

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	2
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง.....	4
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง.....	4
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง.....	5
2.1.3 การเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง.....	6
2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดแสงและประเภทของตัวตรวจวัดแสง.....	7
2.2.1 โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn .....	7
2.2.2 พินโฟโตไดโอด.....	9
2.2.3 โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ.....	10
2.3 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	11
2.4 ข้อมูลจำเพาะพื้นฐานต่างๆของโฟโตไดโอด.....	12
2.4.1 กระแสมืดของโฟโตไดโอด .....	12
2.4.2 กระแสแสงของโฟโตไดโอด .....	13
2.4.3 แรงดันพังทลายของโฟโตไดโอด .....	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	15
2.4.5 ความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอด .....	15
2.5 สารกึ่งตัวนำเพชร.....	16
2.6 คุณสมบัติต่างๆของเพชร.....	18
2.6.1 คุณสมบัติทางกล .....	18
2.6.2 คุณสมบัติทางแสง .....	18
2.6.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	19
2.6.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น .....	19
2.7 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีCVDแบบต่างๆ.....	20
2.7.1 Thermal Enhanced CVD Methods .....	21
2.7.2 Plasma- Enhanced CVD Methods .....	21
2.7.3 Combustion Flame - Assisted CVD .....	22
2.8 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน .....	23
2.8.1 ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่ .....	23
2.8.2 ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุมูลของคาร์บอน .....	23
2.8.3 อุณหภูมิต้องมีความเหมาะสม .....	23
2.8.4 ต้องมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง .....	23
2.9 กลไกการเกิดฟิล์มเพชร โดยวิธี CVD .....	24
2.9.1 กระบวนการของก๊าซเฟส .....	24
2.9.2 ปรากฏการณ์นิวคลีเอชัน .....	24
2.10 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร .....	25
2.10.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM .....	25
2.10.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy .....	26
2.10.3 วิเคราะห์ด้วยวิธี Hot point probe .....	28
2.11 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ .....	28
2.11.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก .....	28
2.11.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี .....	29
2.11.3 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น .....	29
2.12 ทฤษฎีรอยต่อ .....	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12.1 รอยต่อพี-เอ็นของเนื้อสารต่างชนิดกัน .....	30
2.12.2 รอยต่อพี-เอ็นของเนื้อสารชนิดเดียวกัน .....	33
<b>บทที่ 3</b> กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	<b>36</b>
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง .....	36
3.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น.....	36
3.1.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร.....	36
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	37
3.3 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร.....	39
3.3.1 การออกแบบลวดลายโลหะ.....	39
3.3.2 การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรกับกาวเงิน.....	41
3.3.3 การสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร.....	41
3.4 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM และ เทคนิค Raman Spectroscopy.....	43
3.4.1 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM.....	43
3.4.2 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy.....	43
3.5 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชร .....	44
3.5.1 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	44
3.5.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชร.....	44
3.5.3 การศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร.....	44
3.6 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของ โฟโตไดโอด .....	45
3.6.1 การศึกษาคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอดในสภาวะมืด .....	45
3.6.2 การศึกษาคุณสมบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอด .....	45
3.6.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติ ของกระแส และแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	45
3.7 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอด .....	46

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น ที่มีผลต่อ คุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโพลีไดโอด .....	46
3.9 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของโพลีไดโอด .....	47
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....</b>	<b>48</b>
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	48
4.2 ผลการศึกษาการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชร .....	49
4.2.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร .....	49
4.2.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชร .....	50
4.2.3 ผลการศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร .....	52
4.3 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของโพลีไดโอด .....	53
4.3.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้า ของโพลีไดโอดในสภาวะมืด .....	53
4.3.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของโพลีไดโอด .....	54
4.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติ ของกระแส และแรงดันไฟฟ้าของโพลีไดโอด.....	55
4.4 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของโพลีไดโอด .....	56
4.5 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น ที่มีผลต่อ คุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโพลีไดโอด .....	60
4.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของโพลีไดโอด .....	62
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>68</b>
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก.....	72

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. รูปเครื่องมือวัดต่างๆ.....	73
ภาคผนวก ข. การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่าง B:C และ P:C .....	75
ภาคผนวก ค. ตารางคุณสมบัติต่างๆของเพชร.....	78
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	95

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนและ แกเลียมอาร์เซไนต์ .....	20
2.2 แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน .....	27
2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงาน ที่ 300K .....	32
3.1 เงื่อนไขการศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส .....	46
3.2 เงื่อนไขการศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอื่นที่มีต่อคุณสมบัติกระแส และแรงดัน .....	46
4.1 ค่าตัวแปรต่างๆของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	50
4.2 ค่าตัวแปรต่างๆของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น.....	50
4.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพี โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ P:C ค่าต่างๆ.....	51
4.4 ความหนาของฟิล์มเพชรที่เวลาการสังเคราะห์ค่าต่างๆ .....	53
4.5 ค่าของกระแสอิ่มตัวไหลย้อนกลับของ โฟโตไดโอดที่ค่า P:C ค่าต่างๆกัน.....	56

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	5
2.3 โครงสร้างภาคตัดขวาง และ สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น .....	7
2.4 โครงสร้างโฟโตไดโอดแบบ p-i-n.....	9
2.5 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อชอตต์กี.....	10
2.6 ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ.....	10
2.7 แสดงลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด.....	11
2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร $I_{sh}$ ของโฟโตไดโอด และความเข้มแสงอินพุต (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด $V_{oc}$ และความเข้มของแสงอินพุต .....	11
2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแสอิ่มตัวไหลย้อนกลับ ( $\ln(I)$ ) กับ แรงดันไบอัส .....	13
2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับแรงดันไบอัสย้อนกลับขณะได้รับแสงที่ ความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	14
2.11 แสดงค่าแรงดันพังทลายจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไบอัส.....	14
2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	15
2.13 แสดงความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง กับความเข้มแสง.....	15
2.14 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร.....	16
2.15 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราฟไฟต์ และลักษณะการจัดเรียงตัวของ อะตอมคาร์บอนในกราฟไฟต์ และเพชร .....	17
2.16 แสดงแผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD .....	21
2.17 แสดงลักษณะของเครื่อง CVD แบบ DC plasma.....	22
2.18 แสดงลักษณะของเครื่อง CVD แบบ Microwave plasma.....	22
2.19 แสดงกลไกการนิวเคลียชันและการเกิดชั้น intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง .....	25
2.20 แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มเพชร ที่ถ่ายด้วย SEM .....	26
2.21 แสดง Raman Spectrum ของฟิล์มเพชร.....	27
2.22 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดหาประจุพาหะส่วนมากในสารกึ่งตัวนำ.....	28

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.23 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ .....	29
2.24 แสดงลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่ยังไม่นำมาต่อกัน .....	30
2.25 แสดงลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันที่สภาวะสมดุล.....	31
2.26 แสดงลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น .....	33
2.27 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ ชนิดเอ็น ที่ยังไม่ได้ สัมผัสกัน.....	34
2.28 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุล .....	34
2.29 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะที่ได้รับการไปแอสตรง.....	34
3.1 คริมเพชรที่ใช้ขัดแผ่นซิลิคอน .....	37
3.2 ลักษณะรอยขีดที่เกิดจากการขัดด้วยคริมเพชรขนาด 1 $\mu\text{m}$ .....	37
3.3 ไดอะแกรมระบบ CVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	38
3.4 แสดงแผ่นซิลิคอนหลังจากที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	39
3.5 ภาพถ่ายลักษณะของฟิล์มเพชร.....	39
3.6 แสดงลักษณะลวดลายโลหะเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร .....	40
3.7 รูปลวดลายโลหะของโฟโตไดโอด.....	40
3.8 แสดงภาพตัดขวางรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรกับกาวเงิน.....	41
3.9 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานที่สร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรกับกาวเงิน.....	41
3.10 แสดงโครงสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรกับทองคำ.....	42
3.11 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานที่สร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับทองคำ.....	42
3.12 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดจากฟิล์มเพชร .....	43
4.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ (111).....	48
4.2 ลักษณะของ Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD .....	48
4.3 ลักษณะของกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของฟิล์มเพชร.....	49
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของ B:C .....	51
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของ P:C .....	52
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าทางแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืดกับ อัตราส่วนของ P:C .....	52

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.7	แสดงแผนผังวงจรการวัดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดในสภาวะมืด.....54
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอดในสภาวะมืด.....55
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....55
4.10	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเป็น 500, 5000, 10000 ppm ..... 55
4.11	แสดงแผนผังวงจรการวัดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง.....57
4.12	คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี P:C 500 ppm ที่ความเข้มแสงต่างๆ .....57
4.13	คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี P:C 5000 ppm ที่ความเข้มแสง ต่างๆ .....58
4.14	คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี P:C 10000 ppm ที่ความเข้มแสง ต่างๆ .....58
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสต่อความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่าต่างๆ .....59
4.16	คุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกรณีความหนาแน่นของฟิล์มเพชร 3 $\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ ..... 60
4.17	คุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกรณีความหนาแน่นของฟิล์มเพชร 4 $\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ .....60
4.18	คุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกรณีความหนาแน่นของฟิล์มเพชร 5 $\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ .....61
4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสต่อความหนาแน่นของฟิล์มเพชรค่าต่างๆ .....61
4.20	แสดงแผนผังการวัดผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอด.....62
4.21	คุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกรณีอุณหภูมิ 25 <sup>o</sup> C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ .....62

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.22 คุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกรณีอุณหภูมิ 50° C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ .....	63
4.23 คุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกรณีอุณหภูมิ 75° C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ .....	63
4.24 คุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกรณีอุณหภูมิ 90° C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ .....	63
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสมีด-อุณหภูมิ ของโฟโตไดโอด ที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ.....	64