฟิล์มเพชรมีความแตกต่างระหว่างการตอบสนองต่อแสงช่วงอัลตราไวโอเลตกับแสงตามองเห็นมากขึ้น การเพิ่มแรงดันไบแอสจะทำให้ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตเพิ่มขึ้นแต่ก็ทำให้ปริมาณกระแสมีคเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้การเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วจะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีลดลงโดยสำหรับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีอัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงของกระแสไฟฟ้าโฟโตต่อการเพิ่มระยะห่างขั้ว 1 ไมโครเมตรต่อไมครอน และกระแสไฟฟ้ามีลดลง 0.15 ไมโครแอมป์ต่อไมครอน สำหรับความเร็วในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มเพชรพบว่าฟิล์มเพชรที่มีการเติมอะตอมสารเจือในปริมาณน้อยหรือไม่เติมเลยจะมีความเร็วในการตอบสนองเร็วกว่าที่มีการเติมสารเจือและเมื่อเพิ่มไบแอสมากขึ้นจะทำให้เวลาตอบสนองของอุปกรณ์เร็วขึ้น โดยฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีความเร็วในการตอบสนองเร็วขึ้น 0.18 วินาทีต่อโวลต์ สำหรับเวลาขาขึ้น และ 1.35 วินาทีต่อโวลต์สำหรับเวลาขาลง นอกจากนี้ในการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออุปกรณ์พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ทั้งปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีคเพิ่มขึ้น โดยที่อุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกจะมีการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิต่ำสุด คือกระแสไฟฟ้าโฟโตเพิ่มขึ้น  $0.01 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$  และกระแสไฟฟ้ามีคเพิ่มขึ้น  $0.003 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$  โดยในช่วงอุณหภูมิ  $100\text{-}200^{\circ}\text{C}$  อุปกรณ์จะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดและจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $200^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นพอสรุปได้ว่าอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์ที่ดีควรสร้างบนฟิล์มเพชรที่มีการเติมอะตอมสารเจือในปริมาณต่ำหรือไม่เติมเลย และอุปกรณ์ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วน้อยๆ ทั้งนี้การเพิ่มแรงดันไบแอสให้กับอุปกรณ์จะช่วยให้อุปกรณ์มีความเร็วตอบสนองที่ดีขึ้น ในการทดลองพบว่าความเร็วในการตอบสนองของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกซึ่งมีความเร็วในการตอบสนองเร็วที่สุดก็ยังมีช่วงเวลาการตอบสนองอยู่ในช่วงของวินาทีซึ่งถือว่ามีความเร็ว ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากฟิล์มเพชรซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ซึ่งจะมีอิทธิพลของเส้นพรมแดนผลึกต่อการเดินทางของประจุพาหะในเนื้อสาร รายละเอียดได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 เรื่องการออกแบบอุปกรณ์ ดังนั้นในบทต่อไปจะเป็นการศึกษาการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเลต โครงสร้างแบบชอตต์กี้ไดโอดเพื่อนำมาแทนโครงสร้างแบบโฟโตคอนดักเตอร์ โดยจะใช้โลหะอลูมิเนียมเป็นรอยต่อชอตต์กี้กับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและเอกซ์ทรีนซิก ต่อจากนั้นจึงนำอุปกรณ์มาศึกษาคุณสมบัติต่างๆ โดยมีรายละเอียดการทดลองและผลการทดลองในหัวข้อต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 การศึกษาคุณสมบัติของขดลวดที่ไดโอดสร้างจากฟิล์มเพชรที่ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือปนโรนต่างๆ

หัวข้อที่แล้วเราได้ศึกษาคุณสมบัติทางแสงต่างๆของฟิล์มเพชรโดยสร้างเป็นอุปกรณ์โครงสร้างแบบโฟโตคอนดักเตอร์ซึ่งเป็น โครงสร้างอย่างง่ายที่นิยมใช้ทั่วไปในการหาคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ แต่สำหรับในหัวข้อต่อจากนี้ไปเราจะพัฒนาโครงสร้างของอุปกรณ์มาใช้แบบโฟโตไดโอดทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่สร้างบนฟิล์มเพชรให้ดีขึ้น โดยเริ่มต้นจากบทที่ 5.4 จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขดลวดที่โฟโตไดโอดฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือปนโรนในอัตราส่วนโรนต่อคาร์บอน 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm โดยจะศึกษาคุณลักษณะกระแสกับแรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อขดลวดที่ไดโอด นอกจากนี้ยังคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของรอยต่อขดลวด เช่น ศักย์ไฟฟ้าภายในและความสูงกำแพงศักย์ ในการทดลองเรานำฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือปนโรนปริมาณต่างๆกันมาสร้างเป็น โครงสร้างแบบขดลวดที่โฟโตไดโอดตามวิธีการสร้างในบทที่ 4 จากนั้นนำมาศึกษาคุณสมบัติต่างๆของอุปกรณ์ต่ออุปกรณ์เพื่อวัดคุณลักษณะกระแสกับแรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อขดลวดที่ไดโอด จะใช้เครื่อง HP 4061 ซึ่งควบคุมการทำงานโดยคอมพิวเตอร์ผ่านทาง GPIB Card แสดงดังรูปที่ 5.23

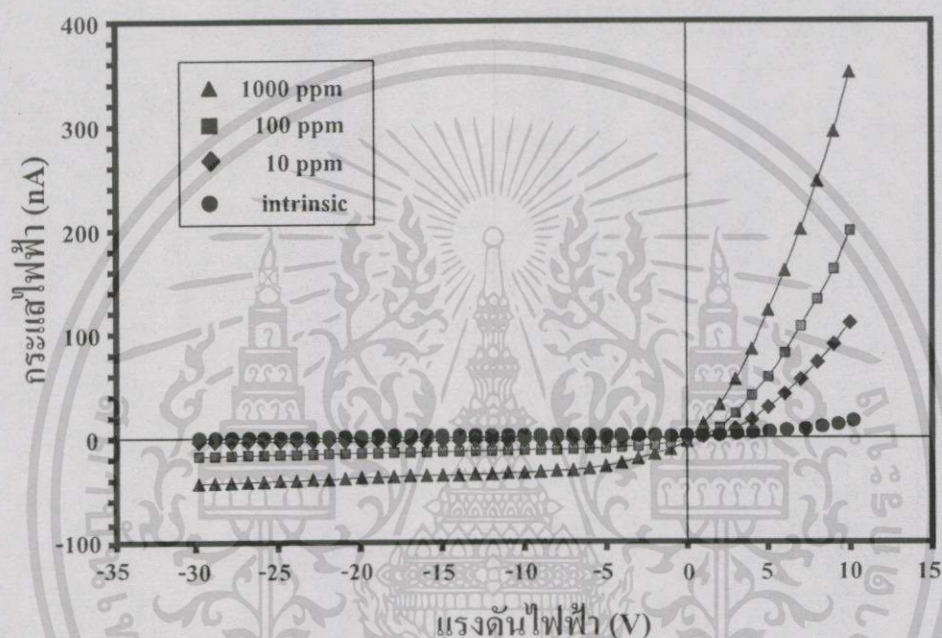


รูปที่ 5.23 การต่ออุปกรณ์เพื่อวัดคุณลักษณะกระแสกับแรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อขดลวดที่ไดโอด

### 5.4.1 คุณลักษณะกระแสแรงดันของขดลวดที่โฟโตไดโอด

นำอุปกรณ์ขดลวดที่โฟโตไดโอดที่สร้างบนฟิล์มเพชรที่มีการเติมปริมาณอะตอมสารเจือปนโรนมาศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ผลการทดลองแสดงในกราฟรูปที่ 5.24 จากผลการทดลองกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของอุปกรณ์ขดลวดที่โฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือปนโรนปริมาณต่างกันพบว่า ปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วไหลย้อนกลับของไดโอดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณอะตอมสารเจือปนโรน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีดิฟฟิวชันที่แสดงไว้ในหัวข้อ 2.2.3 โดยจากผลการทดลองพบว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ชนิดอินทรินซิกมีค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับในปริมาณต่ำสุด คือประมาณ 0.05 นาโนแอมแปร์ ในขณะที่ฟิล์มเพชรชนิด 1000 ppm มีค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับสูงสุด คือประมาณ 40 นาโนแอมแปร์ ค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลย้อนกลับของอุปกรณ์ชนิดกึ่งตัวนำโพลีไดโอดแสดงในตารางที่ 5.1 นอกจากนี้ผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ที่มีการเติมอะตอมสารเจือในปริมาณน้อยจะมีค่าแรงดันนำกระแสไฟฟ้าต่ำและอุปกรณ์ทั้ง 4 ชนิดสามารถทนแรงดันไบแอสย้อนกลับได้สูงมากกว่า 30 โวลต์ โดยยังไม่พังทะลาย (break down)



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของชนิดกึ่งตัวนำโพลีไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด อินทรินซิก 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm

ตารางที่ 5.1 ค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลย้อนกลับของชนิดกึ่งตัวนำโพลีไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิดต่างๆ ที่แรงดันไบแอสย้อนกลับ 10 โวลต์

ชนิดกึ่งตัวนำโพลีไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด (ppm)	กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (nA)
อินทรินซิก	0.05
10	3.0
100	18.0
1000	40.0

สมการความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของขอตักไดโอดแสดงในสมการที่ 5.5

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (5.7)$$

สมการที่ 5.6 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ

$$J_{ST} = A^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (5.8)$$

โดยค่า  $\phi_B$  คือ ความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะ ซึ่งคือกำแพงศักย์ที่อิเล็กทรอนิกส์ในโลหะมองเห็นในการพยายามที่จะเคลื่อนที่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำโดยค่าความสูงกำแพงศักย์สามารถหาได้จากสมการที่ 5.9

$$\phi_{BP} = E_g - (\phi_m - \chi) \quad (5.9)$$

ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพีถ้าเราให้แรงดันลบแก่สารกึ่งตัวนำเมื่อเทียบกับโลหะ จะทำให้ความสูงกำแพงศักย์ของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้น การไบแอสแบบนี้เรียกว่าไบแอสย้อนกลับซึ่งจะทำให้มีกระแสไหลน้อย เมื่อพิจารณาสมการที่ 5.8 พบว่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ  $J_{ST}$  มีค่ามากเมื่อ  $\phi_B$  มีค่าลดลง ซึ่งในทางอุดมคติค่า  $\phi_B$  จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับแรงดันไบแอสและปริมาณอะตอมสารเจือ แต่ในทางปฏิบัติพบว่าค่าความสูงกำแพงศักย์จะมีค่าลดลงเมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงอิมเมจและเมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือมากขึ้นจะทำให้ค่า  $\phi_B$  ลดลง นอกจากนี้เมื่อปริมาณอะตอมสารเจือมากขึ้นจะทำให้มีกระแสรีคอมบิเนชัน Generation-Recombination เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับเพิ่มขึ้น

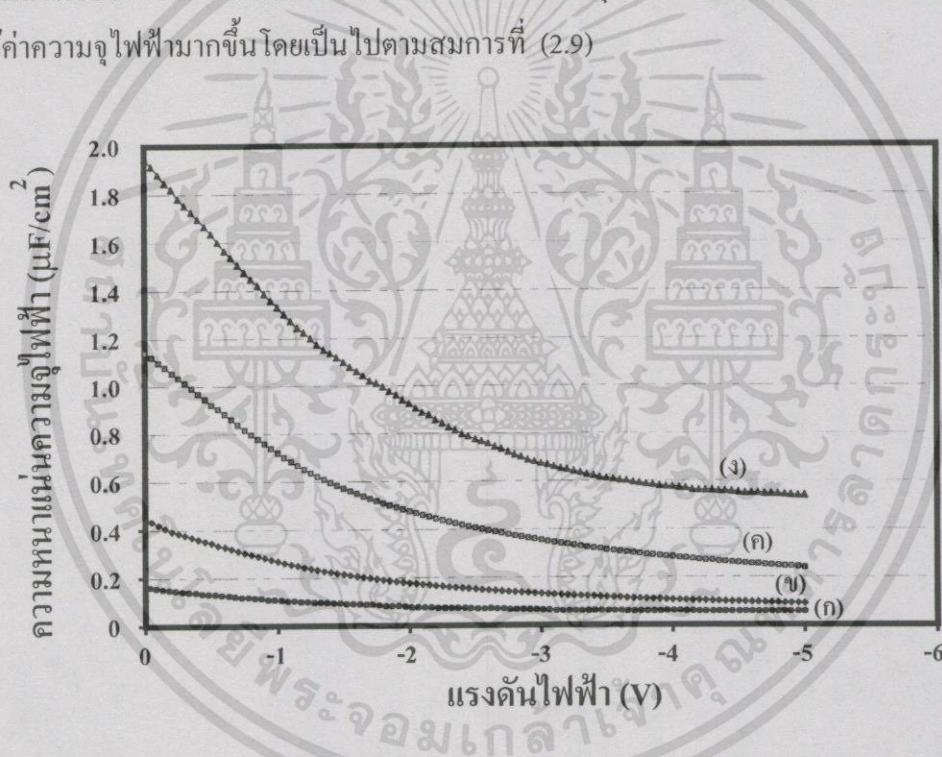
ในกรณีให้แรงดันไบแอสตรงสามารถหาค่าแรงดันไบแอสไปข้างหน้าเพื่อทำให้เกิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไบแอสไปข้างหน้าได้จากสมการที่ 5.10

$$V_a = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{J}{J_{ST}}\right) \quad (5.10)$$

ในทางปฏิบัติเมื่อเติมปริมาณอะตอมสารเจือมากขึ้นจะทำให้ค่า  $J_{ST}$  เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 5.8 จะทำให้ค่าแรงดันไบแอสไปข้างหน้าเพื่อทำให้เกิดกระแสลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในกราฟรูปที่ 5.24

#### 5.4.2 ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อขอตัก์โฟโตไดโอด

นำอุปกรณ์ขอตัก์โฟโตไดโอดสร้างจากฟิล์มเพชรที่ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือค่าต่างๆมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อกับค่าแรงดันไบแอส โดยการทดลองพื้นที่ของรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.09 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองแสดงในกราฟรูปที่ 5.25 โดยจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือมากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยในการทดลองที่แรงดันไบแอสย้อนกลับ 5 โวลต์ อุปกรณ์ชนิดอินทรีนซิกมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำที่สุด คือประมาณ  $0.07 \mu F / cm^2$  ในขณะที่อุปกรณ์ชนิด 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm มีค่าความจุไฟฟ้า  $0.1 \mu F / cm^2$   $0.24 \mu F / cm^2$  และ  $0.54 \mu F / cm^2$  ตามลำดับ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าเมื่อเพิ่มปริมาณอะตอมสารเจือเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นอะตอมสารเจือมากขึ้นจะทำให้ความกว้างบริเวณปลอดประจุพาหะของรอยต่อ ( $W$ ) ลดลง ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้นโดยเป็นไปตามสมการที่ (2.9)



รูปที่ 5.25 ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อขอตัก์โฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิดต่างๆ

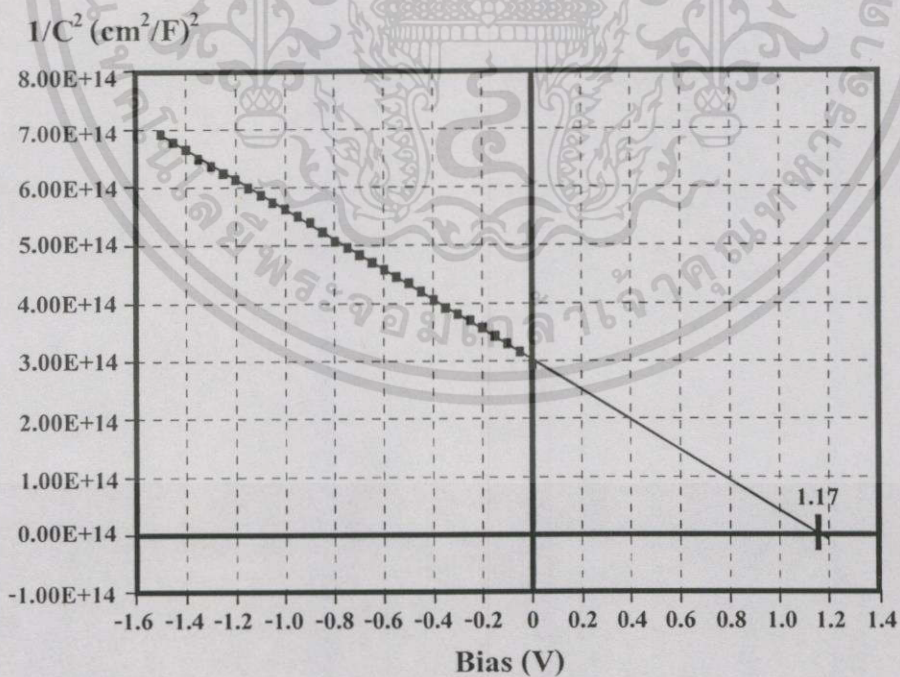
ก) อินทรีนซิก ข) 10 ppm ค) 100 ppm และ ง) 1000 ppm

นอกจากนี้เราสามารถคำนวณหาความกว้างบริเวณปลอดประจุพาหะของรอยต่อขอตัก์ ( $W$ ) ที่ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือโบรอนค่าต่างๆได้จาก  $W = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 A}{C}$  โดย  $A$  คือพื้นที่ของรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.09 ตารางเซนติเมตร และค่า  $\epsilon_s$  เท่ากับ 5.7 จากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ชนิดอินทรีนซิกมีความกว้างบริเวณปลอดประจุพาหะมากที่สุด คือ ประมาณ 7 ไมครอน และอุปกรณ์

ชนิด 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm มีความกว้างเป็น 5 ไมครอน 2 ไมครอนและ 0.93 ไมครอนตามลำดับ

### 5.4.3 สักย์ไฟฟ้าภายในและค่าความสูงกำแพงสักย์ของรอยต่อชอตต์กีไดโอด

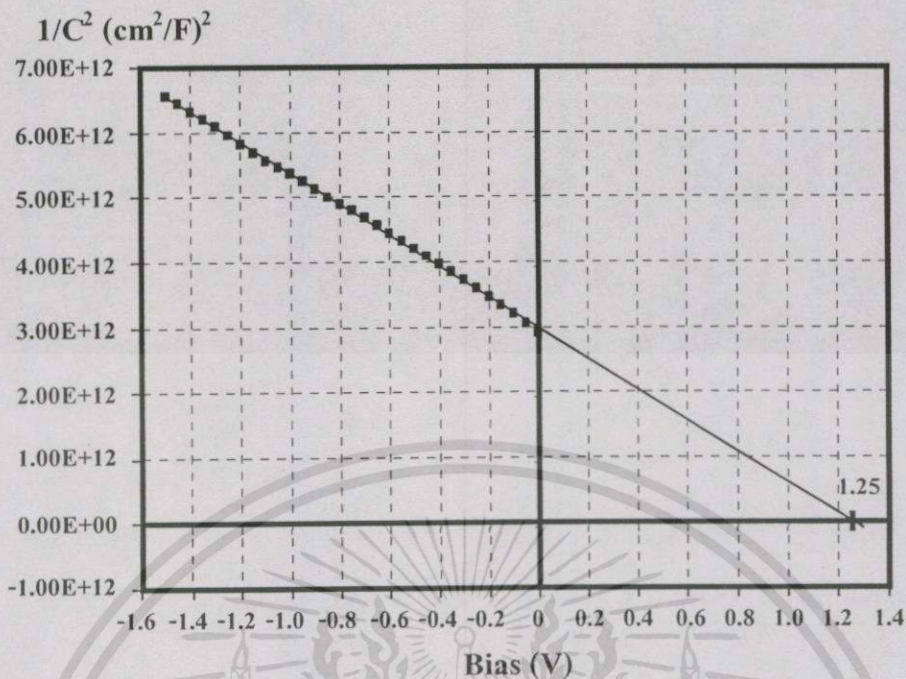
รอยต่อแบบชอตต์กีเกิดจากการนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ โดยที่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ ( $\phi_m$ ) มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_s$ ) เมื่อนำวัสดุทั้งสองมาสัมผัสกันแล้ว จะเกิดการถ่ายเทพริจุพาหะของวัสดุทั้งสองจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลคือระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกัน โดยเมื่อนำสารกึ่งตัวนำและโลหะมาสัมผัสกันจะทำให้เกิดมีความต่างศักย์ตกคร่อมที่รอยต่อเช่นเดียวกับรอยต่อแบบพีเอ็น ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมรอยต่อขณะอยู่ในภาวะสมดุลความร้อนเราเรียกว่า สักย์ไฟฟ้าภายใน  $V_{bi}$  (built-in voltage) ซึ่งเป็นค่าสักย์ไฟฟ้าที่ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำจะต้องเอาชนะเพื่อที่จะข้ามไปยังด้านโลหะ นอกจากนี้บริเวณรอยต่อยังเกิดกำแพงสักย์  $\phi_B$  (barrier height) กันอิเล็กตรอนจากด้านโลหะที่พยายามจะข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำอีกด้วย ในการทดลองหัวข้อนี้จะหาค่าสักย์ไฟฟ้าภายใน  $V_{bi}$  และค่าความสูงกำแพงสักย์  $\phi_B$  โดยใช้วิธีการคำนวณจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ  $C$  การทดลองนี้เราออกแบบให้รอยต่อชอตต์กีมีพื้นที่รอยต่อเท่ากับ 0.01 ตารางเซนติเมตรและสร้างขั้วโลหะโอห์มมิกด้านบนเราสามารถคำนวณหาค่า  $\phi_B$  ได้จากสมการ(2.10)ถึง(2.12) โดยที่  $\phi_B = V_0 + V_{bi}$



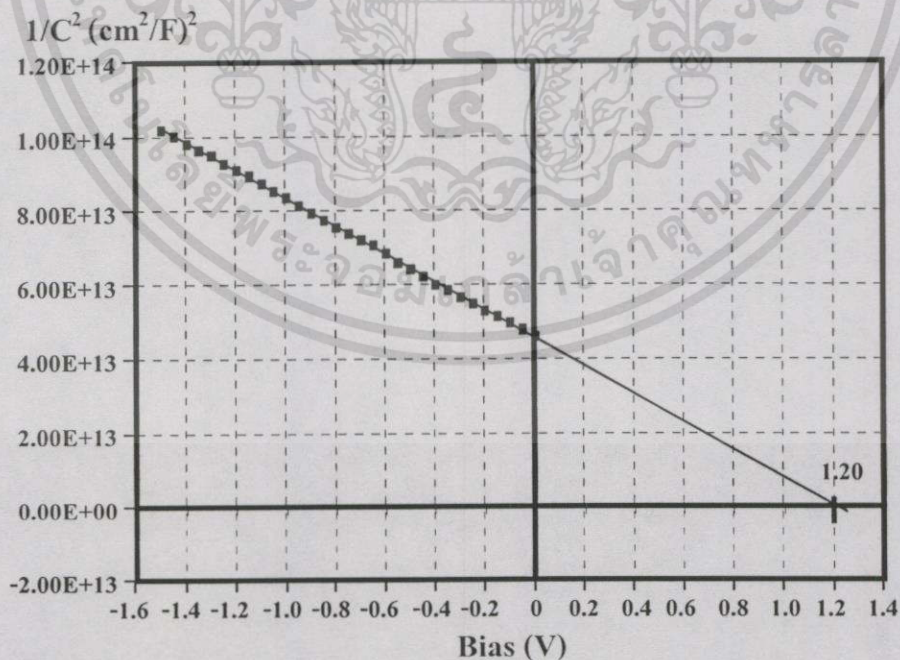
รูปที่ 5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{C^2}$  กับ แรงดันไบแอสของชอตต์กีไดโอดสร้างจากฟิล์ม

เพชรชนิด 10 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{C^2}$  กับ แรงดันไบแอสของขอตัก์ไดโอดสร้างจากฟิล์ม เพชรชนิด 100 ppm



รูปที่ 5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{C^2}$  กับ แรงดันไบแอสของขอตัก์ไดโอดสร้างจากฟิล์ม เพชรชนิด 1000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 5.26 จำนวนค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือ  $N_A$  ได้เท่ากับ  $8.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และได้ค่า  $V_0$  เท่ากับ 0.15 โวลต์ โดยใช้ค่า  $N_V$  เท่ากับ  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  อ่านจุดตัดแกน X ได้ค่า  $V_{bi}$  เท่ากับ 1.17 โวลต์ จำนวนค่าความสูงกำแพงศักย์ได้เท่ากับ 1.32 โวลต์

จากกราฟรูปที่ 5.27 จำนวนค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือ  $N_A$  ได้เท่ากับ  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  และได้ค่า  $V_0$  เท่ากับ 0.11 โวลต์ โดยใช้ค่า  $N_V$  เท่ากับ  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  อ่านจุดตัดแกน X ได้ค่า  $V_{bi}$  เท่ากับ 1.20 โวลต์ จำนวนค่าความสูงกำแพงศักย์ได้เท่ากับ 1.31 โวลต์

จากกราฟรูปที่ 5.28 จำนวนค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือ  $N_A$  ได้เท่ากับ  $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  และได้ค่า  $V_0$  เท่ากับ 0.033 โวลต์ โดยใช้ค่า  $N_V$  เท่ากับ  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  อ่านจุดตัดแกน X ได้ค่า  $V_{bi}$  เท่ากับ 1.25 โวลต์ จำนวนค่าความสูงกำแพงศักย์ได้เท่ากับ 1.28 โวลต์

จากการทดลองเราสามารถสรุปผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของรอยต่อชอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรกับโลหะอลูมิเนียมได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของชอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรกับโลหะอลูมิเนียม

อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (ppm)	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $N_A$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	ศักย์ไฟฟ้าภายใน $V_{bi}$ (V)	ความสูงกำแพงศักย์ $\phi_B$ (V)
อินทรีนซิก	$10^3$	1.00	1.33
10	$10^{16}$	1.17	1.32
100	$10^{17}$	1.20	1.31
1000	$10^{18}$	1.25	1.28

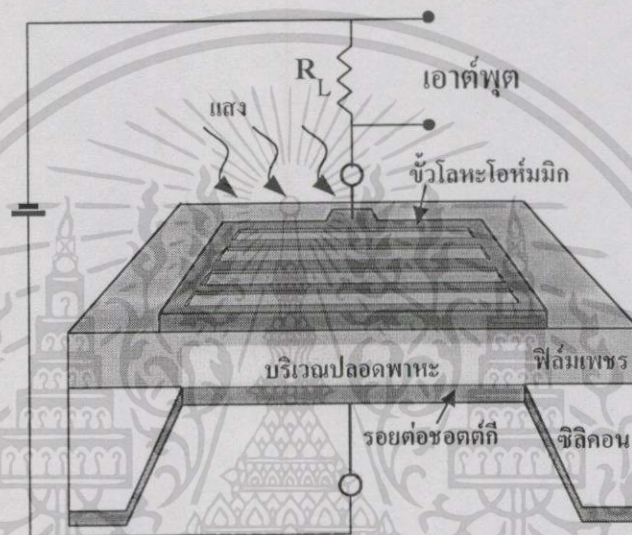
### 5.5 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของชอตต์กีโฟโตไดโอดฟิล์มเพชร

ในหัวข้อที่แล้วเราได้ศึกษาคุณสมบัติต่างๆของชอตต์กีโฟโตไดโอดในขณะไม่ได้รับแสงไปแล้ว สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของชอตต์กีโฟโตไดโอดเมื่อมีการฉายด้วยแสง ในการทดลองจะศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆของอุปกรณ์และศึกษาความเร็วในการตอบสนองต่อแสงโดยเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ที่คิดว่าน่าจะมีผลต่อความเร็วในการตอบสนอง เช่น ปริมาณอะตอมสารเจือ ความหนาของชั้นฟิล์มเพชร และพื้นที่ของรอยต่อชอตต์กี เป็นต้น นอกจากนี้ยังศึกษาเสถียรภาพของอุปกรณ์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย ในการทดลองเรานำอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดที่สร้างได้ตามวิธีการสร้างในบทที่ 4 มาฉายด้วยแสงเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงต่างๆโดยมีรายละเอียดของการทดลองและผลการทดลองดังต่อไปนี้

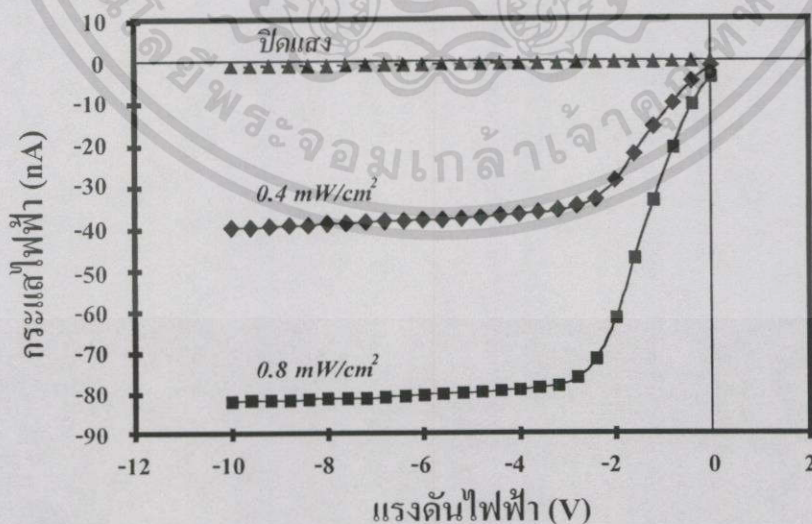
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของขอตัก์โฟโตไดโอดเมื่อได้รับการฉายแสง

นำอุปกรณ์ขอตัก์โฟโตไดโอดที่สร้างได้มาฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ความเข้มแสงเท่ากับ  $0.8 \text{ mW/cm}^2$  และ  $0.4 \text{ mW/cm}^2$  การต่อวงจรเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงต่างๆ ของอุปกรณ์ขอตัก์โฟโตแสดงดังรูปที่ 5.29 และผลการทดลองในกราฟรูปที่ 5.30 แสดงคุณลักษณะกระแสและแรงดันของขอตัก์โฟโตไดโอดที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm ที่ความเข้มแสงต่างกัน และรูปที่ 5.31 แสดงกราฟกระแสและแรงดันของขอตัก์โฟโตไดโอดชนิดอินทรีนซิก 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm เมื่อปิดแสงและได้รับการฉายด้วยแสง

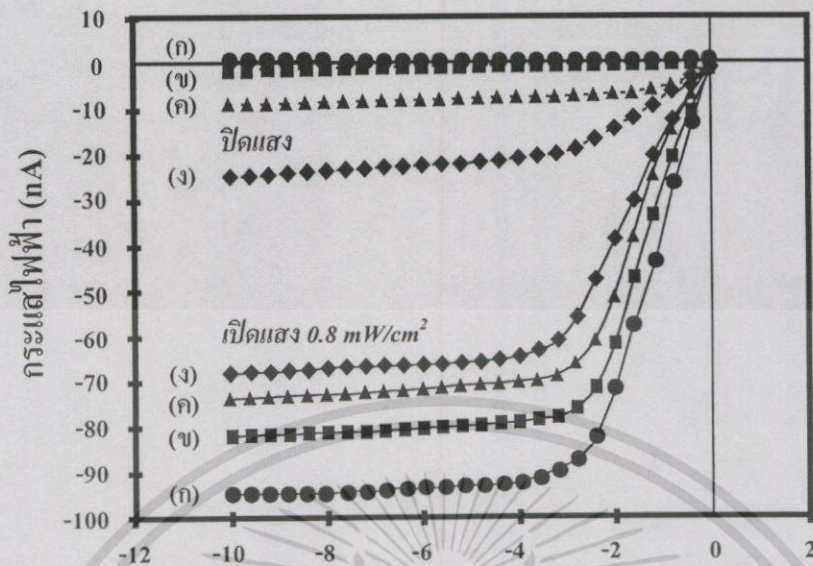


รูปที่ 5.29 การต่ออุปกรณ์ขอตัก์โฟโตไดโอดเพื่อศึกษาคุณลักษณะทางแสงต่างๆ



รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของขอตัก์โฟโตไดโอดสร้างจากฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm เมื่อได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความเข้มแสงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของขอตัก์กีโฟโตไดโอดเมื่อฉายแสงที่มีความเข้มแสง  $0.8 \text{ mW/cm}^2$  ก) อินทรีนซิก ข) 10 ppm ค) 100 ppm และ ง) 1000 ppm

พิจารณาจากกราฟกระแสและแรงดันเมื่อได้รับการฉายแสงพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกจะมีกระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสงในปริมาณสูงสุดและมีกระแสไฟฟ้ามีคต่ำสุด โดยจากการทดลองเมื่อนำอุปกรณ์ฉายด้วยแสงความเข้มแสงคงที่  $0.8 \text{ mW/cm}^2$  ไบแอสแรงดัน 10 โวลต์ พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก มีค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 95 nA และกระแสไฟฟ้ามีค 0.05 nA ในขณะที่อุปกรณ์สร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 1000 ppm มีค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 67 nA และกระแสไฟฟ้ามีค 25 nA ตารางที่ 5.3 แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้าเมื่อขณะไม่ได้รับแสงและได้รับแสงของขอตัก์กีโฟโตทั้งสองชนิด

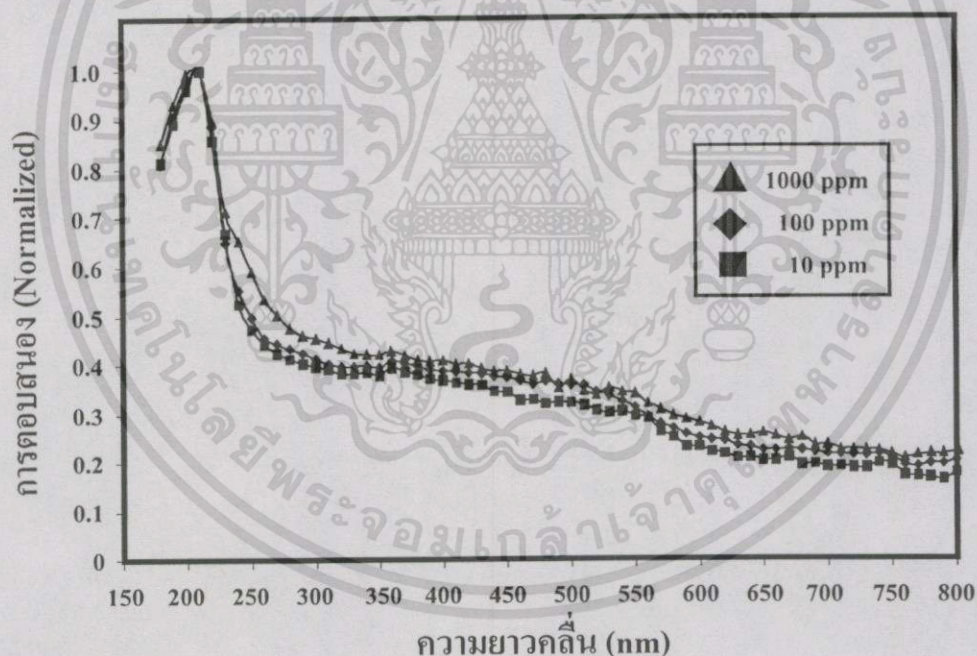
ตารางที่ 5.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้ามีคและกระแสไฟฟ้าโฟโตของอุปกรณ์ขอตัก์กีโฟโตไดโอด ที่แรงดันไบแอสย้อนกลับ 10 โวลต์

อุปกรณ์ขอตัก์กีโฟโตไดโอด	กระแสไฟฟ้ามีค (nA)	กระแสไฟฟ้าโฟโต (nA)
อินทรีนซิก	0.05	95
10 ppm	1.3	80.7
100 ppm	10	65
1000 ppm	25	42

จากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ที่มีการเติมอะตอมสารเจือดำสุดจะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ชนิด 10 ppm มีพื้นที่ปลอดประจุพาหะกว้างมากที่สุดซึ่งบริเวณปลอดประจุพาหะนี้เองเป็นส่วนสำคัญในการรับแสงแล้วก่อให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้นถ้าอุปกรณ์มีความกว้างบริเวณปลอดประจุพาหะมากก็จะสามารถรับแสงและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าโฟโตในปริมาณสูง แต่สำหรับประจุพาหะที่เกิดนอกบริเวณปลอดพาหะจะต้องเดินทางเข้าสู่บริเวณปลอดพาหะและจะเกิดการรวมตัวกันเองเป็นส่วนใหญ่ทำให้ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากนอกบริเวณปลอดพาหะไม่มากนัก

### 5.5.2 การตอบสนองสเปกตรัมแสงของชนิดซีโฟโตไดโอด

อุปกรณ์ชนิดซีโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือดำต่างๆ ถูกนำมาฉายแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยไบแอสย้อนกลับแรงดัน 5 โวลต์ให้แก่อุปกรณ์ เพื่อศึกษาสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.32

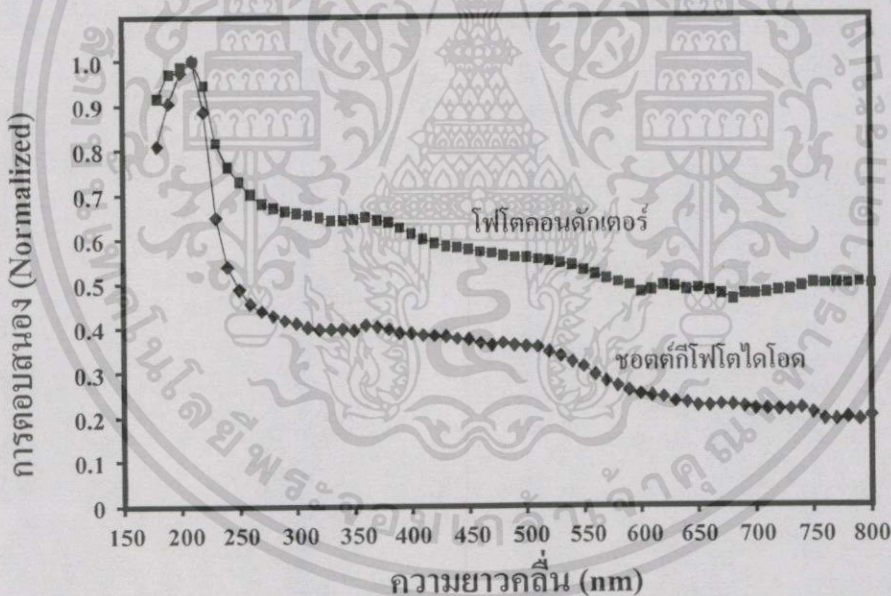


รูปที่ 5.32 สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ชนิดซีโฟโตไดโอด

จากกราฟสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.32 พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือโบรอนต่างกันจะให้การตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ใกล้เคียงกัน คือมีการตอบสนองที่ดีในช่วงแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่นสั้นและให้การตอบสนองที่ต่ำกับแสงช่วงตามองเห็น และกราฟสเปกตรัมจะมีจุดที่การเพิ่มขึ้นของการตอบ

สนองอย่างมากโดยสังเกตจากความชันกราฟที่บริเวณความยาวคลื่น 230 นาโนเมตรซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มเพชร(225 นาโนเมตร) ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าโฟโตของชนิดซีโฟโตไดโอดส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดประจุพาหะ จะมีเพียงส่วนน้อยที่เกิดในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นผลของปริมาณการเติมอะตอมสารเจือที่มีต่อสเปกตรัมการตอบสนองจึงมีไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามผลของปริมาณอะตอมสารเจือจะมีผลกระทบต่อเวลาในการตอบสนองของอุปกรณ์ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากกราฟสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ชนิดซีโฟโตไดโอดเปรียบเทียบกับอุปกรณ์แบบโฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรในรูปที่ 5.33 พบว่าอุปกรณ์แบบชนิดซีโฟโตจะมีความแตกต่างในการตอบสนองระหว่างแสงอัลตราไวโอเล็ตกับแสงมองเห็นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์แบบโฟโตคอนดักเตอร์ที่สร้างบนวัสดุเดียวกัน ดังนั้นหากต้องการนำอุปกรณ์ไปวัดแสงเฉพาะความถี่ย่าน UVC การเลือกใช้อุปกรณ์แบบชนิดซีโฟโตไดโอดจะมีประสิทธิภาพดีกว่าเนื่องจากจะมีสัญญาณรบกวนจากแสงมองเห็นต่ำ



รูปที่ 5.33 สเปกตรัมการตอบสนองของอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์และชนิดซีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชร

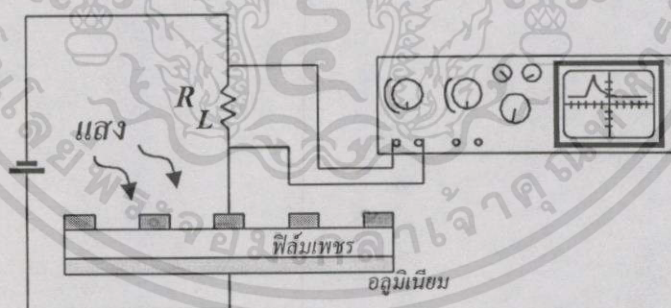
5.5.3 การตอบสนองเชิงเวลาของชนิดซีโฟโตไดโอด

ในการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงมีอยู่หลายประการ ความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์ก็เป็นหัวใจสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการสร้างอุปกรณ์แบบเอกทีฟ โดยความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์ที่

ความถี่สูง ความเร็วในการตอบสนองของขอต็ค์ทีโฟโตไดโอด หมายถึงระยะเวลาตั้งแต่การเกิดประจุพาหะด้วยแสงจนถึงการมีกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกสู่วงจรภายนอก ตามปกตินิยมแสดงด้วยช่วงเวลาขาขึ้น  $t_r$  ซึ่งนิยามจากช่วงเวลาที่ยัญญาณเอาต์พุตเพิ่มจาก 10% เป็น 90% โดยทั่วไปปรากฏการณ์ทางแสงของการดูดกลืนและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของประจุพาหะจะใช้เวลานั้นมาก ดังนั้นการล่าช้าของเวลากว่าที่จะได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกมาจึงขึ้นอยู่กับแพ็คเกจจิ้งตัวอื่น ๆ มากกว่า แพ็คเกจจิ้งที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อความเร็วในการตอบสนองของขอต็ค์ทีโฟโตไดโอดได้แก่

- (1) เวลาพัดพา  $T_{drift}$  (drift time) คือ เวลาที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นปลอดพาหะ
- (2) เวลาแพร่ซึม  $T_{diff}$  (diffusion time) คือ เวลาที่พาหะที่เกิดนอกบริเวณปลอดพาหะใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นปลอดพาหะ
- (3) ค่าคงที่เวลา  $T_{RC}$  (RC time constant) คือ เวลาที่ใช้ในการคายประจุไฟฟ้าผ่านความจุไฟฟ้าของรอยต่อ

รายละเอียดของแพ็คเกจจิ้งต่างๆข้างต้นได้กล่าวไว้แล้วในทฤษฎีหัวข้อที่ 2.5.2.4 ดังนั้นในการทดลองจะศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฟิล์มเพชรและโครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีอิทธิพลต่อความเร็วในการตอบสนอง โดยการทดลองเรานำอุปกรณ์ขอต็ค์ทีโฟโตไดโอดมาฉายด้วยแสงแบบพัลส์แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสไฟโด้กับเวลา โดยวัดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_L$  ขนาด 3 กิโลโอห์ม โดยต่อวงจรวัดดังรูปที่ 5.34

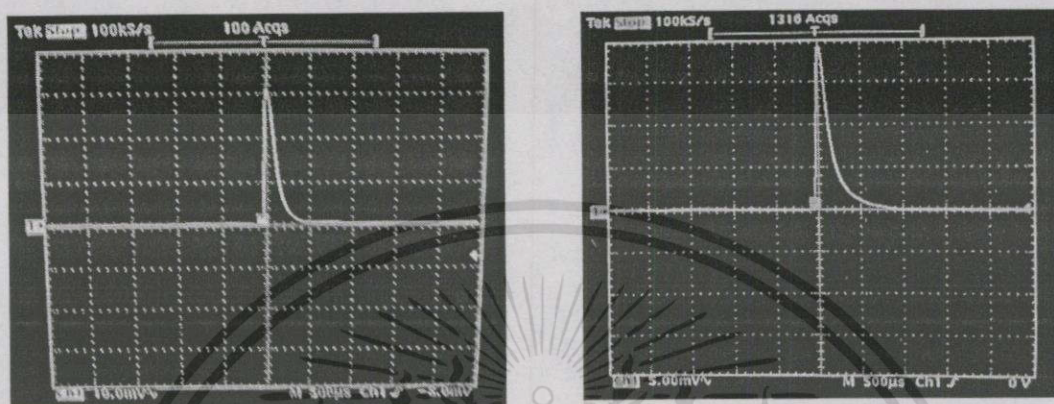


รูปที่ 5.34 แผนภาพการต่อวงจรวัดผลการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์ขอต็ค์ทีโฟโตไดโอด

### 5.5.3.1 ผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่มีต่อความเร็วในการตอบสนอง

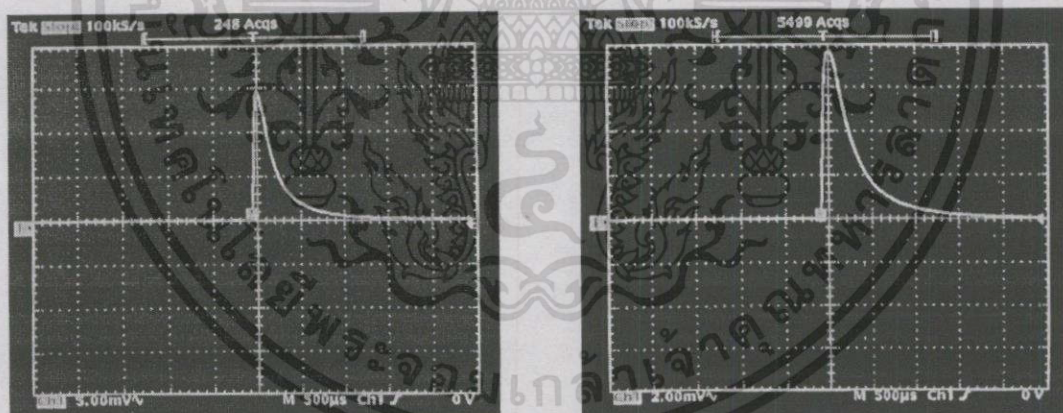
นำอุปกรณ์ขอต็ค์ทีโฟโตไดโอดที่สร้างบนฟิล์มเพชรที่ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือโบรอน 10 ppm 100 ppm 1000 ppm และอินทรีนซิก มาฉายด้วยแสงแบบพัลส์แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ของตัวต้านทานกับเวลา โดยไบแอสแรงดันขั้วกลับขอต็ค์ทีโฟโตไดโอดเท่ากับ 5 โวลต์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) อินทรีนซิก

ข) 10 ppm



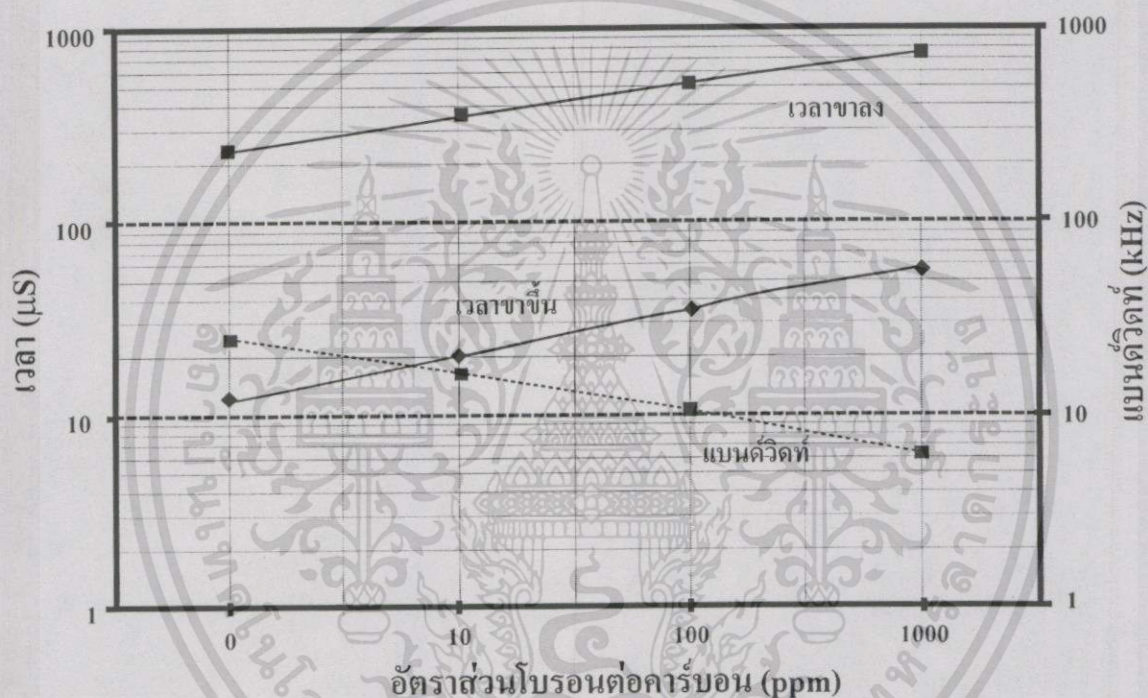
ค) 100 ppm

ง) 1000 ppm

รูปที่ 5.35 ผลการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์ขอตักทีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรเดิม อะตอมสารเจือ โบรอน ก) อินทรีนซิก ข) 10 ppm ค) 100 ppm และ ง) 1000 ppm ไบแอสแรงดันย้อนกลับ 5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นอะตอมสารเจือฟิล์มเพชรมากขึ้นจะทำให้ความเร็วในการตอบสนองลดลง โดยสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นและเวลาขาลง และแบนด์วิดท์กับอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนได้ดังแสดงในรูปที่ 5.36 ซึ่งสาเหตุที่เมื่อเพิ่มอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรมากขึ้นแล้วทำให้ความเร็วในการตอบสนองลดลงนั้นเพราะการเพิ่มปริมาณสารเจือจะทำให้ความกว้างของชั้นปลอดพาหะลดลงซึ่งมีผลให้ความจุไฟฟ้ารอยต่อเพิ่มขึ้นและเป็นการเพิ่มชั้นฟิล์มเพชรให้กว้างขึ้นทำให้มีปริมาณพาหะที่เกินนอกบริเวณชั้นปลอดพาหะมากขึ้นและทำให้เวลาแพร่ซึมมากขึ้นด้วย ตารางที่ 5.4 แสดงช่วงเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงกับแบนด์วิดท์เมื่อเพิ่มปริมาณอะตอมสารเจือโบรอนในฟิล์มเพชรที่นำมาสร้างอุปกรณ์



รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้น เวลาขาลงและแบนด์วิดท์ของชอตคกีโฟโตไดโอดกับอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน

ตารางที่ 5.4 ช่วงเวลาขาขึ้น ขาลงและค่าแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ชอตคกีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรที่มีการเติมอะตอมสารเจือในปริมาณต่างกัน

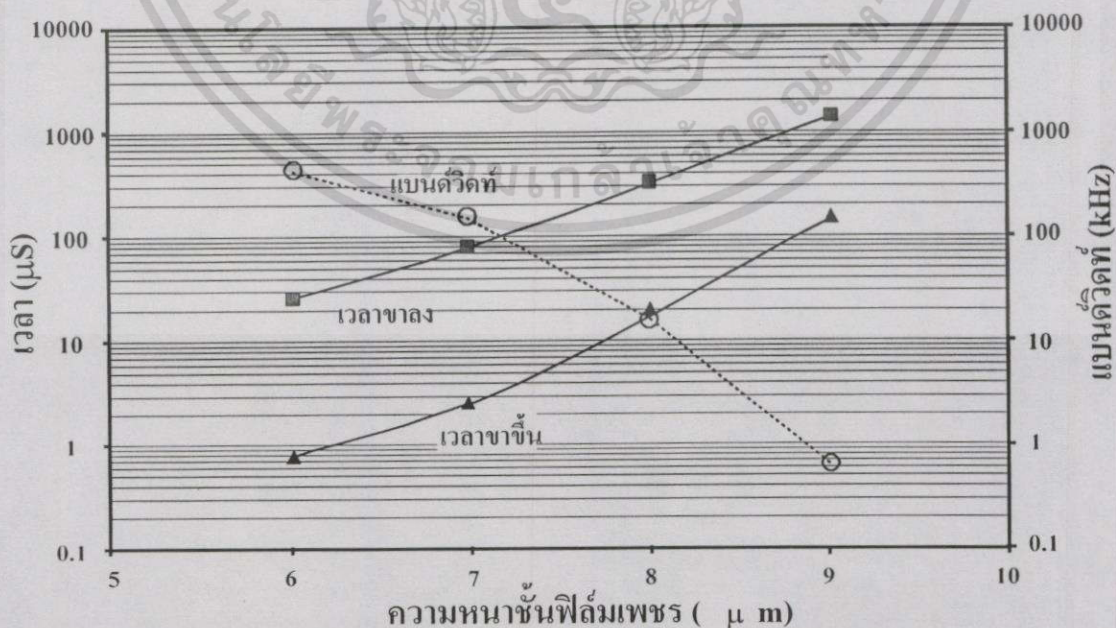
อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน	เวลาขาขึ้น ( $\mu s$ )	เวลาขาลง ( $\mu s$ )	แบนด์วิดท์ (kHz)
อินทรินซิก	14	250	25.0
10 ppm	20	330	17.5
100 ppm	33	520	10.6
1000 ppm	56	780	6.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ขอตดักโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก จะมีช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงต่ำที่สุดคือ  $14 \mu s$  และ  $250 \mu s$  ตามลำดับ และมีค่าแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์  $25 \text{ kHz}$  สำหรับอุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิด  $1000 \text{ ppm}$  จะมีช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงมากที่สุด คือ  $56 \mu s$  และ  $780 \mu s$  ตามลำดับ และแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์มีค่า  $6.25 \text{ kHz}$  จากผลการทดลองแสดงว่าการเพิ่มปริมาณอะตอมสารเจือโบรอนในฟิล์มเพชรจะทำให้อุปกรณ์ขอตดักโฟโตไดโอดมีความเร็วในการตอบสนองช้าลง ดังนั้นถ้าต้องการให้อุปกรณ์มีการตอบสนองที่เร็วและมีแบนด์วิดท์กว้างควรสร้างอุปกรณ์ขอตดักโฟโตไดโอดลงบนฟิล์มเพชรที่มีการเติมสารเจือปริมาณน้อยๆหรือไม่เติมเลย

5.5.3.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชรที่มีต่อความเร็วในการตอบสนอง

ในหัวข้อนี้จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชรซึ่งจะมีผลให้การดูดกลืนแสงในชั้นฟิล์มเพชรและบริเวณปลอดพาหะเปลี่ยนแปลงโดยจะส่งผลกระทบต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์ การทดลองเราใช้ฟิล์มเพชรชนิด  $10 \text{ ppm}$  ให้แรงดันไบแอสย้อนกลับขอตดักโฟโตไดโอดคงที่เท่ากับ  $5 \text{ โวลต์}$  ดังนั้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าคงที่ซึ่งแฟกเตอร์สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการตอบสนองจึงขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนความหนาของชั้นฟิล์มเพชร โดยในการทดลองเราใช้ฟิล์มเพชรความหนา  $9, 8, 7$  และ  $6 \text{ ไมครอน}$  การลดความหนาของชั้นฟิล์มเพชรจะใช้วิธีการกัดฟิล์มเพชรจากด้านบนหลังตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ในหัวข้อการกัดฟิล์มเพชร ผลการทดลองแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงและค่าแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ที่ความหนาฟิล์มเพชรต่างๆแสดงดังกราฟรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้น ขาลงและแบนด์วิดท์กับความหนาฟิล์มเพชร

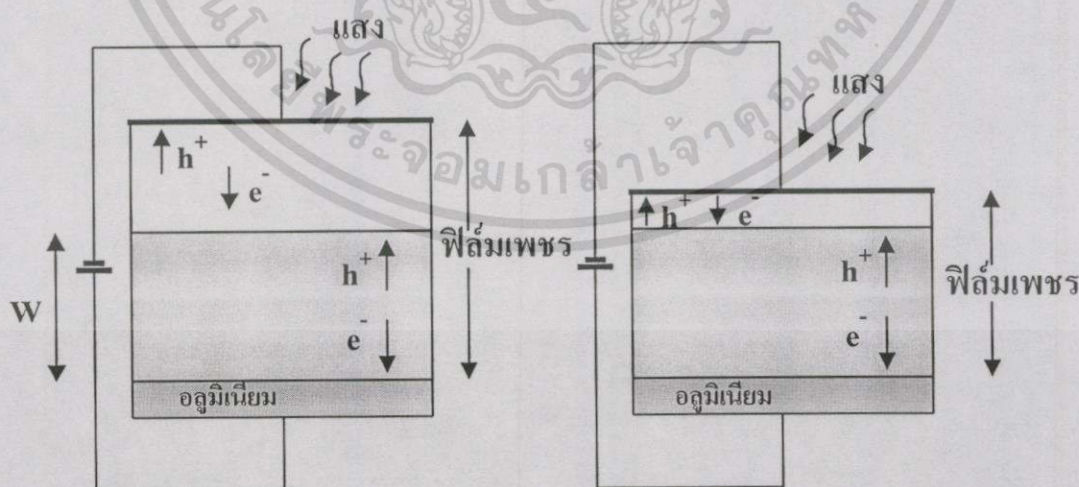
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟเมื่อลดความหนาฟิล์มเพชรลงจาก 9 ไมครอนเหลือ 6 ไมครอน ช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงจะลดลงจาก 170  $\mu s$  เป็น 0.75  $\mu s$  และ 1800  $\mu s$  เป็น 28  $\mu s$  ตามลำดับ ในขณะที่แบนด์วิดท์จะเพิ่มขึ้นจาก 0.6 kHz เป็น 450 kHz ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ช่วงเวลาขาขึ้น ขาลงและค่าแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm ที่ค่าความหนาฟิล์มเพชรต่างกัน

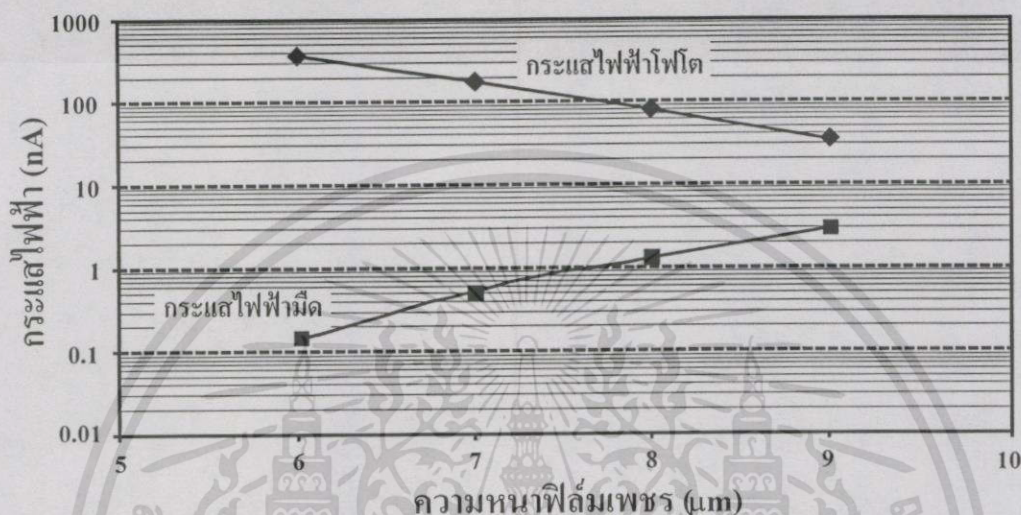
ความหนาฟิล์มเพชร ( $\mu m$ )	เวลาขาขึ้น ( $\mu s$ )	เวลาขาลง ( $\mu s$ )	แบนด์วิดท์ (kHz)
6	0.75	28	450
7	3.5	78	160
8	20	330	17.5
9	170	1800	0.6

จากผลการทดลองพบว่า การลดความหนาชั้นฟิล์มเพชรทำให้อุปกรณ์มีความเร็วในการตอบสนองดีขึ้นมากทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองชอตต์กีโฟโตไดโอดที่เปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มเพชรดังรูปที่ 5.38 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองและทฤษฎีของเวลาแพร่ซึ่งพบว่าเมื่อลดความหนาของฟิล์มเพชรลงจะทำให้การดูดกลืนแสงในชั้นฟิล์มเพชรมีผลน้อยลงทำให้ค่าเวลาแพร่ซึ่งลดลงและทำให้มีปริมาณแสงถูกดูดกลืนในบริเวณปอดพาหะเพิ่มขึ้นเนื่องจากแสงสามารถทะลุผ่านสู่ชั้นปอดพาหะได้มากขึ้นซึ่งจะสังเกตได้จากปริมาณของกระแสไฟฟ้าโฟโตที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.38 แบบจำลองโครงสร้างชอตต์กีโฟโตไดโอดที่เปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชร (W คือ ความกว้างบริเวณปอดพาหะ)

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มเพชรกับปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืดแสดงในรูปที่ 5.39 และตารางที่ 5.6 จากกราฟกระแสไฟฟ้าโฟโตจะเพิ่มขึ้นจาก 80 nA เป็น 350 nA เมื่อลดความหนาฟิล์มลงจาก 8 ไมครอนเหลือ 6 ไมครอน และกระแสไฟฟ้ามืดจะลดลงจาก 1.3 nA เหลือ 0.15 nA



รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มเพชรกับกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืด

ตารางที่ 5.6 กระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืดของอุปกรณ์ชนิดดีโอดีไอชนิด 10 ppm ที่ค่าความหนาฟิล์มเพชรต่างกัน

ความหนาฟิล์มเพชร ( $\mu\text{m}$ )	กระแสไฟฟ้ามืด (nA)	กระแสไฟฟ้าโฟโต (nA)
6	0.15	350
7	0.5	180
8	1.3	80
9	3	35

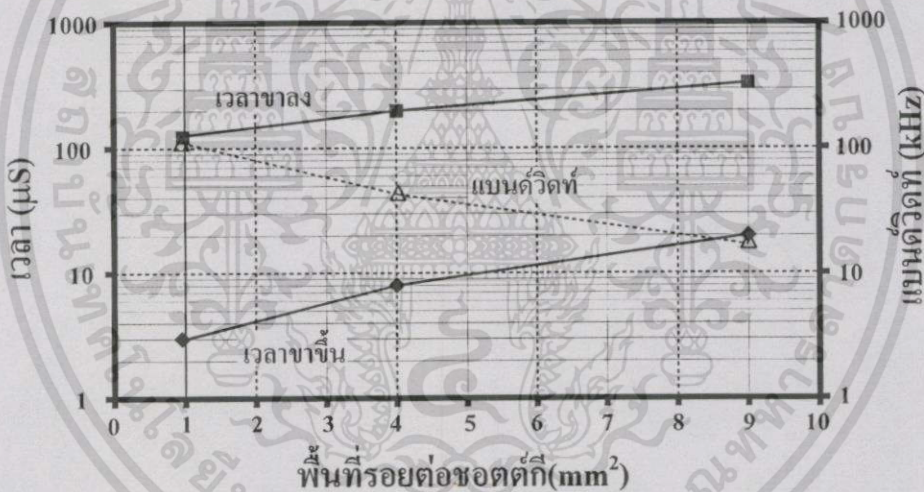
จากผลการทดลองพบว่า การลดความหนาของฟิล์มเพชรที่นำมาสร้างอุปกรณ์จะทำให้อุปกรณ์มีความเร็วในการตอบสนองดีขึ้นและทำให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตเพิ่มขึ้นด้วย

### 5.5.3.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่รอยต่อขอตักที่มีต่อความเร็วในการตอบสนอง

แพ็คเกจที่มีส่วนในการกำหนดความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ค่าคงที่เวลา ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ต้องใช้ในการชาร์จประจุไฟฟ้าผ่านความจุไฟฟ้าของรอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อขอต็คีและค่าความต้านทานโหลด ดังนั้นการออกแบบให้ขอต็คีไดโอดมีพื้นที่รอยต่อน้อยๆจะมีส่วนช่วยในการลดค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อได้ ในหัวข้อนี้จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่รอยต่อว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์ การทดลองใช้ฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm ให้ไบแอสแรงดันย้อนกลับ 5 โวลต์ ใช้ความต้านทานโหลดขนาด 3 กิโลโอห์ม ผลของเวลาตอบสนองและแบนด์วิดท์แสดงในกราฟรูปที่ 5.40 และตารางที่ 5.7 จากผลการทดลองแสดงว่าเมื่อลดขนาดของพื้นที่รอยต่อลงจะทำให้เวลาในการตอบสนองเร็วขึ้นและเป็นการเพิ่มแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ด้วย เนื่องจากการลดพื้นที่รอยต่อจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อลดลงด้วย  $C \propto \frac{A}{W}$  แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปริมาณความเข้มแสงที่ตรวจวัดด้วยเพราะการลดพื้นที่ไดโอดจะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตนลดลงด้วย ในการทดลองจะได้อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของเวลาตอบสนองเมื่อเพิ่มพื้นที่ของรอยต่อขอต็คีไดโอดเป็น  $24.75 \mu s / mm^2$  (เวลาขาขึ้น) และ  $2.1 \mu s / mm^2$  (เวลาขาลง) สำหรับแบนด์วิดท์จะลดลงเฉลี่ย  $12.3 \text{ kHz}$  ต่อการเพิ่มพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้น ขาลงและแบนด์วิดท์กับพื้นที่รอยต่อของขอต็คีโฟโตนไดโอด

ตารางที่ 5.7 ช่วงเวลาขาขึ้น ขาลงและแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ขอต็คีโฟโตนไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm ที่ขนาดพื้นที่รอยต่อไดโอดต่างกัน

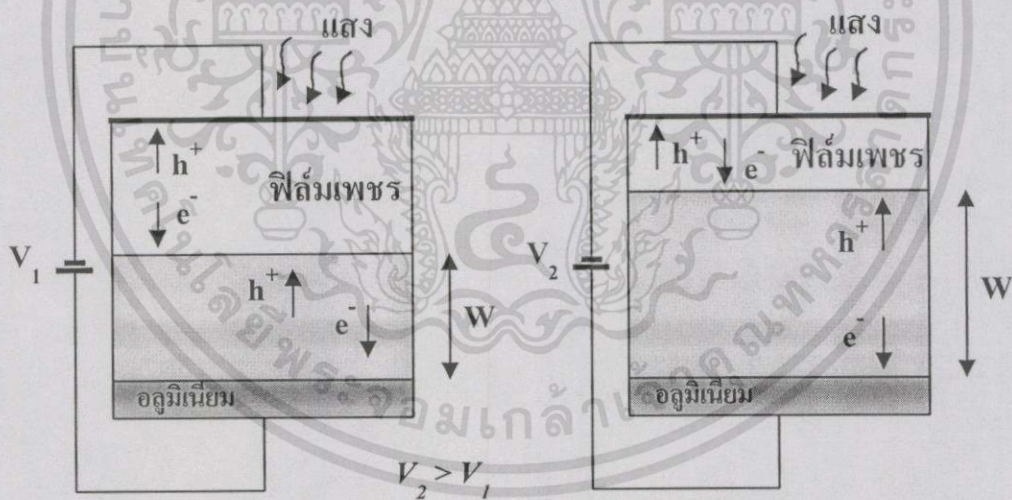
พื้นที่รอยต่อ (mm <sup>2</sup> )	เวลาขาขึ้น(μs)	เวลาขาลง(μs)	แบนด์วิดท์ (kHz)
1	3	120	100
4	8	200	45
9	20	330	17.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

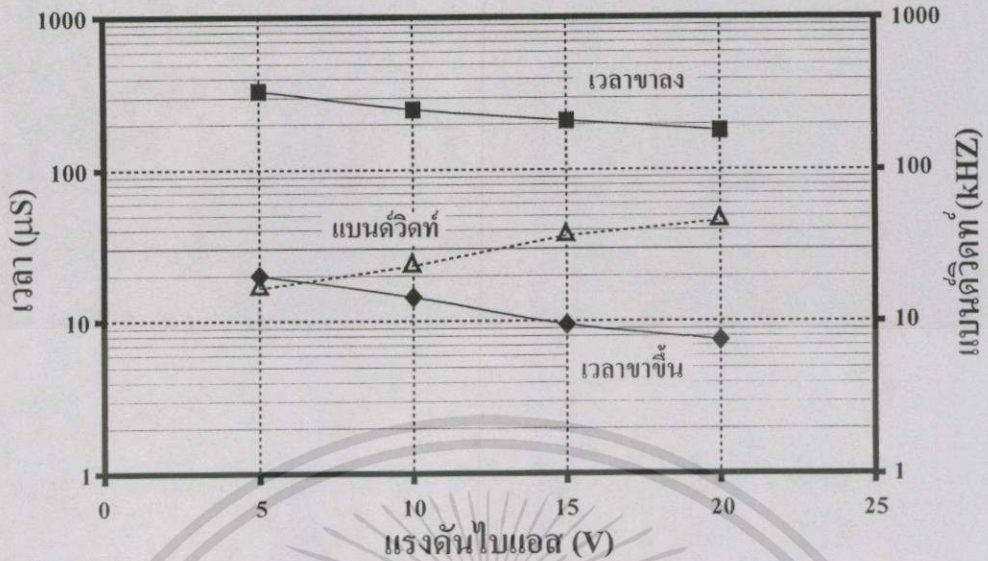
จากผลการทดลองพบว่าการลดพื้นที่รอยต่อขอตัก์ของอุปกรณ์ลงจะทำให้อุปกรณ์มีความเร็วในการตอบสนองดีขึ้นและมีแบนด์วิดท์มากขึ้น แต่ทั้งนี้การลดพื้นที่ลงต้องคำนึงถึงปริมาณความเข้มแสงที่ตรวจวัดด้วยเนื่องจากเมื่อลดพื้นที่จะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตนอลงด้วย

5.5.3.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสที่มีต่อความเร็วในการตอบสนอง

เนื่องจากโฟโตไดโอดทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์ของโฟโตโวลทาทิก คือ โฟโตไดโอดสามารถทำงานให้สัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้แม้ไม่มีการให้แรงดันไบแอสกับอุปกรณ์ แต่การป้อนแรงดันไบแอสแบบย้อนกลับให้โฟโตไดโอดขณะทำงานจะช่วยให้โฟโตไดโอดมีความเร็วตอบสนองได้ดีขึ้นและมีคุณสมบัติเชิงเส้นที่ดีขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มแรงดันไบแอสมีส่วนทำให้กระแสไฟฟ้าโฟโตเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มแรงดันไบแอสย้อนกลับทำให้ชั้นปลอดพาหะมีความหนาแน่นมากขึ้น ดังนั้นการทดลองหัวข้อนี้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับของขอตัก์โฟโตไดโอดตั้งแต่ 5 ถึง 20 โวลต์ เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสต่อความเร็วในการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ ภาพจำลองโครงสร้างขอตัก์โฟโตไดโอดเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไบแอสแสดงในรูปที่ 5.41 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.42 และตารางที่ 5.8



รูปที่ 5.41 ภาพจำลองโครงสร้างขอตัก์โฟโตไดโอดเมื่อเพิ่มแรงดันไบแอส (V คือ ไบแอส และ W คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ)



รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้น ขาลงและแบนด์วิดท์ของชุดคิกโฟโตไดโอดกับไบแอส

ตารางที่ 5.8 ช่วงเวลาขาขึ้น ขาลงและแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ชุดคิกโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm เมื่อให้แรงดันไบแอสย้อนกลับค่าต่างๆ

แรงดันไบแอสย้อนกลับ (V)	เวลาขาขึ้น (μs)	เวลาขาลง (μs)	แบนด์วิดท์ (kHz)
5	20	330	17.5
10	15	250	23
15	9.8	210	33
20	7.5	180	42

พิจารณาจากผลการทดลองพบว่าถ้าเพิ่มค่าแรงดันไบแอสจาก 5 โวลต์ เป็น 20 โวลต์ เวลาขาขึ้นจะลดลง 12.5 μs และ เวลาขาลงจะลดลง 150 μs ในขณะที่แบนด์วิดท์ เพิ่มขึ้น 24 kHz

จากผลการทดลองแสดงว่าการเพิ่มแรงดันไบแอสจะทำให้เวลาการตอบสนองเร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มแรงดันไบแอสจะทำให้เวลาพัลสดลดลงเนื่องจากประจุพาหะจะเคลื่อนที่ภายในบริเวณปลอดพาหะด้วยความเร็วมากขึ้นและค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อจะลดลงเมื่อไบแอสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ประจุพาหะที่เกิดนอกบริเวณปลอดพาหะมีจำนวนลดลงและเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นด้วย แต่ต้องระวังการเพิ่มแรงดันไบแอสย้อนกลับมากเกินไปจะทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างมากจนทำให้ประจุพาหะต้องใช้เวลาดำเนินทางในบริเวณปลอดพาหะยาวนานขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าเวลาพัลดาเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับกรณีของชุดคิกโฟโตไดโอดที่สร้างบนฟิล์มเพชรอิทธิพลของเวลาพัลดาจะมีไม่มากนักทั้งนี้จากการคำนวณค่าเวลาพัลดา ( $T_{dr} = w^2/\mu V_R$ ) ของชุดคิกโฟโตไดโอดจะอยู่ในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนวินาที (คำนวณโดยใช้ค่า  $\mu = 20 - 60 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$  [25],[26])ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเวลาแพร่ซึมและค่าคงที่เวลาRCมาก ดังนั้นการเกิดความล่าช้าของเวลาตอบสนองของอุปกรณ์จึงน่าจะมาจากค่าเวลาแพร่ซึมและค่าคงที่เวลาRCมากกว่า และนอกจากนั้นการไบแอสแรงดันไฟฟ้าสูงในขณะที่ความเข้มแสงน้อยจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามืดซึ่งเป็นสาเหตุของสัญญาณรบกวน ดังนั้นโดยทั่วไปการให้ไบแอสแรงดันจะใช้ค่าประมาณไม่เกินแรงดันที่ทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วอิ่มตัว (saturation velocity)

#### 5.5.4 การเกิดสัญญาณรบกวนในขอตักกีโฟโตไดโอด

ขอตักกีโฟโตไดโอดจะมีความสามารถในการวัดแสงที่มีความเข้มต่ำมากได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณรบกวน (noise current) ที่เกิดในขอตักกีโฟโตไดโอด สัญญาณรบกวนในขอตักกีโฟโตไดโอดแบ่งได้เป็นสองชนิด คือ สัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอล  $i_t$  (thermal noise) เกิดจากความต้านทานชั้นดี และ สัญญาณรบกวนชนิดช็อต  $i_s$  (shot noise) เกิดจากกระแสไฟฟ้ามืดและกระแสไฟฟ้าโฟโต

##### 5.5.4.1 กระแสรบกวนชนิดเทอร์มอลในขอตักกีโฟโตไดโอด

กระแสรบกวนชนิดเทอร์มอล  $i_t$  หาได้จาก

$$i_t = \sqrt{4kTB \left( \frac{1}{R_{sh}} + \frac{1}{R_L} \right)} \quad (5.11)$$

เราสามารถคำนวณหาความต้านทานชั้นดี  $R_{sh}$  ได้โดยอาศัยกราฟคุณลักษณะกระแสแรงดันในสภาพมืด ซึ่งจะใช้ช่วงไบแอสตั้งแต่ 0 mV ถึง -10 mV โดยอ่านค่ากระแสไฟฟ้ามืดที่แรงดันไบแอส -10 mV แล้วนำไปแทนค่าในสมการ (5.11) [10]

$$R_{sh} = \frac{10(mV)}{I_d(\Omega)} \quad (5.12)$$

จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานชั้นดีและกระแสรบกวนชนิดเทอร์มอล ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ค่าความต้านทานชั้นดีและกระแสบวณชนิดเทอร์มอลของขอตักกีโฟโตไดโอดที่ค่าอะตอมสารเจือโบรอนต่างๆ ณ. อุณหภูมิห้อง ( 297 องศาเคลวิน)

อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (ppm)	ความต้านทานชั้นดี ( $M\Omega$ )	กระแสบวณชนิดเทอร์มอล ( $nA$ )
อินทรีนซิก	17	0.37
10	7.4	0.31
100	1.2	0.24
1000	0.08	0.19

#### 5.5.4.2 กระแสบวณชนิดช็อค ในขอตักกีโฟโตไดโอด

กระแสบวณชนิดช็อคเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้ามืดและกระแสไฟฟ้าโฟโต

$$i_s = \sqrt{2qB(I_p + I_d)} \quad (5.13)$$

จากการคำนวณจะได้ค่ากระแสบวณชนิดช็อคในขอตักกีโฟโตไดโอดที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm มีค่า 21 pA, 16 pA และ 12 pA ตามลำดับ

จากผลการทดลองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ได้จากสมการที่ (5.14) [27]

$$SNR = \frac{I_p^2}{i_t^2 + i_s^2} \quad (5.14)$$

ตารางที่ 5.10 ค่า SNR ของอุปกรณ์ขอตักกีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรอัตราส่วนB/C ต่างๆ

อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (ppm)	สัญญาณจริง $I_p^2$ (A)	สัญญาณรบกวน $i_t^2 + i_s^2$ (A)	SNR (dB)
อินทรีนซิก	$9.6 \times 10^{-15}$	$13 \times 10^{-20}$	97.5
10	$6.4 \times 10^{-15}$	$9 \times 10^{-20}$	97.0
100	$3.6 \times 10^{-15}$	$5.8 \times 10^{-20}$	95.8
1000	$2.0 \times 10^{-15}$	$3.6 \times 10^{-20}$	94.9

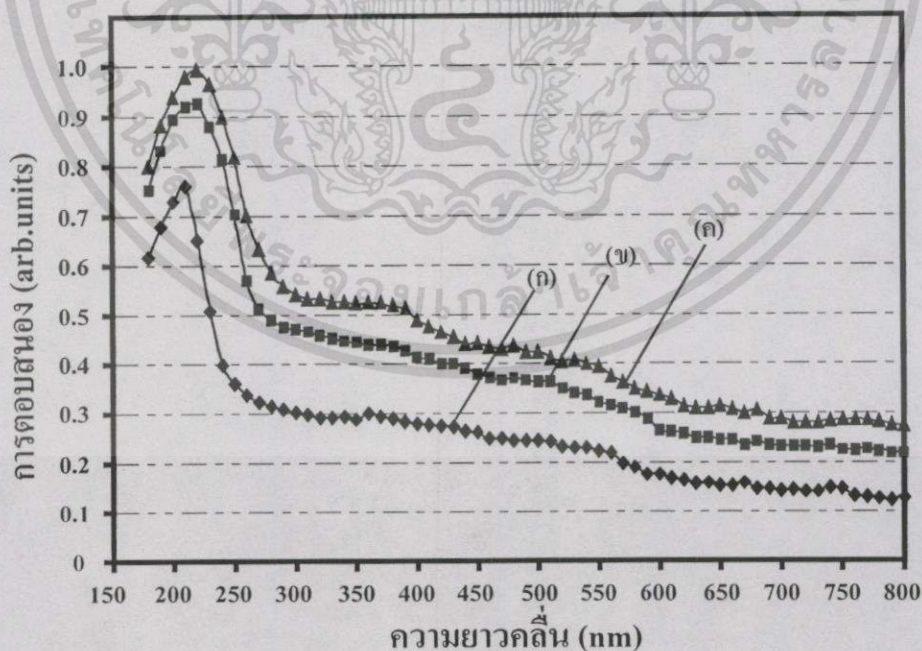
พิจารณาจากตารางที่ 5.10 พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือปริมาณน้อยจะมีอัตราส่วนของสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน (SNR) สูงกว่าอุปกรณ์ที่เติมอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเจือในปริมาณมากซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดที่สร้างบนฟิล์มเพชรที่มีการเติมอะตอมสารเจือโบรอนในปริมาณต่ำ

### 5.5.5 เสถียรภาพของชอตต์กีโฟโตไดโอดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

การศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดเป็นข้อคำนึงถึงอีกประการหนึ่ง ทั้งนี้เพื่อจะได้ทราบพฤติกรรมของอุปกรณ์เมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงขึ้นว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความน่าจะเป็นของการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ให้ขึ้นไปยังแถบคอนดักชันจะมีค่ามากขึ้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้ามีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและสัญญาณรบกวนทั้งชนิดเทอร์มอลและชนิดช็อตก็เพิ่มขึ้นด้วย สำหรับการทดลองเราเพิ่มอุณหภูมิของอุปกรณ์โดยใช้ความร้อนจากเพลตนิ้มไมโครฮีตเตอร์ซึ่งจะวางอยู่ข้างใต้อุปกรณ์ จากนั้นจึงนำอุปกรณ์มาศึกษาการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงในกราฟรูปที่ 5.43 จากกราฟสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบว่าอุปกรณ์มีการตอบสนองเพิ่มขึ้นที่ทุกค่าความยาวคลื่นแต่มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกราฟสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้างช่องว่างแถบพลังงานน้อยจะมีแนวโน้มของการตอบสนองที่ความยาวคลื่นยาวได้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงจะมีค่าสูงขึ้น โดยจะมีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วงความยาวคลื่นยาวแต่จะน้อยลงที่ความยาวคลื่นสั้น

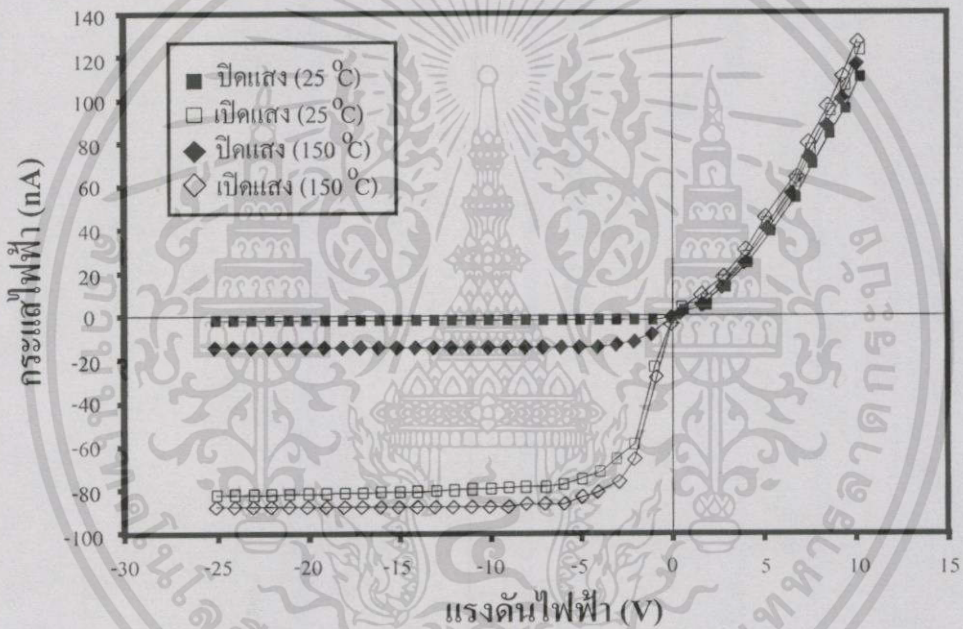


รูปที่ 5.43 สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ก) อุณหภูมิห้อง ข) อุณหภูมิ 150 °C ค) อุณหภูมิ 200 °C

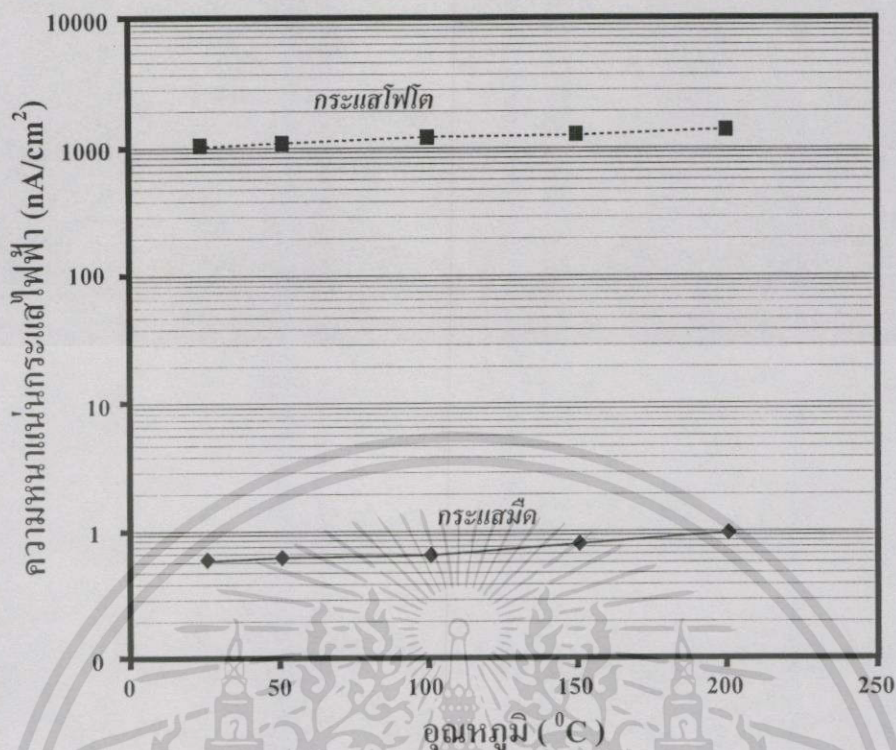
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกระแสไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความน่าจะเป็นของการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ให้ขึ้นไปแถบคอนดักชันจะมากมากขึ้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่สำหรับกรณีของขอตัก์โฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าน้อยเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง ผลการทดลองในกราฟรูปที่ 5.44 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับแสงของอุปกรณ์ขอตัก์โฟโตที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm ในการทดลองเราใช้อุปกรณ์ที่มีพื้นที่รอยต่อขนาด 0.09 ตารางเซนติเมตร ไบแอสแรงดันย้อนกลับ 0 ถึง 25 โวลต์และฉายแสงที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร

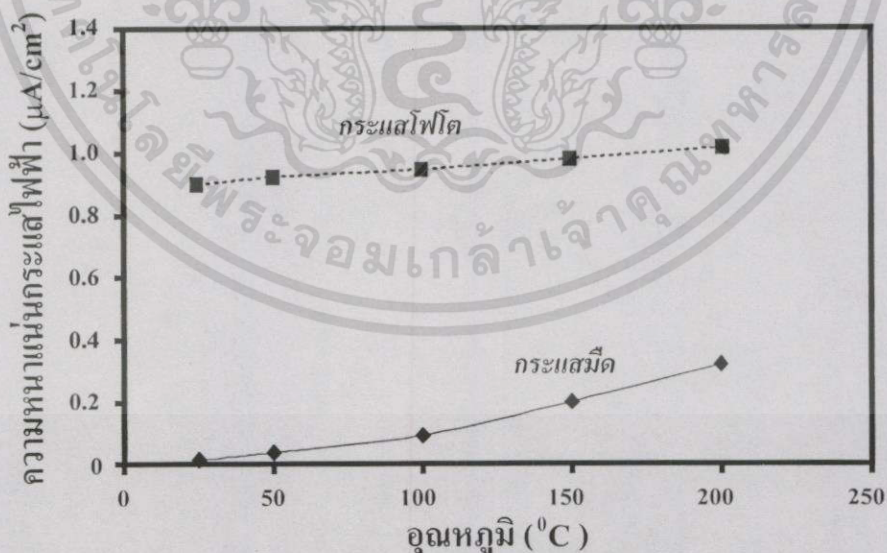


รูปที่ 5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันของอุปกรณ์ขอตัก์โฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm เมื่อไม่มีแสงและฉายแสงที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 150 °C

จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอุปกรณ์จะมีกระแสไฟฟ้านิ่งเพิ่มขึ้นและเมื่อฉายแสงให้กับอุปกรณ์ในขณะที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิเพิ่มเป็น 150 °C พบว่าอุปกรณ์จะมีกระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และในกราฟรูปที่ 5.45 ถึง 5.47 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้านิ่งกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ในการทดลองเราเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 25 °C ถึง 200 °C และฉายแสงที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ไบแอสแรงดันย้อนกลับ 5 โวลต์

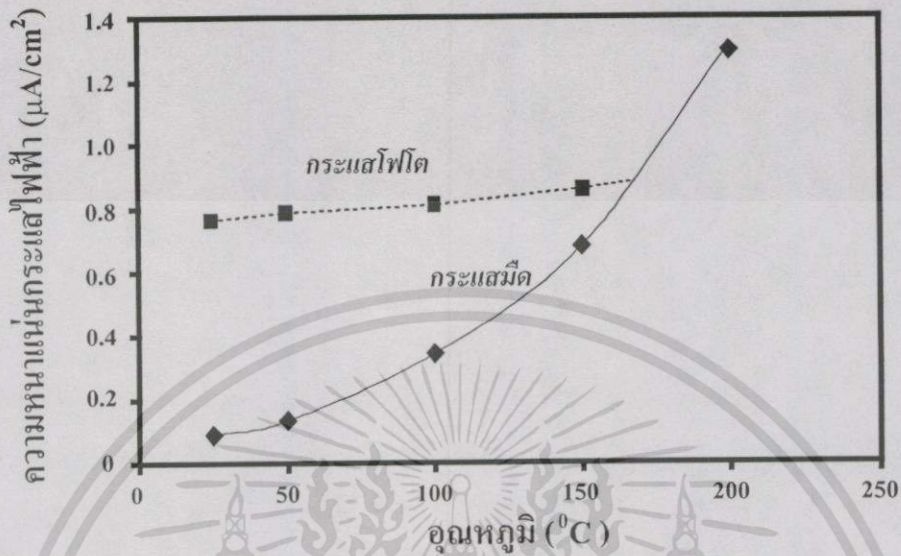


รูปที่ 5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้าแคโทดกับอุณหภูมิของอุปกรณ์ชนิดตกตะกอนโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

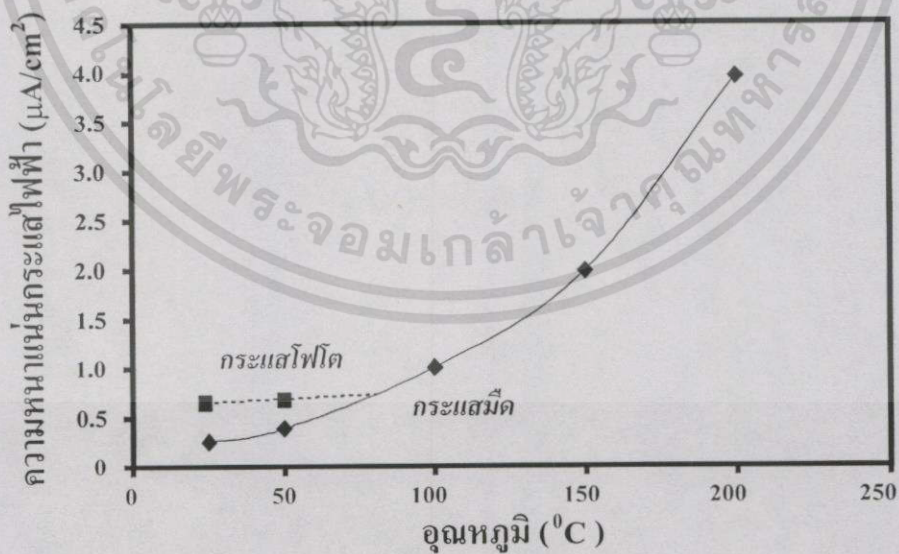


รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้าแคโทดกับอุณหภูมิของอุปกรณ์ชนิดตกตะกอนโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 10 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีดกับอุณหภูมิของอุปกรณ์ขอตักทีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 100 ppm



รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีดกับอุณหภูมิของอุปกรณ์ขอตักทีโฟโตไดโอดสร้างบนฟิล์มเพชรชนิด 1000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 5.45 ถึง 5.48 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืดจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยกระแสไฟฟ้ามืดจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นเร็วกว่ากระแสไฟฟ้าโฟโตเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่สำหรับอุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและชนิด 10 ppm ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อการตรวจวัดแสงมากนัก โดยความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืดของอุปกรณ์ 10 ppm มีค่าประมาณ  $0.8 \mu A/cm^2$  ในขณะที่อุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรที่มีการเติมอะตอมสารเจือในปริมาณที่สูงขึ้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามืดมากขึ้น โดยที่อุปกรณ์ 100 ppm เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า  $150^\circ C$  กระแสไฟฟ้าโฟโตจะใกล้เคียงกับกระแสไฟฟ้ามืด และอุปกรณ์ 1000 ppm เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง  $75^\circ C$  กระแสไฟฟ้ามืดจะมากกว่ากระแสไฟฟ้าโฟโต เป็นเหตุให้อุปกรณ์ไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนจากกระแสไฟฟ้ามืดมากกว่าสัญญาณแสงที่จะตรวจวัด เนื่องจากการไอออไนซ์ของประจุพาหะจากความร้อนจะมีปริมาณมากกว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง ดังนั้นการนำอุปกรณ์ชนิดซีทีโฟโตไดโอดสร้างจากฟิล์มเพชรไปใช้งานที่ความเข้มแสงต่ำๆต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้งานด้วย ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรที่มีการเติมสารเจือในปริมาณต่ำหรือไม่เติมเลยจะมีแนวโน้มทำงานได้ปกติที่อุณหภูมิสูง

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้แสดงผลการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำฟิล์มเพชรมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง โดยได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมทางแสงของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำทั้งชนิดอินทรีนซิกและชนิดเอกซ์ทรีนซิก โดยเริ่มแรกจะสร้างเป็นโครงสร้างแบบโฟโตนิกคอกเคอร์เพื่อที่จะศึกษาคุณสมบัติทางแสงต่างๆ ของฟิล์มเพชร เช่น การตอบสนองสเปกตรัมแสงของฟิล์มเพชร ความเร็วในการตอบสนอง ผลของการเติมอะตอมสารเจือที่มีต่อการตอบสนองต่อแสง เป็นต้น จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มเพชร จะให้การตอบสนองที่ดีต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตและให้การตอบสนองที่ต่ำกับแสงช่วงตามองเห็น และเมื่อเพิ่มปริมาณอะตอมสารเจือเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของการตอบสนองระหว่างแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงมองเห็นต่างกันมากขึ้น ในการทดลองศึกษาแรงดันไบแอสกับปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีด พบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสกับอุปกรณ์จะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีดเพิ่มขึ้น ในส่วนของการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์โฟโตคอกเคอร์เราพบว่า การออกแบบให้ระยะห่างของขั้วไฟฟ้ามีค่าน้อยๆ จะทำให้อุปกรณ์มีกระแสไฟฟ้าโฟโตมากขึ้นแต่ขณะเดียวกันกระแสไฟฟ้ามีดก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีดเมื่อระยะห่างขั้วเพิ่มขึ้นมีค่า 1 ไมโครแอมแปร์ต่อไมครอนและ 0.15 ไมโครแอมแปร์ต่อไมครอน ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าระยะห่างขั้ว 60 ไมครอนอุปกรณ์มีค่ากระแสไฟฟ้าโฟโต 0.01 mA และที่ระยะห่างระหว่างขั้วลดลงเหลือ 20 ไมครอนอุปกรณ์จะมีกระแสไฟฟ้าโฟโต 0.06 mA นอกจากนี้เมื่อลดระยะห่างระหว่างขั้วลงจะทำให้ความเร็วในการตอบสนองดีขึ้น สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อการตอบสนองเชิงเวลาได้แก่ ปริมาณอะตอมสารเจือ ซึ่งถ้าปริมาณอะตอมสารเจือเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วในการตอบสนองช้าลง ในการทดลองฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีความเร็วในการตอบสนองดีที่สุด การเพิ่มแรงดันไบแอสกับอุปกรณ์จะทำให้ผลการตอบสนองเชิงเวลาดีขึ้น นอกจากนี้ในการศึกษาเสถียรภาพของอุปกรณ์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบว่าอุปกรณ์ที่มีการเติมอะตอมสารเจือในปริมาณน้อยจะมีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิต่ำสุด โดยอุปกรณ์จะมีการเปลี่ยนแปลงมากสุดในช่วงอุณหภูมิ 100 – 200 องศาเซลเซียส และการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์จึงมีเส้นพรมแดนผลึกจำนวนมากทำให้พฤติกรรมทางแสงและทางไฟฟ้าแตกต่างไปจากผลึกแบบเดี่ยว โดยสังเกตได้จากเวลาการตอบสนองมีค่าสูงมาก(อยู่ในช่วงวินาที) ดังนั้นการจะนำฟิล์มเพชรมาพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงให้มีประสิทธิภาพดีนั้นจึงต้องมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงโครงสร้างของอุปกรณ์เสียก่อน ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้โครงสร้างแบบชอตต์กีไดโอด สร้างบนฟิล์มเพชรด้วยเหตุผลที่ว่ามีการบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากนักและโครงสร้างแบบไดโอดจะมีความไวในการทำงานดีกว่า นอกจากนี้ชอตต์กีโฟโตไดโอดที่สร้างเราจะออกแบบให้ทำงานในแนวตั้งแทนที่จะทำงานในแนวราบ(planar) โดยพิจารณาจากโครงสร้างของฟิล์มเพชรที่เป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ซึ่งถ้าออกแบบให้ทิศทางการเดินทางของประจุพาหะเป็นไปในแนวเดียวกับเส้นพรมแดนผลึกก็น่าจะช่วยลดอิทธิพลของเส้นพรมแดนผลึกได้และนอกจากนี้โครงสร้างไดโอดแบบนี้บริเวณปลอดพาหะของอุปกรณ์ยังสัมพันธ์กับแสงโดยตรงทำให้ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตในปริมาณสูงและต่ำลดความหนาฟิล์มเพชรลง โดยการกัดฟิล์มเพชรออกจากด้านล่างจนมีขนาดใกล้เคียงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะแล้วจะทำให้อุปกรณ์ทำงานได้เสมือนหนึ่งว่าเป็นผลึกแบบเดี่ยว จากผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติกระแสแรงดันของชอตต์กีไดโอดพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกมีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลย้อนกลับต่ำสุด คือประมาณ 0.05 นาโนแอมแปร์ ในขณะที่ฟิล์มเพชรชนิด 1000 ppm มีค่ามีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลย้อนกลับมากที่สุด คือประมาณ 42 นาโนแอมแปร์ การศึกษาค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อชอตต์กีพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างบนฟิล์มเพชรอินทรินซิก มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดคือประมาณ  $0.07 \mu F / cm^2$  (ไบแอสย้อนกลับ 5 โวลต์) และสามารถคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าภายในของชอตต์กีไดโอดอินทรินซิก 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm ได้ค่า 1.0, 1.17, 1.20 และ 1.25 โวลต์ ตามลำดับ และได้ค่าความสูงกำแพงศักย์เฉลี่ยประมาณ 1.31 โวลต์

การทดลองศึกษาคุณสมบัติทางแสงของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดโดยนำอุปกรณ์มาฉายด้วยแสงพบว่าอุปกรณ์ชนิดอินทรินซิกมีปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตสูงสุด ผลการศึกษาสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์พบว่าอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดมีความแตกต่างในการตอบสนองแสงอัลตราไวโอเล็ตกับแสงมองเห็นมากกว่าอุปกรณ์โฟโตคอนดักเตอร์มาก สำหรับการทดลองศึกษาการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณอะตอมสารเจือมากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาตอบสนองนานขึ้นและค่าแบนด์วิดท์ลดลง โดยแบนด์วิดท์จะลดลงจาก 17.5 kHz ที่ 10 ppm เหลือประมาณ 6.25 kHz ที่ 1000 ppm ผลการทดลองลดความหนาของฟิล์มเพชรลงโดยใช้วิธีการกัดฟิล์มเพชรออกด้วยไมโครเวฟพลาสมาพบว่าอุปกรณ์ที่ลดความหนาลงจะมีความเร็วในการตอบสนองดีขึ้นมากและมีค่าแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นมากเช่นกัน โดยแบนด์วิดท์เพิ่มจาก 17.5 kHz ที่ความหนา 8 ไมครอน เป็น 460 kHz ที่ความหนา 6 ไมครอน และนอกจากนี้การลดความหนาชั้นฟิล์มเพชรลงจะทำให้ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณกระแสไฟฟ้ามีดจะลดลง ผลการทดลองศึกษาการลดขนาดพื้นที่รอยต่อชอตต์กีของอุปกรณ์พบว่าเมื่อพื้นที่รอยต่อลดลงจะทำให้ความเร็วในการตอบสนองดีขึ้นแต่ก็จะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าโฟโตลดลงด้วย สำหรับการ

เพิ่มแรงดันไบแอสให้กับอุปกรณ์จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นทำให้ได้กระแสไฟฟ้าโฟโตมากขึ้นและความเร็วในการตอบสนองดีขึ้น

การเกิดสัญญาณรบกวนในขอตัก์ทีโฟโตไดโอดแบ่งเป็นสองชนิดคือ ชนิดเทอร์มอลและชนิดช็อค โดยในการทดลองเราสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของอุปกรณ์ชนิดอินทรีนซิก 10 ppm 100 ppm และ 1000 ppm ได้เป็น 97.5, 97.0, 95.8 และ 94.9 dB ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าอุปกรณ์ชนิดอินทรีนซิกมีอัตราส่วนสัญญาณจริงต่อสัญญาณรบกวนมากที่สุด

ผลการทดลองศึกษาเสถียรภาพของอุปกรณ์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิพบว่าอุปกรณ์ที่มีการเติมอะตอมสารเจือปนน้อยจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งกระแสไฟฟ้าโฟโตและกระแสไฟฟ้ามีดต่ำกว่าอุปกรณ์ที่เติมอะตอมสารเจือปนปริมาณมาก จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์ชนิด 1000 ppm เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากกว่า 100 องศาเซลเซียส ค่ากระแสไฟฟ้ามีดจะมากกว่ากระแสไฟฟ้าโฟโตทำให้อุปกรณ์ไม่สามารถตรวจวัดแสงได้ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนสูงกว่าสัญญาณจริง ดังนั้นการนำอุปกรณ์ไปใช้ตรวจวัดแสงในสภาพอุณหภูมิสูงควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีการเติมอะตอมสารเจือปนปริมาณน้อย

จากผลการทดลองทั้งหมดพอสรุปได้ว่าการพัฒนาเพื่อนำฟิล์มเพชรไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงควรเลือกสร้างบนฟิล์มเพชรที่มีการเติมอะตอมสารเจือปนในปริมาณต่ำ ทั้งนี้จะทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ทั้งในแง่ของความเร็วในการตอบสนอง ปริมาณความเข้มแสงที่ตรวจวัด และความเสถียรกับอุณหภูมิ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert C. Weast. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. 64<sup>th</sup> ed : CRC Press, Inc. 1983. pp. E76-77.
- [2] Annika Nilsson. **Ultraviolet Reflections Life Under A Thinning Ozone Layer** : John Wiley & Sons Ltd. 1996. pp. 14-15.
- [3] R.F. Davis. **Diamond films and Coatings** . New Jersey : Noyes publications, 1993
- [4] K.E. Spear, J.P. Dismukes. **Synthetic Diamond : Emerging CVD Science and Technology**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [5] W.Muller-Sebert, Ch.Wild, P.Koidl, N.Herres, J.Wagner and T.Eckermann " Polycrystalline Diamond for Optical thin films." *Materials Science and Engineering*, B11, 1992. pp.173-178.
- [6] S.M. Sze. **Semiconductor Devices : Physics and Technology** . New York : John Wiley & Sons, Inc. 1985. pp. 364-391.
- [7] Mitsuo Fukuda. **Optical Semiconductor Devices**. Kanagawa : NTT .1992.
- [8] Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. **Semiconductor Photoelectric Devices**. Great Britain: Iliffe Books Ltd. 1968. pp 65-71.
- [9] David Wood. **Optoelectronic Semiconductor Devices**. Hertfordshire : Prentice Hall International. 1992. pp 249-270.
- [10] คูสิต เครื่องาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่มที่ 1** . กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [11] Jasprit Singh. **Optoelectronics, An Introduction to Material and Devices**. Singapore: McGraw-Hill Companies, Inc. 1996. pp.131-151.
- [12] Louis Desmarais. **Applied Electro Optics**. New Jersey: Prentice Hall. 1998. pp. 213-257.
- [13] John M. Senior. **Optical Fiber Communications: Principles and Practices**, Second Edition. Hertfordshire: Prentice Hall. 1992. pp. 419-441.
- [14] S.M. Sze. **Physics of Semiconductors Devices : Second Edition**. New Jersey: John Wiley & Son, Inc. 1981. pp. 743-789.
- [15] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง “ การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิคอน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544. หน้า 61-67.

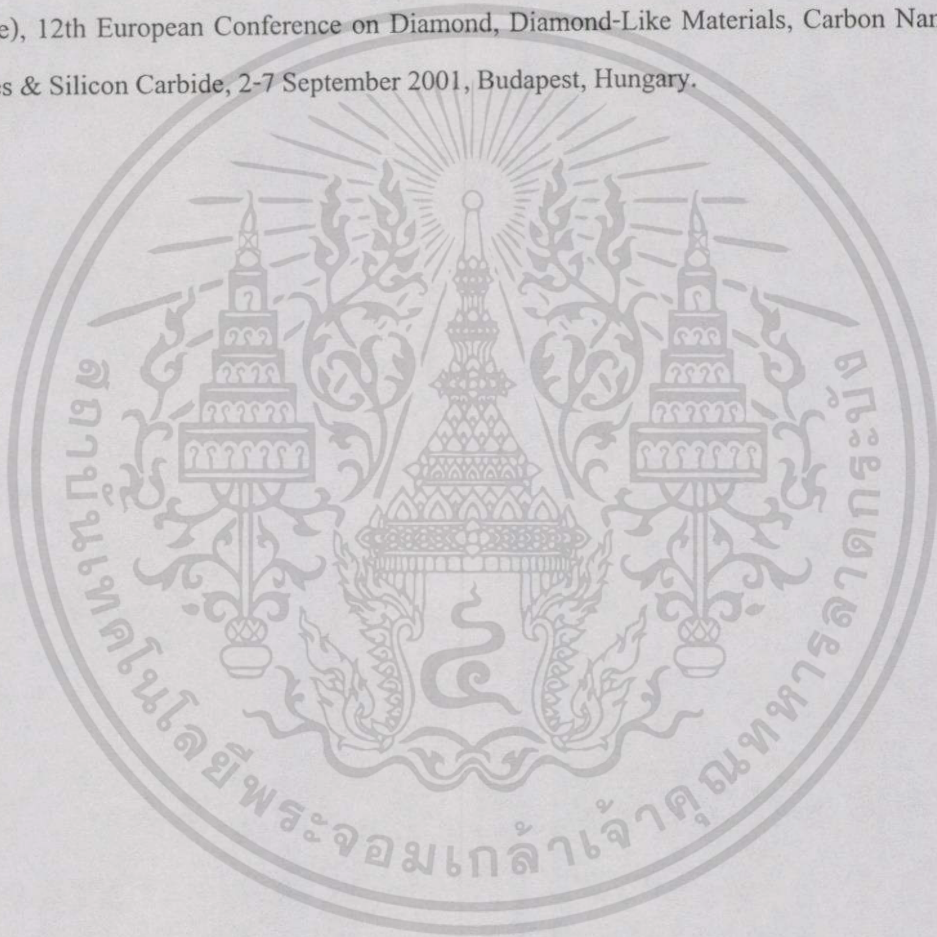
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Tobias Ohling “Characterisation of Metal Contacts to Boron-Doped Diamond Film; using the HP VEE programming language.” Final thesis, Department of Physics and Measurement Technology, Linkopings Universitet, Sweden, 2000.
- [17] S. Desmond Smith. **Optoelectronics Devices**. Hertfordshire: Prentice Hall, 1995. pp.10-14.
- [18] ลัดไทย ไทโยชิน, เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล และ สมเกียรติ สุกเดช “อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยฟิล์มเพชร” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 พฤศจิกายน 2543, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หน้า 753-756.
- [19] ศรีเมฆ รัตนชัย “เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิคอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542 หน้า 39-97.
- [20] R. Ramesham, B.H. Loo. “Air-Microwave Plasma Etching of Polycrystalline Diamond Thin Film.” J. Electrochem. Soc. Vol. 139, No.7, July 1992. pp. 1988-1993.
- [21] R. Ramesham, W. Welch, W. C. Neely, M. F. Rose, R. F. Askew. “Plasma Etching and Patterning of CVD Diamond at  $< 100^{\circ}\text{C}$  for Microelectronics applications.” Thin Solid Films 304, 1997. pp. 245-251.
- [22] เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล และ สมเกียรติ สุกเดช “การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรบน Si ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนโดยใช้  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 20 2540, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 425-500.
- [23] ภาณุพันธ์ โอพารกิจไพบูลย์ “การศึกษาคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS จากสารกึ่งตัวนำเพชร” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544 หน้า 2, 43.
- [24] สุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์ สมศักดิ์ เข็ยร์ศิริกุล และ สมเกียรติ สุกเดช “การสร้างฮีตเตอร์จากฟิล์มโลหะแพลทินัมโดยวิธีการดีซีสปัตเตอร์ริง” การประชุมวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 1 2543, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หน้า 239-241.
- [25] D. Takeuchi, S. Yamanaka and H. Okushi “Schottky Junction Properties of the Surface Conductivity Layer of Diamond” Diamond 2001, 12<sup>th</sup> European Conference on Diamond, Diamond-Like Material, 2-7 September 2001, Budapest, Hungary, Paper No. 4.3
- [26] C.E. Nebel, C. Sauerer, F. Ertl, M. Stutzmann, P. Bergonzo, H. Okushi, R. Jackman “Low Temperature properties of the P-Type Surface Conductivity of Diamond” Diamond 2001, 12<sup>th</sup> European Conference on Diamond, Diamond-Like Material, Carbon Nanotubes, Nitride & Silicon Carbide, 2-7 September 2001, Budapest, Hungary, Paper No. 4.2
- [27] John P. Bentley. **Principle of Measurement Systems**. :Teesside Polytechnic. 1995. pp.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

1. “UV Photodetectors from B-Doped Diamond Film” Tencon 2000 (IEEE Region10), 24-27 September 2000, Kuala Lumpur, Malaysia.
2. “อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยฟิล์มเพชร” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 พ.ศ. 2543 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. “UV Photodetector from Schottky Diode Diamond Film” Diamond 2001(Elsevier Science), 12th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide, 2-7 September 2001, Budapest, Hungary.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

การทำความสะอาดผิวผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (initial cleaning) มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (supersonic cleaning)
2. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
3. กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
4. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
5. ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะหนักที่ผิวหน้า
6. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
7. ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
8. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
9. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
10. ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
11. ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
12. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
13. จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 นาที
14. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
15. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## ภาคผนวก ข

การทำความสะอาดผิวหน้าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์เสร็จแล้วก่อนนำเข้ากระบวนการอื่นต่อไปมีขั้นตอนดังนี้

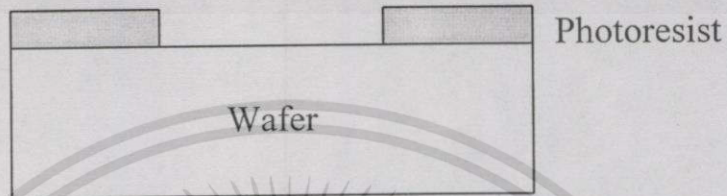
1. กัดด้วยสารละลายอิมตัวของโครเมียมไตรออกไซด์ ( $\text{CrO}_3$ ) ในกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ที่อุณหภูมิ  $170^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 นาที เพื่อกำจัดคราไฟท์ที่ผิวหน้า
2. ล้างด้วยสารละลายดิ่มเคือคของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) อัตราส่วน 1:1
3. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
4. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



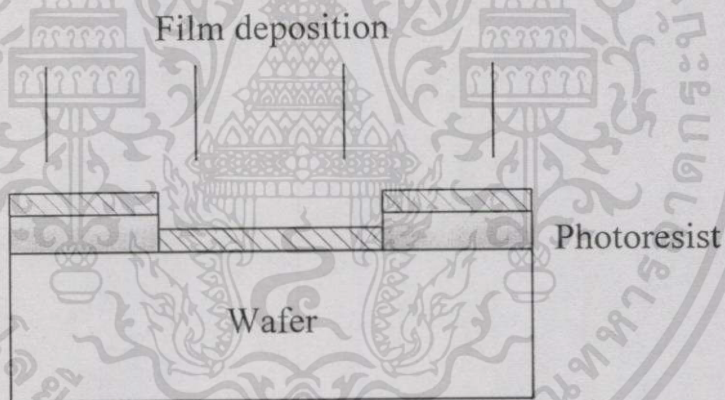
### ภาคผนวก ค

กระบวนการลิฟทอพอมีขั้นตอนดังนี้

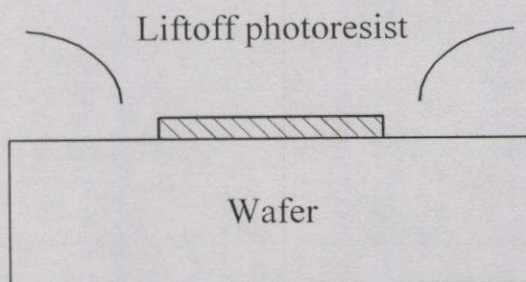
1. เปิดมาสก์ลวดลายตามต้องการ โดยใช้หน้ายาไวแสง (photoresist) เป็นตัวป้องกัน



2. ทำการสร้างชั้นฟิล์มบางที่ต้องการ ซึ่งทำได้หลายวิธีเช่น การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ การสปัตเตอร์ริง เป็นต้น



3. ลอกชั้นหน้ายาไวแสงออกโดยใช้สารละลายอะซิโตนซึ่งจะทำให้ฟิล์มบางในส่วนที่อยู่บนหน้ายาไวแสงหลุดลอกออกไปด้วย จะเหลือแต่ฟิล์มบางเป็นลวดลายตามที่ต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

วิธีการคำนวณหาอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B:C) ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่าง ต้องการหาอัตราส่วน B:C = 1 ppm ในสารละลาย 50 cm<sup>3</sup>

เนื่องจาก	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1 cm <sup>3</sup>	หนัก	0.796	กรัม
	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	50 cm <sup>3</sup>	หนัก	0.796x50 = 39.8	กรัม

โมเลกุลของ C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH = 2(12.01115) + 6(1.00797) + 1(15.9994) = 46.0695 กรัม/โมล

ดังนั้น C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 1 โมล จะมี C = 2(12.01115) = 24.023 กรัม

เพราะฉะนั้น C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 50 cm<sup>3</sup> มีปริมาณ  $\frac{39.80}{46.0695 \text{ g/mole}} = 0.8639$  โมล

ดังนั้น C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 0.8639 โมล มี C = 0.8639 x 24.023 = 20.7535 กรัม

โมเลกุลของ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 2(10.811) + 3(15.9994) = 69.6202 กรัม

โดย B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1 โมล จะมี B = 2(10.811) = 21.622 กรัม

ดังนั้น B:C = 1 ppm =  $\frac{1}{1 \times 10^6}$

คือ C 10<sup>6</sup> กรัม จะมี B อยู่ 1 กรัม

ถ้า C 20.7535 กรัม จะมี B เท่ากับ 2.07535 x 10<sup>-5</sup> กรัม

เพราะฉะนั้น B 21.622 กรัม จะมีอยู่ใน B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1 โมล

ดังนั้น B 2.07535 x 10<sup>-5</sup> กรัม จะมีอยู่ใน B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับ 9.5983 x 10<sup>-7</sup> โมล

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> น้ำหนักเท่ากับ (9.5983 x 10<sup>-7</sup>)(69.6202) = 6.6824 x 10<sup>-5</sup> กรัม

สำหรับ C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 50 cm<sup>3</sup>

B : C = 10 ppm ใช้ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> หนัก 6.6824 x 10<sup>-4</sup> กรัม

B : C = 100 ppm ใช้ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> หนัก 6.6824 x 10<sup>-3</sup> กรัม

B : C = 1000 ppm ใช้ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> หนัก 6.6824 x 10<sup>-2</sup> กรัม

มวลอะตอม : C = 12.01115 B = 10.811

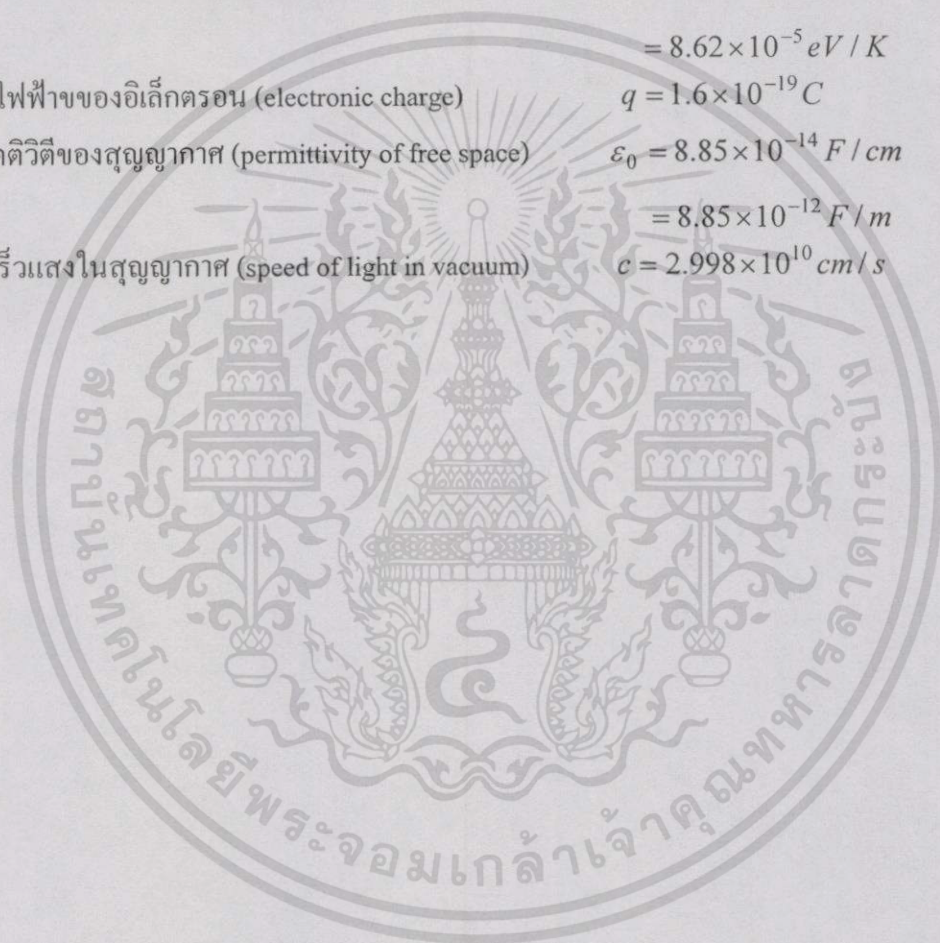
O = 15.9994 H = 1.00797

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)	$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ $= 4.135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant)	$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} / \text{K}$ $= 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV} / \text{K}$
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (electronic charge)	$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
เพอิมิตติวิตีของสุญญากาศ (permittivity of free space)	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F} / \text{cm}$ $= 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} / \text{m}$
ความเร็วแสงในสุญญากาศ (speed of light in vacuum)	$c = 2.998 \times 10^{10} \text{ cm} / \text{s}$



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายลัดไทย ไทโยธิน
วันเดือนปีเกิด	30 มิถุนายน 2514
ภูมิลำเนา	นนทบุรี
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาฟิสิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2535
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	

1. “การสร้างพอร์สซิลิคอนสำหรับไมโครซิสเต็ม” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 พ.ศ. 2539 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

2. “UV Photodetectors from B-Doped Diamond Film” Tencon 2000(IEEE Region10), 24-27 September 2000, Kuala Lumpur, Malaysia.

3. “อุปกรณ์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยฟิล์มเพชร” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 พ.ศ. 2543 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

4. “UV Photodetector from Schottky Diode Diamond Film” Diamond 2001(Elsevier Science), 12th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide, 2-7 September 2001, Budapest, Hungary.

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้

Ladthai@hotmail.com

<http://www.geocities.com/ladthai>