

ไดโอดโครงสร้างแบบ MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

MIS Diode by Semiconducting Diamond Film



T 0 4 2 2 7 9

โดย
นายพิเชษฐ์ ทองประศรี
นายอศวิน หงษ์สิงห์ทอง

วค
พ634
2543

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42279
วัน, เดือน, ปี 16 พ.ค. 2545

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

4

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอดโครงสร้างแบบ MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

MIS Diode by Semiconducting Diamond Film



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๒๑/๒๐๑๖X

รายงาน ปีการศึกษา 2543

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ไดโอดโครงสร้างแบบ MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

MIS Diode by Semiconducting Diamond Film

ผู้จัดทำ นายพิเชษฐ ทองประศรี

นายอัศวิน หงษ์สิงห์ทอง

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง



รายงานฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ

(รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

วันที่ 23 มีนาคม 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นายพิเชษฐ์ ทองประศรี
นายอัศวิน หงษ์สิงห์ทอง
รศ.ดร.วิศุทธิ์ จิตรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ในรายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS โดยพิจารณาถึงระยะเวลาที่ใช้สร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่ 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที และ 40 นาที และผลของอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอนที่เจือให้กับฟิล์มเพชรชนิดพี 10 ppm, 100 ppm, และ 1000 ppm และการทำงานของไดโอดในที่มีอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 300 K, 400 K และ 500 K ซึ่งพบว่า ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกสามารถลดปริมาณกระแสรั่วย้อนกลับได้อย่าง ชัดเจนเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้น และมีแรงดันพังทลายสูงขึ้นด้วย ในขณะที่ปริมาณความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ โบรอนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้กระแสรั่วย้อนกลับเพิ่มขึ้นน้อยมาก ในทางตรงกันข้าม กลับทำให้มีปริมาณกระแสไหลไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และจากการทดลองสามารถพิสูจน์ได้ว่า มีกลไกการไหลของกระแสไปข้างหน้าอยู่ 2 ลักษณะ นั่นคือลักษณะการไหลของกระแสก่อนการนำไฟฟ้าแบบ Frenkel-Poole emission และลักษณะการไหลของกระแสช่วงนำไฟฟ้าแบบ Schottky emission นอกจากนี้ไดโอดโครงสร้าง MIS สร้างจากฟิล์มเพชรที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. นี้มีเสถียรภาพในการทำงานได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 300 K ถึง 400 K

Mr.Pichet Thongprasri

Mr.Aswin Hongsingthong

Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongrueng

(Supervisor)

YEARS, 2000

ABSTRACT

In this thesis, the characteristics of Metal / Intrinsic / Semiconductor (MIS) diode from semiconducting diamond was studied. Thickness of intrinsic layer this time to (10 min, 20 min, 30 min, 40 min) Boron/Carbon (B/C) concentration ratio of p-type layer (10 ppm, 100 ppm, and 1000 ppm) and temperature of operation (300 K, 400 K, 500 K) were studied. The investigation demonstrated that reverse leakage current was decreased effectively only when the intrinsic thickness was increased, resulting the higher breakdown voltage. The mechanism of the forward current was derived from Frenkel-Poole emission step for electrical pre-conduction and Schottky emission step for electrical post-conduction. Furthermore, MIS diode from semiconducting diamond that fabricated at ERC, KMITL, could operate stably at relatively higher temperature, not exceeding to 400 K.

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับในการศึกษาค้นคว้าและทำการทดลองจนสำเร็จลุล่วงเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์แบบได้นั้นต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ รศ.ดร.วิสุทธิ วิจิตรรุ่งเรือง ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา Project และขอขอบพระคุณพี่ ภาณุพันธ์ โอพาทกิจไพบูลย์ (พี่จ้วน) ึ่งคอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา ชี้แนะ วางแนวทางในการค้นคว้า ทดลอง ตรวจสอบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่มากมาย ในการทำ Project ครั้งนี้ พี่ นิรุช ปิ่นเกตุ พี่ พีระวุฒิ ชินวรรังสี ขอขอบคุณ ที่ช่วยเป็นกำลังใจ จนกระทั่งรายงานฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้ พี่แบล็ค พี่โจ พี่ริน พี่เอ พี่โอ พี่ป้อง ขอขอบคุณพี่ที่ห้อง Superconductor ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณท่านผู้อ่านทุกท่านหากผิดพลาดประการใดขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายพิเชษฐ์ ทองประศรี
นายอัศวิน หงษ์สิงห์ทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XI
สัญลักษณ์	XIII
คำนำ	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วิธีการ CVD	1
1.2 การประยุกต์ใช้งาน	2
1.3 การวิจัยผลการเตรียมพื้นผิวฐานรองของซิลิกอนที่มีต่อการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	4
1.4 การวิจัยผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดระนาบของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD	5
1.5 การวิจัยผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานของฟิล์มเพชร	6
1.6 เทคนิคและหลักการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้	6
1.6.1 เทคนิคการวิเคราะห์ Raman spectroscopy	7
1.6.2 เทคนิคการวิเคราะห์ Scanning Electron Microscopy (SEM)	11
1.6.3 เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	14
บทที่ 2 ทฤษฎี	17
2.1 โครงสร้างผลึกคาร์บอน	17
2.2 คุณสมบัติของเพชร	18
2.2.1 คุณสมบัติความร้อน	18
2.2.2 Elastic waves	19
2.2.3 ความแข็ง	19
2.3 คุณสมบัติทางแสงของเพชร	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร	19
2.5 ลักษณะการเกิดรูปทรงของผลึกเพชร	20
2.6 รอยสัมผัสระหว่าง โลหะกับฟิล์มเพชร	22
2.6.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มิก	22
2.6.2 รอยสัมผัสแบบชอตต์กี	22
2.7 ไดโอดโครงสร้าง MS (Metal-Semiconductor Diode)	23
2.7.1 สารกึ่งตัวนำชนิด พี	24
2.7.2 โครงสร้างแถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด พี	25
2.7.3 ไดโอดโครงสร้าง MS ในสภาวะสมดุลความร้อน	27
2.7.3.1 คุณสมบัติรอยต่อชอตต์กีในสภาวะสมดุล	29
2.7.3.2 ความหนาแน่นของ โฮลในแถบวาเลนซ์	32
2.7.4 ไดโอดโครงสร้าง MS ในสภาวะการให้ไบอัสตรง	35
2.7.5 ไดโอดโครงสร้าง MS ในสภาวะการให้ไบอัสกลับ	37
2.8 ไดโอดโครงสร้าง MIS (Metal-Insulator-Semiconductor Diode)	39
2.8.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก	39
2.8.1.1 ความหนาแน่นของพาหะในสารอินทรีนซิก	41
2.8.2 ไดโอดโครงสร้าง MIS ในสภาวะสมดุลความร้อน	43
2.8.3 ไดโอดโครงสร้าง MIS ในสภาวะการให้ไบอัสตรง	45
2.8.4 ไดโอดโครงสร้าง MIS ในสภาวะการให้ไบอัสย้อนกลับ	46
2.8.4.1 ช่วงปลอดประจุพาหะ (Depletion of majority carrier)	46
2.8.4.2 ช่วงส่วนกลับประจุพาหะ (Inversion)	47
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง	54
3.1 การทำความสะอาดผิวหน้าฐานรองซิลิกอนเริ่มต้น	54
3.2 การเตรียมพื้นผิวหน้าฐานรอง โดยการขัดด้วยครีมเพชร	55
3.3 ชุดเครื่องมือในการสร้างฟิล์มเพชร	56
3.4 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร	57
3.5 กระบวนการกำจัดชั้นฐานรองซิลิกอน	58
3.6 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชรของไดโอด	59
3.6.1 การสร้างรอยสัมผัสแบบ โอห์มิก ของไดโอดโครงสร้าง MS	59
3.6.2 การสร้างรอยสัมผัสแบบชอตต์กีของไดโอดโครงสร้าง MS	61
3.6.3 การสร้างรอยสัมผัสแบบชอตต์กี ของไดโอดโครงสร้าง MIS	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.6.3.1 การศึกษาผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก	63
3.6.3.2 การศึกษาผลของอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอน (B:C) ของฟิล์มเพชรชนิดพี	65
3.6.3.3 การศึกษาค่าของอุณหภูมิที่มีผลต่อการทำงานของไดโอด โครงสร้าง MIS	65
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	66
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้น	66
4.2 ผลการตรวจวัดไดโอด โครงสร้าง MS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร	70
4.2.1 ผลของคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ขึ้น	70
4.2.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด โครงสร้าง MS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร	72
4.3 ผลการตรวจสอบไดโอด โครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร	75
4.3.1 ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก	75
4.3.2 ผลของอัตราส่วน B:C ของฟิล์มเพชรชนิดพี	79
4.3.3 ผลการทำงานของไดโอด โครงสร้าง MIS ที่อุณหภูมิต่างๆ	81
4.3.4 กระบวนการตรวจสอบลักษณะการไหลของกระแสผ่านชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก	83
4.3.4.1 การตรวจสอบลักษณะการไหลของกระแสผ่านชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกแบบ Frenkel-Poole Emission	83
4.3.4.2 การตรวจสอบลักษณะการไหลของกระแสผ่านชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกแบบ Schottky Emission	86
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	90
บรรณานุกรม	92

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ไดอะแกรมของระบบ HFCVD	2
รูปที่ 1.2 ลักษณะสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติและเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบขาดความเครียด	9
รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ ที่สร้างได้ซึ่งเป็น Polycrystalline	13
รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM	13
รูปที่ 1.5 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก	14
รูปที่ 1.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มาตรฐานของเพชรที่ระนาบการเลี้ยวเบนต่าง ๆ	16
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกเพชรและแกรไฟต์	17
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชรในฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจน และอุณหภูมิฐานรอง	21
รูปที่ 2.3 กระแสแรงดันของรอยสัมผัสแบบ โอห์มิกระหว่าง โลหะกับฟิล์มเพชร	22
รูปที่ 2.4 กระแสแรงดันของรอยสัมผัสแบบชอตต์กีระหว่าง โลหะกับฟิล์มเพชร	23
รูปที่ 2.5 ไดโอดโครงสร้าง MS	23
รูปที่ 2.6 แสดงระดับพลังงานผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด พี ที่ 0 K	24
รูปที่ 2.7 แสดงระดับพลังงานผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่ 300 K	25
รูปที่ 2.8 แสดงแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด พี	26
รูปที่ 2.9 แบบจำลองแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด พี	28
รูปที่ 2.10 แบบจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิด พี	29
รูปที่ 2.11 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MS ในอุณหภูมิต่ำภาวะ สมดุลย์ความร้อน , $V_A = 0$	34
รูปที่ 2.12 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MS ในอุณหภูมิต่ำภาวะ ไบอัส ตรง , $V_A > 0$	35
รูปที่ 2.13 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MS ในอุณหภูมิต่ำภาวะ ไบอัส กลับ , $V_A < 0$	38
รูปที่ 2.14 ไดโอดโครงสร้าง MIS	39
รูปที่ 2.15 ที่อุณหภูมิต่ำๆ หรือ T = 0 K	40

รูปที่ 2.16 ที่อุณหภูมิสูง $T > 0\text{ K}$ หรือ การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอก	41
รูปที่ 2.17 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุณหภูมิต่ำสถานะสมดุล ความร้อน ($V=0$)	44
รูปที่ 2.18 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุณหภูมิต่ำสถานะไบอัสตรง (ไปข้างหน้า)	45
รูปที่ 2.19 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุณหภูมิต่ำสถานะไบอัสย้อนกลับช่วงปลอดประจุ	47
รูปที่ 2.20 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุณหภูมิต่ำสถานะไบอัสย้อนกลับช่วงส่วนกลับประจุพาหะ	48
รูปที่ 2.21 แบบจำลองแถบพลังงานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำของไดโอดในช่วงกลับประจุพาหะ	49
รูปที่ 2.22 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุณหภูมิต่ำ	52
รูปที่ 3.1 รูปแสดงผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชร	55
รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี HF CVD ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร	56
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนขบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ	60
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสแบบขอตค์์กของไดโอดโครงสร้าง MS	62
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสแบบขอตค์์กของไดโอดโครงสร้าง MIS	64
รูปที่ 4.1 ลักษณะ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้	66
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของผลที่เกิดจากการสร้างฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ $960\text{ }^{\circ}\text{C}$	67
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM แสดงผลความหนาโดยประมาณของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกที่สร้างทับฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยระยะเวลาต่างๆ กัน	68
รูปที่ 4.4 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรระนาบ {111}	69
รูปที่ 4.5 ผลของกระแส-แรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	71
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน ของไดโอดโครงสร้าง MS ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	72
รูปที่ 4.7 การหาค่ากระแสอิ่มตัวของขอตค์์กไดโอดโครงสร้าง MIS ด้วยอัตราส่วน B:C ต่างๆ	73

รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน เมื่ออัตราส่วน B:C 10 ppm ในกรณีความหนาของชั้นอินทรีนซิคต่าง ๆ	76
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน เมื่ออัตราส่วน B:C 100 ppm ในกรณีความหนาของชั้นอินทรีนซิคต่าง ๆ	77
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน เมื่ออัตราส่วน B:C 1000 ppm ในกรณีความหนาของชั้นอินทรีนซิคต่าง ๆ	77
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันในลักษณะ Semi-Log ระยะเวลา 10 นาที ในการสร้างชั้นอินทรีนซิค ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	79
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันในลักษณะ Semi-Log ระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นอินทรีนซิค ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	80
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของไดโอดโครงสร้าง MIS ด้วยอัตรา B:C 1000 ppm ความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคที่ระยะเวลา 40 นาที ในขณะอุณหภูมิต่างๆ	82
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันในลักษณะ Semi-Log ของไดโอดโครงสร้าง MIS ด้วยอัตรา B:C 1000 ppm ความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคที่ระยะเวลา 40 นาที ในขณะอุณหภูมิต่างๆ	82
รูปที่ 4.15	ผลของการนำกระแสแบบ Frenkel-Poole Emission ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมีระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	84
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ของ $\ln\left(\frac{I}{V}\right)\alpha\sqrt{V}$ ภายใต้การนำกระแสแบบ Frenkel-Poole Emission ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมี ระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	85
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ของ $\ln(I)\alpha\sqrt{V}$ ภายใต้การนำกระแสแบบ Schottky Emission ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมี ระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	87
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ของ $\ln(I)\alpha\sqrt{V}$ ภายใต้การนำกระแสแบบ Schottky Emission ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมี ระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	88
รูปที่ ค-1	เครื่อง Scanning electron microscope ของ JEOL รุ่น JSM-5410	97
รูปที่ ค-2	Raman Spectroscope รุ่น system 2000 ของบริษัท Renishaw	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ ค-3 Single Crystal X-ray Diffractometer	98
รูปที่ ง-1 เครื่อง Vacuum Evaporator	99
รูปที่ ง-2 เครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/Component Test System)	99



สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	ค่ายอดของ Raman Spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน	10
ตารางที่ 1.2	ตารางแสดงความสัมพันธ์ของยอดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกในฟิล์มเพชร	15
ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรแบบ Single , ซิลิกอนและ แกลเลียมอาร์เซไนค์	20
ตารางที่ 2.2	ค่าพลังงานไอออไนซ์ของอะตอมสารเจือผู้รับในผลึกซิลิกอน	24
ตารางที่ 2.3	แสดงค่าความหนาแน่นสถานะยังผลในแถบความนำไฟฟ้า และแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆที่ 300 K	42
ตารางที่ 2.4	ลักษณะการนำกระแสผ่านชั้นฉนวนในไดโอด โครงสร้าง MIS	46
ตารางที่ 3.1	เงื่อนไขความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่ใช้ในการทดลอง	63
ตารางที่ 3.2	เงื่อนไขอัตราส่วน B:C ของไดโอด โครงสร้าง MIS	65
ตารางที่ 4.1	ค่าพื้นฐานต่างๆ ของฟิล์มเพชรชนิดพี	71
ตารางที่ 4.2	ค่ากระแสอิ่มตัวและความสูงกำแพงศักย์รอยสัมผัสเมื่อมีค่าความเข้มข้นโบรอนต่างๆ	75
ตารางที่ 4.3	ค่ากระแสรั่ว $-0.4 \mu\text{A}$ เมื่อทำการไบอัสตรงแก่ไดโอด โครงสร้าง MIS ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	78
ตารางที่ 4.4	ค่ากระแสรั่ว $0.4 \mu\text{A}$ เมื่อทำการไบอัสกลับแก่ไดโอด โครงสร้าง MIS ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ	78
ตารางที่ 4.5	แสดงปริมาณของกระแสในไดโอด โครงสร้าง MIS ที่มีระยะเวลาในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกนาน 10 นาที โดยขนาดของแรงดันไบอัส 2 โวลต์	80
ตารางที่ 4.6	แสดงปริมาณของกระแสในไดโอด โครงสร้าง MIS ที่มีระยะเวลาในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกนาน 40 นาที โดยขนาดของแรงดันไบอัส 2 โวลต์	81
ตารางที่ 4.7	แสดงค่า η_1 สำหรับการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole	86
ตารางที่ ข-1	ยอดความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สัมพันธ์จากระนาบของฟิล์มเพชร	96



สัญลักษณ์

K	ค่า Young's Modulus
K_{ic}	ค่าความทนต่อการแตกหัก
P	โมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
ϵ	สนามไฟฟ้า
ϵ_i	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นอินทรีนซิกหรือฉนวน
ϵ_s	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำชนิด พี
ϵ_0	สนามไฟฟ้าของลำแสงที่ตกกระทบ
t	เวลา
V_o	ความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ
V_n	ความถี่ของโฟนอน
α_n	Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น
α	Polarizability
q	ประจุอิเล็กตรอน
d	ค่า inter-planar spacing
θ	มุมการเลี้ยวเบน
λ	ความยาวคลื่นตกกระทบ
E_0	ระดับพลังงานสูญญากาศ
E_C	ระดับพลังงานแถบความนำ
E_i	ระดับพลังงานกึ่งกลางของ E_g
E_V	ระดับพลังงานแถบวาเลนซ์
E_{FM}	ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ
E_{FS}	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิด P
E_A	ระดับพลังงานสารเจือผู้รับ
E_g	ช่องว่างพลังงาน
ϕ_B	ค่าความสูงของกำแพงศักย์ของสัมผัส
ϕ_M	ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_S	ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิด P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k	ค่าคงที่ของ โบลทซ์มันน์
χ	electron affinity energy
K	ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์
eV	ค่าอิเล็กตรอน โวลท์
η_i	ความหนาแน่นพาหะอินทรินซิก
N_C	ความหนาแน่นสถานะที่แถบความนำ
N_V	ความหนาแน่นสถานะที่แถบวาเลนซ์
N_A	อะตอมสารเจือผู้รับ
V_0, V_{bi}	แรงดันภายใน, ศักย์สัมผัส
x_p	ระยะทางความหนาแน่นด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี
Q_s	ประจุด้านสารกึ่งตัวนำชนิด P
Q_m	ประจุด้านโลหะ
ρ	ค่าความหนาแน่นประจุ
J_{S-M}	กระแสแพร่ของ โฮลจากสารกึ่งตัวนำไปโลหะ
J_{M-S}	กระแสแพร่ของอิเล็กตรอนจากโลหะ ไปสารกึ่งตัวนำ
J_0	กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
V_A	แรงดันไบอัสภายนอก
m_p^*	effective mass ของเพชร
B:C	ความเข้มข้นอะตอม โบรอนต่อคาร์บอน
ppm	ความเข้มข้น
$\mu_{เพชร}$	ค่าความคล่องตัวโฮลในเพชรชนิด(polycrystalline)
h	ค่าคงที่ของแพลงค์
A	พื้นที่ผิวขั้วสัมผัส
A^*	ค่าคงที่ Richardson
η_1	Collection factor ในการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole
η_2	Collection factor ในการไหลของกระแสแบบ Schottky

คำนำ

สารกึ่งตัวนำเพชร มีคุณสมบัติที่โดดเด่นทั้งทางกายภาพและทางไฟฟ้า ซึ่งยังสามารถสังเคราะห์เพชรขึ้นได้จากกระบวนการที่ค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน และค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ จึงเป็นที่สนใจ จึงได้มีการศึกษาและประยุกต์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ ในโครงการนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาไดโอดโครงสร้าง MIS ที่ใช้ฟิล์มเพชรเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการปรับปรุงโครงสร้างจากชอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรเช่นกัน เนื่องด้วยยังมีข้อเสียในเรื่องของกระแสรั่วไหลย้อนกลับและขีดจำกัดในการทำงานของชอตต์กีไดโอด ซึ่งไม่ตรงกับจุดประสงค์หลักของคุณสมบัติของเพชรซึ่งทำงานในที่ที่มีอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสารกึ่งตัวนำทั่วไป เนื้อหาในโครงการนี้มีรายละเอียดต่างๆดังนี้ในบทแรกจะเป็นบทนำเพื่อที่จะทำความรู้จักกับสารกึ่งตัวนำเพชรอย่างคร่าว ๆ ก่อน และหลักการในการสังเคราะห์เพชรที่เป็นองค์ประกอบสำคัญหนึ่งเพื่อที่จะสร้างให้สำเร็จก่อน อีกทั้งยังบอกถึงหลักการโดยสังเขปของการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยทั้งการวิเคราะห์ในลักษณะของพื้นผิวฟิล์มเพชร ระบุขนาด ความหนา หรือแม้กระทั่งความเป็นไปได้ของความเป็นเพชรด้วย และยังกล่าวถึงคุณลักษณะพื้นฐานของการทำจิวส์สัมผัสระหว่างโลหะต่างๆ กับฟิล์มเพชรอีกด้วยต่อมา จะกล่าวถึงทฤษฎีของชอตต์กีไดโอดที่เคยสร้างจากฟิล์มเพชรมาแล้ว นอกจากนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีของไดโอดโครงสร้าง MIS ทั้งในอุดมคติและตัวอย่างเล็กน้อยที่เคยสร้างจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน โดยอธิบายในลักษณะของทฤษฎีแถบพลังงานและสมการความสัมพันธ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้กับการนำไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ รวมไปถึงค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดซึ่งสามารถอธิบายถึงลักษณะการทำงานขณะได้รับการไบอัสย้อนกลับอีกด้วย

บทต่อมาจะเป็นกระบวนการสร้างและการทดลองประกอบด้วยกระบวนการสร้างชอตต์กีไดโอดและไดโอดโครงสร้าง MIS และมีเงื่อนไขต่าง ๆ ในการทดลองด้วยเช่นเดียวกัน

บทต่อไปนี้เป็นการศึกษาผลการทดลอง เมื่อทำการตรวจสอบทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าภายหลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการสร้าง ในส่วนแรกจะเป็นผลการทดลองยืนยันคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ ส่วนต่อมาจะเป็นผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของชอตต์กีไดโอดเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองตามเงื่อนไขต่าง ๆ ของไดโอดโครงสร้าง MIS เพื่อปรับปรุงลักษณะการทำงานและข้อเสียของชอตต์กีไดโอดดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น พร้อมด้วยการวิเคราะห์ดังบทข้างต้น

และบทเป็นส่วนของการสรุปผลการทดลองที่ได้ศึกษาและวิจารณ์ผลการทดลอง และนำข้อมูลพื้นฐานที่ได้เป็นแนวทางและในการนำไปพัฒนาเพื่อนำไปสู่การใช้งานที่เหมาะสมในโอกาสต่อไป

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำหวังว่า โครงการฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านไม่มากก็น้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วิธีการ CVD

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำมีอยู่หลายวิธี วิธีที่นิยมในการนำมาสังเคราะห์ฟิล์มคือวิธี CVD (Chemical vapor deposition) วิธีการทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและคุณลักษณะสเปกตรัมของ Raman จะมีลักษณะคล้ายกัน

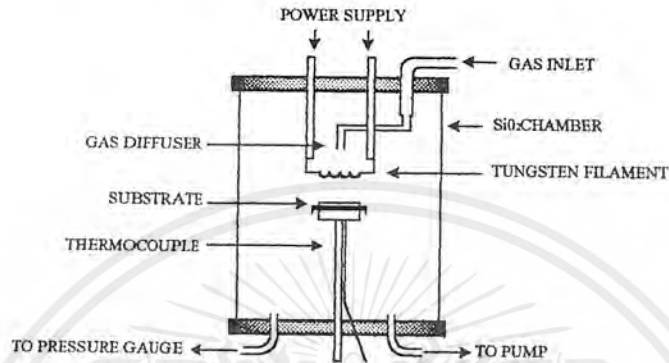
สำหรับวิธีการ CVD สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือ

1. Thermal Enhanced CVD Methods
2. Plasma- Enhanced CVD Methods
3. Combustion Flame – Assisted CVD

ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ อาทิเช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร, อุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง, อุณหภูมิของฐานรอง, พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้ แต่ท้ายที่สุดฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการต่างๆ จากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกันอันเป็นที่ยืนยันได้ว่า แม้เทคนิคที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรต่างกันไป แต่ผลที่ได้ก็คือ ฟิล์มเพชรเหมือนกันนั่นเอง สำหรับโครงการนี้ฟิล์มเพชรจะสร้างขึ้นด้วยเทคนิค Filament – Assisted Thermal CVD อันเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่ามีความปลอดภัยสูง อุปกรณ์มีราคาถูก ง่าย และฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณภาพดี ซึ่งรายละเอียดของวิธี Filament-Assisted Thermal CVD อธิบายได้ดังนี้คือ

วิธี Filament – Assisted Thermal CVD แสดงดังรูปที่ 1.1 ภายใน Chamber มีไส้หลอดที่เป็นขดลวดทั้งสแตน (หรือแทนทาลัม, โมลิบดีนัม, เรเนียม) โดยไส้หลอดทั้งสแตนจะถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ DC อุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนมีค่าสูงถึง 2,000 ถึง 2,300 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองมีค่าที่เหมาะสม (ประมาณ 1 – 2 mm) มีอุณหภูมิ 700 – 1,000 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิฐานรองจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง เมื่อก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปใน Chamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตนจะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นอะตอมไฮโดรเจน และ อะตอมคาร์บอน ฐานรองสามารถไบอัสศักดาไฟฟ้าเพื่อความหนาแน่นของการนิวเคลียเอชัน และอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซ

มีเทน 0.5–2 % ต่อก๊าซไฮโดรเจน กระทำที่ความดัน 10-100 ทอร์ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิด 1–10 $\mu\text{m/hr}$ [1] วิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่ายค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ ในบริเวณกว้างและมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานได้ตลอดทั้งสแตนด์ เนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ได้ตลอดทั้งสแตนด์เป็นเวลานาน ทำให้ได้ตลอดเปราะและผิรุ่ยได้ง่าย



รูปที่ 1.1 โคอะแกรมของระบบ HFCVD[2]

1.2 การประยุกต์ใช้งาน

ฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นด้วยวิธี CVD ที่ความดันต่ำมีความเหมาะสมหลายอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในเชิงกล พบว่าเพชรเป็นวัสดุที่มีค่าความแข็งสูง ($1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$) ทำให้ทนต่อการสึกหรอ ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้งานหนัก อาทิเช่น ใบเลื่อย หัวเจาะ หรือ Gearboxes มักจะนิยมเคลือบฟิล์มเพชรบนอุปกรณ์ดังกล่าว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งาน

นอกจากนี้เพชรยังมีสภาพนำความร้อนสูงมาก (20 W/cm.K) ทำให้ฟิล์มเพชรถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูง เช่น นำมาใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงหรือนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

ปัจจุบันมีการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD ประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านเชิงกลและเชิงไฟฟ้า ตัวอย่างของการใช้งานที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นแค่บางส่วนเท่านั้น

1. Wear resistant coating ฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นถูกนำไปใช้เคลือบอุปกรณ์ที่ใช้ใน

อุตสาหกรรมหนักประเภทใบเลื่อยหรือหัวเจาะต่างๆ แต่เดิมอุปกรณ์ดังกล่าวมักทำมาจากซิลิกอนคาร์ไบด์หรือทั้งสแตนด์คาร์ไบด์ ซึ่งเป็นสารที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าเพชร ฟิล์มเพชรสามารถเคลือบบนวัสดุหลายชนิด อาทิเช่น Non-ferrous metal และสารประกอบต่าง ๆ จากการศึกษาค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าอุปกรณ์ใช้งานที่เคลือบด้วยฟิล์มเพชรจะมีประสิทธิภาพ อายุการใช้งานตลอดจนความเร็วในการจุดหรือเจาะเพิ่มขึ้นนอกจากนี้ฟิล์มเพชรยังสามารถนำไปเคลือบเพื่อป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนที่ใช้งานหนักเป็นพิเศษ เช่น Gearboxes หรืออุปกรณ์ภายในเครื่องยนต์ ซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

2. Thermal management เนื่องจากเพชรธรรมชาติมีค่าสภาพนำความร้อนสูงมากกว่าค่าสภาพนำความร้อนของทองแดงถึง 4 เท่า อีกทั้งยังมีค่าความเป็นฉนวนสูง ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงถูกใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น เซมิคอนดักเตอร์ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะติดตั้งบนฟิล์มเพชร ก่อนที่จะนำไปบรรจุเพื่อใช้งานต่อไป ข้อดีของการใช้ฟิล์มเพชรเป็นตัวระบายความร้อนคือสามารถที่จะลดมวลและปริมาตรของการใช้ตัวระบายความร้อนเมื่อเทียบกับแบบเดิมได้ มากกว่า 50 % ทำให้ความหนาแน่นในการบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น และลดขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้งานจากเดิมลง[3] ซึ่งปัจจุบันได้เริ่มมีการใช้งานฟิล์มเพชรเป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมการบินบ้างแล้ว

สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้ฟิล์มเพชรที่กล่าวถึงในที่นี้คือ ใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และนำไปใช้เป็นตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชร ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมการบิน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุแบบโพลีเมอร์ซึ่งเป็นสารที่ใช้งานในอดีต พบว่าตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรมีขนาดของน้ำหนักและปริมาตรลดลงถึง 50 % อุณหภูมิในการใช้งานเพิ่มขึ้นจากเดิม 5 เท่า ความสามารถในการประจุพลังงานสูงถึง 7 เท่า และยังทำงานที่แรงดันสูงได้ดี

3. Electronic device ปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาการนำฟิล์มเพชรมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทั้งประเภทแอคทีฟและพาสซีฟ แม้ว่าโดยทั่วไปฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นจะแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก แต่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้โดยการสร้างอะตอมสารเจือของธาตุในหมู่ 3 ลงไป (นิยมใช้ B_2H_6 หรือ B_2O_3) สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนั้นทำได้ยาก เนื่องจากขนาดอะตอมของ P หรือ As ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 5 มีขนาดใหญ่มากกว่าอะตอมของ C ทำให้ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างแลตทิซของอะตอมคาร์บอนได้ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงการใส่ธาตุตัวใหม่ในการใช้เป็นอะตอมสารเจือซึ่งปัจจุบัน Li กำลังเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก

อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากฟิล์มเพชรมีอยู่หลายชนิด ตัวอย่างเช่น

- ตัวเก็บประจุ[4] ที่สร้างจากฟิล์มเพชร ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมการบิน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุแบบโพลีเมอร์ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในอดีต พบว่าตัวเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรมีขนาด น้ำหนักและปริมาตรลดลงถึง 50 % อุณหภูมิในการใช้งานเพิ่มขึ้นจากเดิม 5 เท่า ความสามารถในการประจุพลังงานสูงถึง 7 เท่า และยังทำงานที่แรงดันสูงได้ดี

- จอภาพแบบแบน[5] จะอาศัยคุณสมบัติการเกิด Negative Electron Affinity ของเพชร คือเมื่อเพชรได้รับการไบอัสไฟลบที่สูญญากาศจะเกิดเป็นจุดเล็กๆ ลักษณะเหมือนกับตารางอื่นๆ โดยแต่ละจุดเรียกว่า “Pixel” แต่ละ Pixel เมื่อได้รับการไบอัสไฟลบจะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมา อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยกริดซึ่งถูกไบอัสด้วยไฟบวก พุ่งเข้าชนเป้าหรือจอภาพซึ่งมีสารเคลือบอยู่ทำให้เกิดแสงสว่างขึ้นบริเวณที่อิเล็กตรอนตกกระทบ เมื่อเทียบกับชนิดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือแบบ LCD (Liquid Crystal Displays) พบว่าจอภาพชนิดใหม่นี้จะให้ความสว่างและมุมมองเพิ่มขึ้นจากเดิมตลอดจนสามารถขยายได้ถึงหน่วยตารางเมตร

1.3 การวิจัยผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองของซิลิกอนที่มีต่อการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร[15]

จากผลการวิจัยการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน มีการเตรียมฐานรองด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้

1. พื้นผิวที่ขัดเป็นมันเงา
2. พื้นผิวที่เป็นชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์
3. ขัดด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm
4. ขัดด้วยครีมเพชรขนาด 5 μm
5. อัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด 0.05 μm
6. อัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด 0.5 μm

โดยการสร้างฟิล์มเพชรที่เงื่อนไขเดียวกันที่ระยะเวลาที่ต่างๆกัน จากผลการทดลองจะพบว่าฐานรองที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดด้วยครีมเพชร หรือการอัลตราโซนิก จะก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรอย่างชัดเจน ส่วนฐานรองที่มีพื้นผิวเรียบ เพชรที่เกิดจะมีลักษณะเป็นผลึกกระจัดกระจายอยู่บนพื้นผิวฐานรอง ไม่ก่อตัวเป็นฟิล์ม

เมื่อพิจารณาการขัดพื้นผิวด้วยครีมเพชรพบว่า การขัดด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm ความหนาแน่นของฟิล์มเพชร ที่สังเคราะห์ได้จะมีค่าสูงที่สุด และใช้เวลาในการก่อตัวเป็นฟิล์มเพชร ได้เร็วที่สุด การขัดด้วยครีมเพชรขนาด 5 μm จะมีความหนาแน่นของฟิล์มเพชรต่ำ และใช้เวลาในการสร้างนานส่วนการอัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด 0.05 μm และ 0.5 μm นั้น ขนาด 0.5 μm จะมีความหนาแน่นมากกว่า และพื้นผิวที่ขัดเป็นมันเงากับพื้นผิวที่เป็นชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ จะเกิดความหนาแน่นการเกิดฟิล์มเพชรที่ต่ำที่สุด

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าอุปกรณ์ที่ผลิตจากซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ในด้านการใช้งานย่านความถี่สูง หรือที่อุณหภูมิสูงได้

1.4 การวิจัยผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดระนาบของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD[8]

จากผลการวิจัยกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน จะเริ่มตั้งแต่การเตรียมฐานรอง จากนั้นจะนำไปสร้างด้วยเครื่องที่ประกอบขึ้น ซึ่งหลักการของ CVD แบบ Hot filament จะผ่านกระแสไฟไปให้กับไส้หลอดทั้งสแตนจนอุณหภูมิสูงประมาณ $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้ไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรเจนที่ผ่านเข้ามาเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระเกิดการนิวเคลียชันบนฐานรอง และเกิดเป็นฟิล์มเพชรขึ้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy , SEM และ X-ray diffraction เพื่อศึกษาถึงลักษณะรูปร่างผลึกของฟิล์มเพชร

พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิฐานรอง ซึ่งส่งผลกระทบต่อระนาบของฟิล์มเพชร โดยทำการพิจารณาอุณหภูมิฐานรองในช่วง $930\text{-}970\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งผลการทดลองดังนี้

1. อุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสมสำหรับการเกิดฟิล์มเพชรอยู่ในช่วง $940\text{-}960\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. เมื่ออุณหภูมิฐานรองมีค่าประมาณ $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ฟิล์มเพชรระนาบ {100}
3. เมื่ออุณหภูมิฐานรองมีค่าประมาณ $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ฟิล์มเพชรระนาบ รวม
4. เมื่ออุณหภูมิฐานรองมีค่าประมาณ $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ฟิล์มเพชรระนาบ {111}
5. ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $930\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือสูงกว่า $970\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะไม่เกิดเพชรแต่จะเป็น DLC และแกรไฟต์แทน

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ในการวิจัยครั้งนี้ยืนยันได้ว่ามีคุณสมบัติเป็นเพชรจริงและมีคุณภาพเป็นฟิล์มเพชรที่ดีเนื่องจาก Raman spectrum มีค่ายอดคลื่นที่ตำแหน่ง $1,333\text{ cm}^{-1}$ ใกล้เคียงกับตำแหน่ง $1,332\text{ cm}^{-1}$ ของเพชรธรรมชาติ แต่การเลื่อนไปของยอดคลื่นอาจเป็นผลมาจากการมีพันธะ sp^2 ในฟิล์มที่สังเคราะห์อยู่บ้าง และจากการวิเคราะห์ด้วย SEM ทำให้สามารถบอกระนาบของฟิล์มได้ โดยพิจารณาจากรูปร่าง ของผลึกเพชรที่ประกอบขึ้นเป็นระนาบของฟิล์มที่มีดัชนีมิลเลอร์ที่ h,k,l ต่าง ๆ ฟิล์มที่มีลักษณะผลึกเป็นรูปสามเหลี่ยมมีระนาบเป็น {111} และฟิล์มที่มีลักษณะผลึกเป็นรูปเหลี่ยมจะเป็นระนาบ {100} และเพื่อเป็นการยืนยันอีกครั้งถึงระนาบของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้จึงนำฟิล์ม ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ผลการเปรียบเทียบกับค่า Interplanar spacing มาตรฐานของเพชร พบว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ ได้ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ นั้น ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน จึงสามารถสรุปได้ว่าระนาบ ที่สังเคราะห์ได้ขนานกับระนาบ {111} และ {400}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 การวิจัยผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานของฟิล์มเพชร

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ทำการทดลองสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรอง Si มีอยู่ 2 ชนิด คือ ฟิล์มเพชรชนิด i และชนิด P เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแล้ว ฟิล์มเพชรชนิด i จะมีค่าความต้านทานสูง ส่วนฟิล์มเพชรชนิด P ค่าความต้านทานที่วัดได้จะต่ำกว่าชนิด i มาก เมื่อนำเอาฟิล์มเพชรทั้ง 2 ชนิดนี้ไปทำการวัดค่าความต้านทานในขณะที่ฟิล์มเพชรมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ฟิล์มเพชรชนิด i จะมีค่าความต้านทานค่อนข้างคงที่ในอุณหภูมิต่ำๆ แต่เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นประมาณ 200°C ขึ้นไป ค่าความต้านทานก็จะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในฟิล์มเพชรชนิด P ค่าความต้านทานจะค่อนข้างคงที่ในอุณหภูมิต่ำๆเช่นกัน และเมื่ออุณหภูมิประมาณ 175°C ขึ้นไป ค่าความต้านทานจะลดลงอย่างมาก ซึ่งจะเห็นได้ว่าการที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากๆนั้น ค่าความต้านทานก็จะมีค่าลดลง โดยผลที่เกิดขึ้นเป็นคุณลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำ

จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น ได้มีการนำเอาฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งานในการสร้างเป็น thermistors ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามอุณหภูมิ และยังถูกนำไปใช้สร้างเป็นตัวระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะทำให้มีขนาดลดลงกว่าเดิม ในส่วนของการทำโครงการนี้จะเป็นการสร้างฟิล์มเพชรชนิด P และนำฟิล์มเพชรชนิด P ไปใช้งาน

1.6 เทคนิคและหลักการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้

การวิเคราะห์ผลึกเพชรหรือฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์จะทำการศึกษาขั้นพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 – 400 เท่า เพื่อดูลักษณะการเกิดของผลึก ขนาดของผลึก พื้นที่การเกิด รวมทั้งความหนาแน่นของผลึกว่าเกิดเป็นฟิล์มหรือไม่ ซึ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์สามารถประมาณผลการสังเคราะห์ได้เท่านั้น ส่วนการวิเคราะห์อย่างละเอียดจะมีหลายวิธีแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน อาทิเช่น Scanning Electron Micorscope (SEM) สามารถตรวจสอบลักษณะผิวของผลึก และฟิล์มเพชร ขนาดของผลึกเพชร ความหนาของฟิล์มเพชรได้อย่างแม่นยำจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ เครื่อง SEM เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างภายนอกเพียงอย่างเดียว และ อีกประการหนึ่งจะสามารถบอกถึงกลุ่มระนาบที่เกิดว่าเป็นแบบใดได้ ซึ่งสามารถแสดงระนาบของฟิล์มเพชรได้อย่างละเอียด การศึกษาคุณสมบัติว่าฟิล์มเพชรที่ได้นั้นใช้การวิเคราะห์ Raman spectroscopy และศึกษาฟิล์มเพชรว่ามีรูปร่างของคาร์บอนใดบ้างเช่น แกรไฟต์ อัญฐาน คาร์บอน และ DLC เป็นต้น

การวิเคราะห์นั้นยังมีอีกหลายเทคนิคแต่สำหรับการวิเคราะห์ระนาบของฟิล์มเพชรจะใช้ 3 วิธี คือ

1. การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy
2. การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)
3. การวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การใช้เทคนิคทั้ง 3 นี้เพื่อเป็นการเสนอว่าอุณหภูมิ มีผลต่อการสังเคราะห์เพชรด้วย วิธี Hot filament CVD method จริง และคุณลักษณะของผลึกเพชรว่าเป็นระนาบใด โดยรายละเอียดของแต่ละเทคนิคมีดังต่อไปนี้

1.6.1 เทคนิคการวิเคราะห์ Raman spectroscopy[1,2,7]

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและแกรไฟต์สูง แม้ว่าจะมีแกรไฟต์เพียงเล็กน้อยก็ตาม เนื่องจากประสิทธิภาพการกระเจิงของแกรไฟต์มีค่ามากกว่าของเพชรมาก ตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman spectroscopy จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตรวจสอบได้

หลักการพื้นฐานของ Raman spectroscopy คือการใช้การสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสารหรือผิวหน้าของผลึก ทำให้สามารถแยกความแตกต่างของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนได้ การทำงานของ Raman spectroscopy อาศัยปรากฏการณ์กระเจิงทางแสง โดยหลักการของปรากฏการณ์ดังกล่าว คือการวัดการลดลงของความเข้มของลำแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน ผลของ Raman จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การกระเจิงของ โมเลกุล ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลการชนกันระหว่างโฟตอนกับการสั่นของแลตทิซหรือ โฟนอน ทำให้เกิดคู่ของโฟตอนและโฟนอน สนามไฟฟ้าของความเข้มลำแสงเป็นตัวบังคับให้แสงมีคลื่นไปทางเดียวในผลึก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Polarizability ดังสมการ

$$P = \alpha E \quad (1.1)$$

โดยที่ P คือ โมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

E คือ สนามไฟฟ้า

α คือ Polarizability

เมื่อมีการสั่นของแลตทิซเกิดขึ้นอันเป็นภาวะการกระตุ้นของ Raman ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

แปลง Polarizability Raman จะปล่อยโฟตอนบางส่วนออกมา โดยโฟตอนนี้เกิดจากการสั่นของไดอิเล็กทริกเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

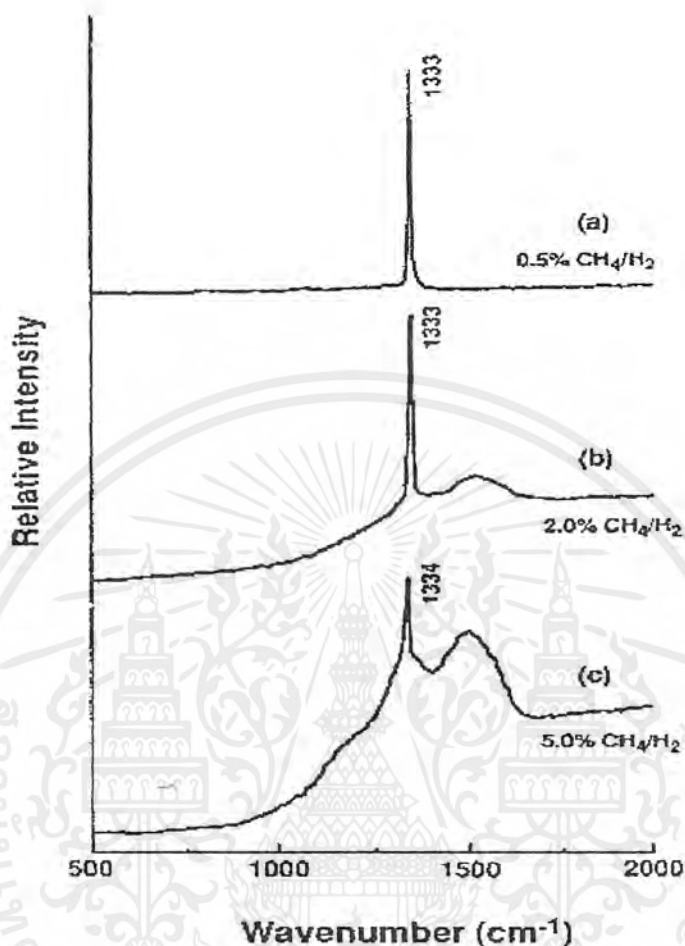
โพล ซึ่งมีทั้งที่ความถี่เหมือนกับลำแสงตกกระทบ (Electric Raleigh scattering) หรือมีการเลื่อนไปของความถี่ ซึ่งมีค่าเท่ากับความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (Inelastic stokes or antistokers scattering)

$$P = E_0 \alpha_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} E_0 \sum \alpha_n \{ \cos 2\pi(\nu_0 - \nu_n) t + \cos 2\pi(\nu_0 + \nu_n) t \} \quad (1.2)$$

โดยที่ E_0 คือ สนามไฟฟ้าของลำแสงที่ตกกระทบ
 t คือ เวลา
 ν_0 คือ ความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ
 ν_n คือ ความถี่ของโฟนอน
 α_n คือ Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

เมื่อยังลำแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในสารตัวอย่าง โฟตอนจากลำแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน $h\nu_0$ จะเข้าไปอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมสารตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานไปบางส่วน ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเกิดการกระโดดข้ามไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า “สถานะกระตุ้น” (Excitation state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงตกกลับมาสู่สถานะเดิม โดยมีการคายพลังงานออกมามีค่า $h(\nu_0 - \nu_1)$ ส่วนพลังงานที่สูญเสียไปคือ $h\nu_1$ ถูกใช้สำหรับทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงสร้างผลึก โดยพลังงาน $h\nu_1$ ที่สูญเสียไปนี้อยู่ในย่านอินฟราเรด พลังงานที่เหลือ $h(\nu_0 - \nu_1)$ ก็คือพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั่นเอง สำหรับสเปกตรัมของแสง $h(\nu_0 - \nu_1)$ ที่ได้จะถูกเรียกว่า “Stoke line”

จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆ ของคาร์บอนได้เป็น เพชร, แกรไฟต์, อมอร์ฟัสคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอนแสดงไว้ในตารางที่ 1.1 นอกจากนี้สามารถใช้ Raman spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่างๆ กันเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ลักษณะสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติ และเพชรที่สังเคราะห์ได้

ด้วยวิธี CVD แบบขาดลวดความร้อน[8]

(a) เพชรธรรมชาติ

(b) เพชรสังเคราะห์ที่มีปริมาณคาร์บอนอะมอร์ฟัสปะปนอยู่

(c) เพชรสังเคราะห์ที่มีปริมาณกราฟไฟต์ปะปนอยู่

จากรูปที่ 1.2a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมาก ฟิสิกส์เพชรจึงมีคุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสมส่วนรูปที่ 1.2b พบว่าสเปกตรัมของกราฟไฟต์ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่ สำหรับ สเปกตรัมของรูป 1.2c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} ลดลงอย่างมากและมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ 1334 cm^{-1} ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} เริ่มมียอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัดเจนกว่าแสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมี Amorphous carbon หรือ Diamond like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด ตารางที่ 1.1 ค่ายอดของ Raman Spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน[1]

Peak position	Type of carbon	Description
$\sim 1140 \text{ cm}^{-1}$	Small size ($< 0.1 \mu\text{m}$) cubic diamond	Occasionally observed in diamond films with very small grain sizes ($< 0.1 \mu\text{m}$)
$1315 - 1326 \text{ cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	Broad band, observed in shock wave produced diamond
1332 cm^{-1}	Cubic diamond	First order peak with FWHM of 1.9 cm^{-1} for natural diamond
1345 cm^{-1}	Amorphous carbon	Broad band. It becomes a shoulder of the 1550 cm^{-1} band when the materials hydrogenated
1355 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	Observed in materials with small grain sizes
1550 cm^{-1}	Amorphous or diamond-like carbon	Broad band
1580 cm^{-1}	Graphite	First order peak
2458 cm^{-1}	Cubic diamond	Second order peak
2710 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	Second order peak
3240 cm^{-1}	Graphite	Second order peak

นอกจากนี้ Raman spectroscopy ยังมีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ปริมาณตามสัมพันธะของพันธะ sp^3 กับพันธะ sp^2 โดยหากทราบความแรงของการกระเจิงสัมพัทธ์ก็สามารถพิจารณาหาจำนวนสัมพันธะขององค์ประกอบของเพชรและแกรไฟต์ในฟิล์มเพชรที่ได้จากการสร้างด้วยวิธี CVD ได้ หรือ อีกทางหนึ่ง แกรไฟต์จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีขาวยาวสูง แต่ในเพชรจะไม่มีการดูดกลืน ทำให้แสงสามารถผ่านเพชรได้ตลอด ดังนั้นถ้าหากฟิล์มมีแกรไฟต์เจือปนอยู่ แสงที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารจะไม่เป็นระเบียบ ปกติแล้วบริเวณที่มีการดูดกลืน จะวัดได้ เฉพาะผิวหน้าเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นและขนาดของผลึกมีผลสำคัญต่อ Raman spectrum ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ผลจากขนาดของผลึกสามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบของ Microcrystalline graphite เจือปน แต่ถ้าฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างที่ไม่เหมาะสม (เช่น ความเข้มข้นของ CH_4/H_2 มีค่ามากกว่า 20 %) ขนาดของผลึกเพชรจะมีผลต่อการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์ม สรุปได้ว่า การวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มเพชรจากเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์แบบ sp^3 กับพันธะ sp^2 จึงมีความสำคัญและยังรวมไปถึงขนาดของผลึกเพชรที่บริเวณ sp^2 ก็มีความสำคัญเช่นกัน

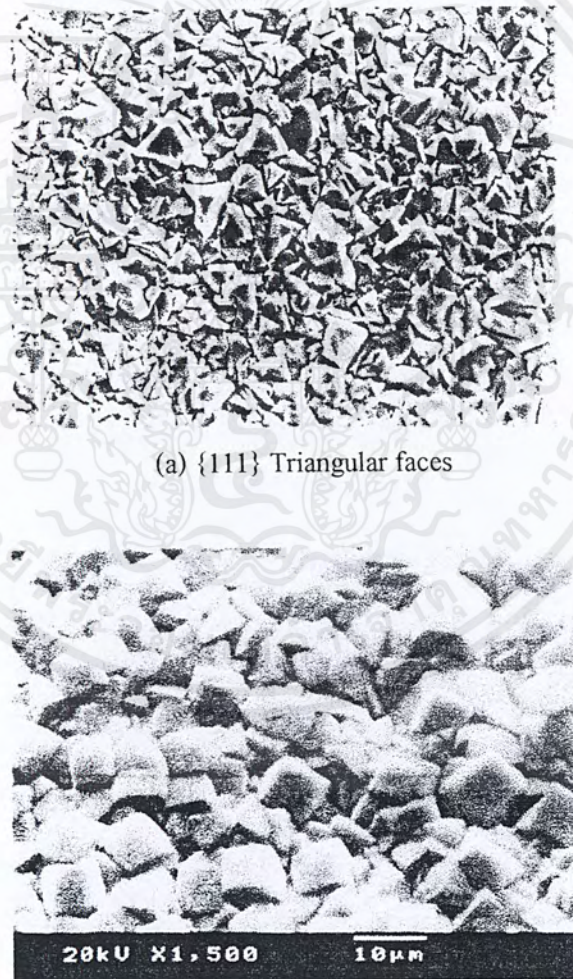
1.6.2 เทคนิคการวิเคราะห์ Scanning Electron Microscopy (SEM)[1,2,9]

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการศึกษาลักษณะของผลึกชิ้นงาน โดยมีกำลังขยาย 50 – 40000 เท่า สามารถแสดงผลึกเป็นภาพสามมิติ มีความคมชัดสูงถึง 2.5 – 10 nm โดยหลักการงาน ของ SEM ทำให้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน (μm) หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิวขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode –Ray Tube) ข้อดีของ SEM คือ มีกำลังขยายสูง ความคมชัดของภาพสูง ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเปรียบเทียบกับ TEM (transmission Electron Microscopy) ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะต้องมีความบางมาก ๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านไปได้แต่ SEM สามารถใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับชิ้นงานตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้าสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อน แต่ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่มีความนำไฟฟ้าก่อนการวิเคราะห์ต้องนำไปเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าก่อน ทั่วไปนิยมใช้ทองคำหรือ คาร์บอน ตัวอย่างเช่น ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง Si สามารถที่จะวิเคราะห์คือควรใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสดำ ๆ จะช่วยลดการสะสมประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น Raman spectroscopy

การวิเคราะห์ผลึกและฟิล์มเพชรจากวิธีต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันออกไป จะเป็นไปตามเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ Si บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่พบส่วนมากจะมี 4 แบบ คือ 1. ระนาบ {111} 2. ระนาบ {100} 3. ระนาบรวม (Polycrystalline) และ

4. Cauliflower-like หรือ Microcrystalline ซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้าง โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองจะมีผลต่อพื้นผิวชิ้นงานมาก

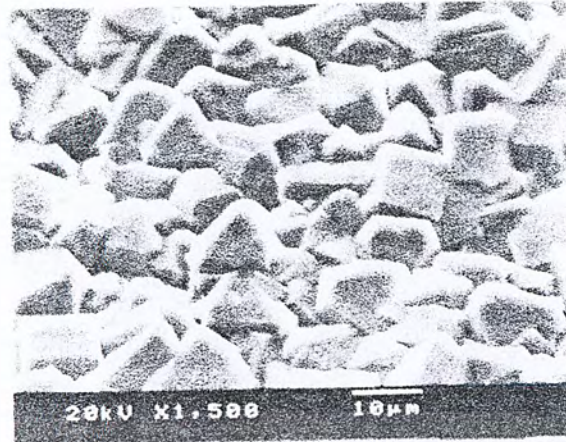
จากรูปที่ 1.3 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ซึ่งหากใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy จะช่วยให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น Raman spectrum ที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่มีผิวหน้าแบบ Cauliflower-like ในรูปที่ 1.3d จะมียอดกราฟลดลง และเกิดยอดของแกรไฟต์ขึ้นมา เมื่อเปรียบเทียบกับที่ได้จากการตรวจสอบพื้นผิวของเพชรรูปอื่น ๆ (1.3a ถึง 1.3c) พบว่าฟิล์มเพชรที่มีลักษณะพื้นที่ผิวแบบรูปที่ 1.3d แสดงคุณสมบัติของเพชรน้อยกว่าชนิดอื่น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ SEM หาคความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างได้ ดังตัวอย่างจากรูปที่ 1.4 ซึ่งในโครงการนี้จะได้ฟิล์มเพชรที่เป็น Polycrystalline ทั้งหมด



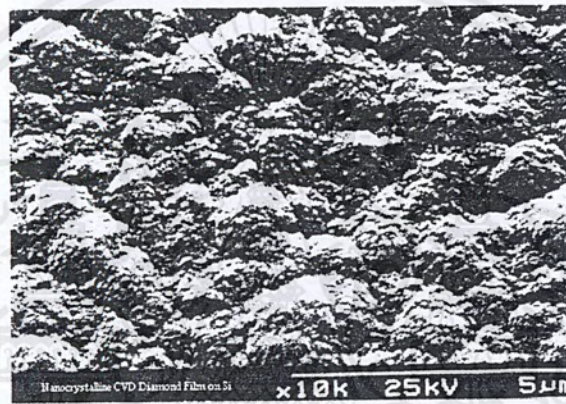
(a) {111} Triangular faces

(b) {100} Square faces

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

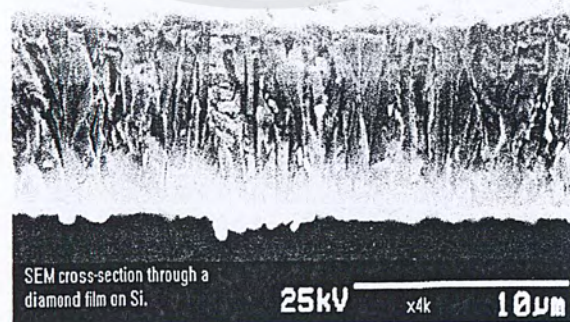


(c) Polycrystalline faces



(d) Cauliflower-like or microcrystalline

รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่างๆที่สร้างได้ซึ่งเป็น Polycrystalline



รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

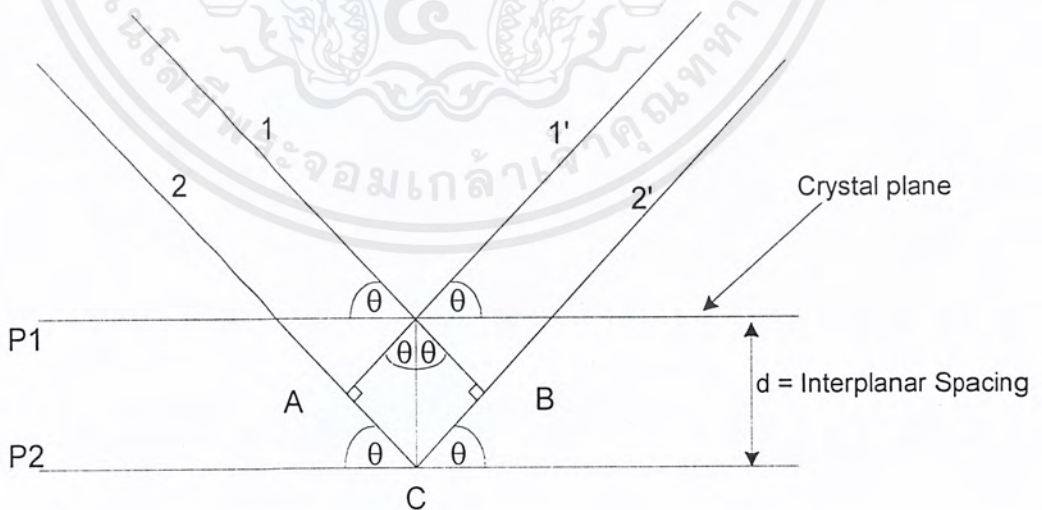
1.6.3 เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์[1,2]

เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) จะใช้พื้นฐานจาก "Bragg's diffraction" ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการง่าย ๆ ได้ดังสมการที่ 1.3 โดยคิดว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบในโครงผลึก ซึ่งสมการของ Bragg พิจารณาจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบในโครงผลึก P1 และ P2 ที่ขนานกันจากรูปที่ 1.5

จากรูปที่ 1.5 รังสีเอ็กซ์ที่ 1 และ 2 ตกกระทบกับระนาบ P1 และ P2 ที่จุด O และ C ด้วยมุมตกกระทบ θ อิเล็กตรอนที่สมมติว่าอยู่จุด O และ C พอดี จะเกิดการสั่นตาม Oscillating field ของรังสีเอ็กซ์ที่เข้ามา เกิดพลังงานแผ่ออกมาทุกทิศทาง พบว่าในทิศทางที่ลำรังสีที่ 1 และ 2 ออกมาทำมุม θ เสมือนมีการสะท้อนออกมาของรังสีเอ็กซ์จะให้ความเข้มรังสีเอ็กซ์สูงสุด หรือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมขึ้น (In phase) โดยจากรูปมุม $\angle AOC = \angle BOC = \theta$ เพราะฉะนั้น $AC = BC = d \sin \theta$ ซึ่งจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันเมื่อ

$$2d \sin \theta = n\lambda \tag{1.3}$$

- เมื่อ $d =$ Interplanar spacing
- $\theta =$ มุม Diffraction
- $n =$ ลำดับของการเลี้ยวเบน ($n = 1, 2, 3, \dots$)
- $\lambda =$ ความยาวคลื่น



รูปที่ 1.5 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก

จะเห็นว่าการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จะทำมุม θ กับ Crystal plane และทำมุม 2θ เมื่อเทียบ

กับลำดับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ.

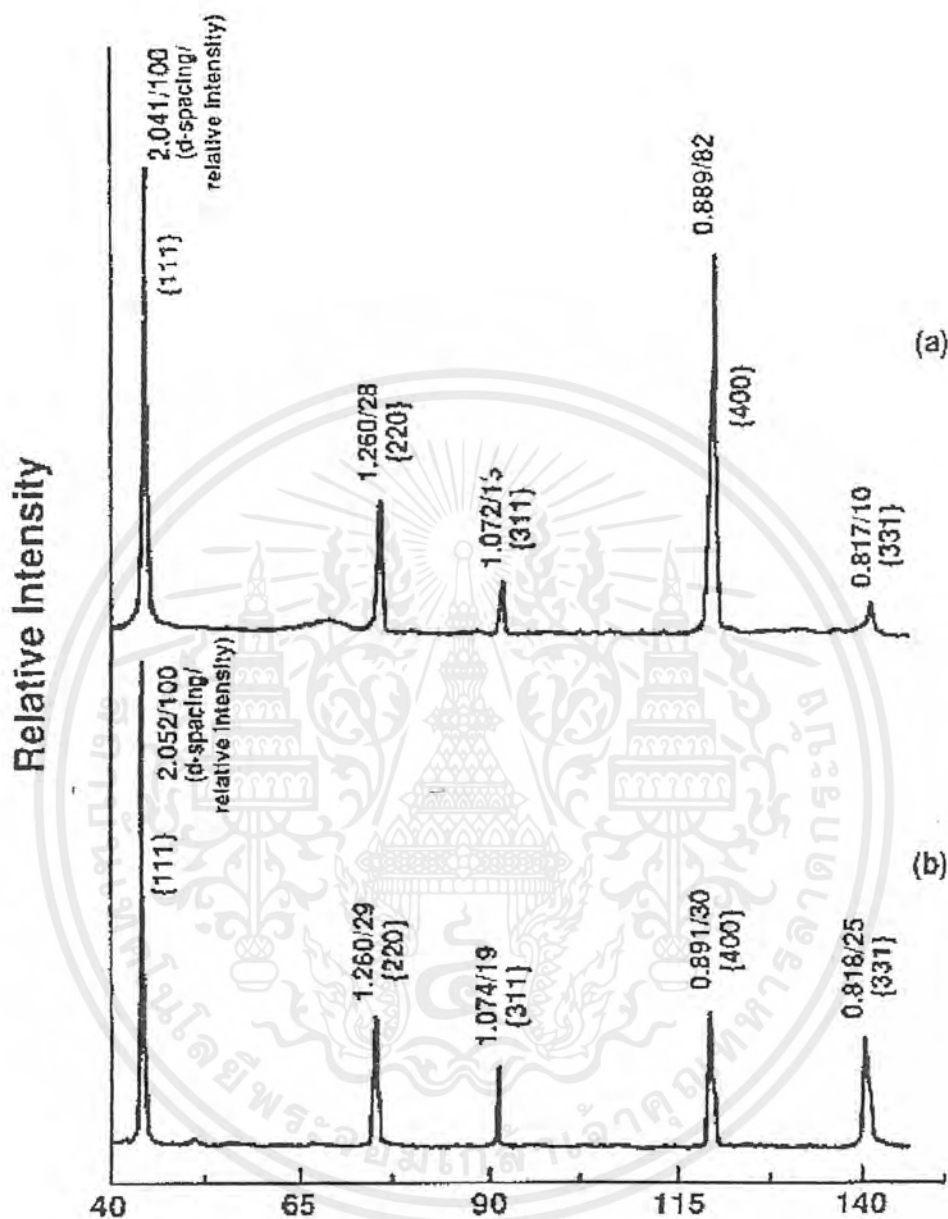
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้วัดหาค่าตัวแปรของโครงสร้างผลึกและพิจารณาลักษณะรูปทรงของฟิล์มได้ รูปแบบคุณลักษณะของผลึกรวมของเพชรที่ได้นั้น ผลึกเพชรต้องมีขนาดใหญ่ (ประมาณ 10 nm หรือ มากกว่านั้น) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกของเพชรเป็นแบบ Cubic ซึ่งมีความสมมาตรสูง การคำนวณเฟคเตอร์ของโครงสร้าง ทำให้ระนาบของการเลี้ยวเบนมีจำนวนน้อย (ระนาบของการเลี้ยวเบนที่ได้ $\{hkl\}$ คือ $\{111\}, \{220\}, \{311\}, \{400\}, \{331\}$ และอื่นๆ โดย h, k, l จะเป็นเลขคู่ทั้งหมดหรือเลขคี่ทั้งหมด และ $h + k + l = 4n$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม) นอกจากนี้ในกรณีที่ระนาบผลึกมีรูปแบบต่างๆ กันพบว่า การเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ $\{111\}$ จะมีความแรงสูงสุดและการที่เส้นการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์ มีการเลื่อนหรือเกิดแถบกว้างขึ้น เป็นผลมาจากค้ำหนึหรือ ขนาดของผลึกที่เล็กลงไป รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ บนพื้นผิวฟิล์มที่มีระนาบ $\{111\}$ และ $\{100\}$ แสดงได้ในรูปที่ 1.6 ซึ่งจะเห็นถึงความแตกต่างกันของความเข้มของรูปแบบระนาบของผลึก

Kaac et al.[2] ได้พิจารณาถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มที่มีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกันห้าชนิด เนื่องจากระนาบผลึกที่ขนานกับพื้นผิวฐานรองเท่านั้นที่จะเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นมา จากการเปรียบเทียบความเข้มของการเลี้ยวเบนของระนาบผลึกที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกับความเข้มของการเลี้ยวเบนของผงเพชร ความสัมพันธ์ของความเข้มของยอดที่ได้จากการทดลอง แสดงได้ดัง ตารางที่ 1.2 จากตารางพบว่ามีฟิล์มอยู่สองชนิดคือ ฟิล์ม A และ E มีความแตกต่างของความเข้มการเลี้ยวเบนที่ระนาบ $\{111\}$ กับระนาบอื่นๆ มากกว่ากรณีของชิ้นงานตัวอย่าง ส่วนในฟิล์ม B ระนาบ $\{400\}$ จะมีความเข้มของการเลี้ยวเบนมากกว่าระนาบ $\{400\}$ ของชิ้นงานตัวอย่าง ดังนั้น ฟิล์ม A และ E มีระนาบที่ขนานกับระนาบของการเคลือบเป็น $\{111\}$ และฟิล์ม B ระนาบที่ขนานกันของการเคลือบจะเป็นระนาบ $\{100\}$ ซึ่งผลดังกล่าวสามารถยืนยันได้ด้วยการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรจาก SEM

ตารางที่ 1.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของยอดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกในฟิล์มเพชร[2]

Film	Relative x-ray diffraction peak intensity			
	$\{111\}$	$\{220\}$	$\{311\}$	$\{400\}$
Powder (ASTM)	100	25	16	8
A	100	5	3	1
B	100	8	8	100
C	100	28	10	1
E	100	7	7	5



รูปที่ 1.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มาตรฐานของเพชรที่ระนาบการเลี้ยวเบนต่าง ๆ [2]

(a) ระนาบ {100}

(b) ระนาบ {111}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

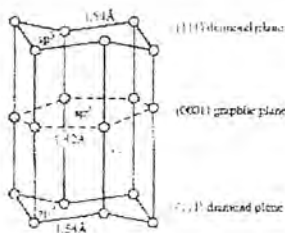
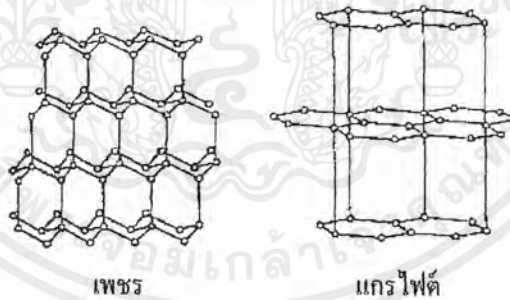
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 โครงสร้างผลึกคาร์บอน

เพชร มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบ sp^3 โดยแบ่งออกเป็นรูปแบบต่างๆ ดังนี้

สร้างเป็นแบบ face - centered diamond cubic โดยในหนึ่งยูนิตเซลล์จะประกอบด้วย อะตอมที่มุมแปดอะตอมและหกอะตอมบริเวณ face - center และจะมีสี่อะตอมอยู่ตรงที่ว่างของ อะตอม โดยที่อะตอมคาร์บอนหนึ่งอะตอมจะจับพันธะกับอีกสี่อะตอมด้วยพันธะแบบ sp^3 ในโครงสร้างผลึกแบบ {111} ประกอบด้วยหกอะตอมจับกันเป็นวงแหวน โดยอะตอมมีลักษณะสูงต่ำสลับ กันจากระนาบ และอะตอมทั้งหกเกิดการใช้พันธะร่วมกันในทิศทางต่างๆ ของระนาบ {111} โดยมีการเรียงตัวแบบ ABCABCABC... ซ้ำ ๆ กันไป โดยมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.67 \AA มีความยาว พันธะ 1.54 \AA ในการวิเคราะห์เพชรด้วย Raman spectroscopy สำหรับ cubic เพชรมีค่า $1,332 \text{ cm}^{-1}$ สำหรับคาร์บอน 12 และเป็น $1,284 \text{ cm}^{-1}$ สำหรับคาร์บอน 13



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกเพชรและแกรไฟต์[1,2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lonsdaleite มีการจัดเรียงอะตอมด้วยโครงสร้างแบบ cubic โดยมีการจัดเรียงแบบ ABABAB... ซ้ำ ๆ กันไป โดยมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 2.52 Å และ 4.12 Å ตามลำดับ ที่ว่างของอะตอมใกล้เคียงกันห่างกัน 1.42 Å มีค่าคงที่แลตทิซ 6.707 Å การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy ได้ $1,580 \text{ cm}^{-1}$

Graphite กราไฟต์เป็นรูปแบบของคาร์บอนที่พบบ่อยมาก อะตอมทั้งหมดจะไม่จับกันแบบเพชร แต่จับกันตามแนวอนบนระนาบ และจับกันด้วยพันธะ sp^2 hybrid atomic orbitals แต่ละระนาบมีการเรียงกันแบบ ABABAB... ซ้ำ ๆ กันไป แต่ละระนาบห่างกัน 1.42 Å มีค่าคงที่แลตทิซ 6.707 Å การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy ได้ $1,580 \text{ cm}^{-1}$

Microcrystalline Carbon เป็นเพชรคุณภาพต่ำที่ได้จากการสังเคราะห์จัดเรียงอะตอมด้วยพันธะ sp^3 ในช่วงแรกแต่มีพันธะ sp^2 เกาะอยู่ที่ขอบเกรน เมื่อวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy ได้ $1,355 \text{ cm}^{-1}$

Amorphous Carbon วิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy ได้ $1,140 \text{ cm}^{-1}$ สำหรับการเรียงอะตอมแบบ sp^3 amorphous carbon และได้ $1,500 \text{ cm}^{-1}$ ถ้าเป็นการเรียงอะตอมแบบ sp^2 amorphous carbon

2.2 คุณสมบัติของเพชร

เพชรมีโครงสร้างทางเคมีที่แข็งแรง และมีความยืดหยุ่น มีความแข็งแรง มีความหนาแน่น การนำความร้อน และความเร็วคลื่นสูงกว่าโลหะชนิดอื่น มีค่า bulk modulus ต่ำกว่าสารชนิดอื่น เพชรมี thermal coefficient ต่ำมากประมาณ $0.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

2.2.1 คุณสมบัติความร้อน

Thermal Conductivity เพชรมีความนำความร้อนสูงมากเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น โดยมีค่า $20 \text{ watt/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ เมื่อมีไนโตรเจนเกิดขึ้นในเพชร ค่าความนำความร้อนจะลดลง 30 – 50 % ของค่าสูงสุด สำหรับฟิล์มเพชรที่เป็นผลึกหลายรูป การนำความร้อนมีค่าเป็น 55 % ของผลึกรูปเดียว ในระนาบของการปลูกผลึก การนำความร้อนของผลึกรูปเดียวมีค่ามากกว่า 25 % แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของเมล็ดผลึกด้วย

Molar Heat Capacity คือการบอกค่าความร้อนที่จะทำให้ตัวของสารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 degree ลักษณะของเพชรจะมีค่า molar heat capacity สูง ดังนั้นมันจึงเป็นตัวจ่ายความร้อนได้ดีกว่าเป็นตัวรับความร้อน เพชรจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีเท่าๆ กับ Heat sink

2.2.2 Elastic Waves

Elastic waves ภายในปริมาตรของเพชรจะมีการทะลุผ่านได้ 1 ใน 2 โหมด โหมดแรกคือ longitudinal wave ซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่ของ displacement ของแต่ละจุดตั้งฉากกับหน้าคลื่น โหมดที่สองคือ shear wave เกี่ยวกับรูปร่างของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เมื่อ shear wave รวมกันกลายเป็น standing wave ค่า displacement เจึงเส้นจะถูกรวมกัน

2.2.3. ความแข็ง

เพชรเป็นธาตุตามธรรมชาติที่แข็งที่สุดในโลก ความแข็งกำหนดโดยการกดรอยกดลงบนพื้นผิวภายใต้น้ำหนัก (W) ความแข็ง (H) ถูกกำหนดโดย $H = W/A$ ซึ่งรอยกดจะมีค่าขึ้นอยู่กับความแข็งของเนื้อสารการวัดความแข็งในเพชรจะเห็นรอยกดได้ชัดเจนเมื่อใช้รอยกดที่เป็นเพชรเท่านั้น โดยจะมีค่าความแข็งสูงถึง 5,700 – 10,400 kg/mm² อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามสร้างสารประกอบ C₃N₄ (Carbon Nitride) เชื่อว่าเป็นสารที่มีความแข็งมากกว่าเพชร

2.3 คุณสมบัติทางแสงของเพชร

คุณสมบัติทางแสงของสารเราจะสังเกตจากการหักเหและการเลี้ยวเบนของแสงเพชรถูกจำแนกออกเป็นชนิด I และ II ชนิดที่ I คือ เพชรที่มีไนโตรเจนเจือปนอยู่ ถ้าไนโตรเจนถูกรวมเป็นกลุ่ม เช่น เพชรตามธรรมชาติ จะเป็นชนิด I_a ถ้าไนโตรเจนกระจายกันอยู่เหนือเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นเราเรียกชนิด I_b ชนิดที่ II คือ เพชรที่ไม่มีไนโตรเจนเจือปนอยู่ ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี

2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร[10,11]

หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall ในเพชรธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 10¹² ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10¹⁵ ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง 1,800 cm²/V.s ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า 2,000 cm²/V.s แต่ในเพชรที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ 500°C พบว่ามีความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง 850 cm²/V.s ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเยอรมาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติโมนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนในวัสดุอื่นๆ จะมีค่าความเร็วโฮลอิมพัลส์และ Dielectric strength ค่าที่ความแรงสนามไฟฟ้า 10⁴ V/cm ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนและโฮลเริ่มมีการอิมพัลส์สำหรับโฮลมีค่าความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดที่ 10⁷ cm/s และในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 2.0 x 10⁷ cm/s ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง 10¹⁶ Ω.cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โบรอนเป็นสารเจือที่ถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลว ทั้งนี้เนื่องมาจากโบรอนเป็นธาตุหมู่ 3 ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับอิเล็กตรอนซึ่งยังมีขนาดอะตอมเหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้แลตทิซเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่เจือลงไป โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่าประมาณ 100 ppm หรือ 10^{19} cm^{-3} พลังงานกระตุ้นจะค่าประมาณ $370 \times 10^{-3} \text{ eV}$ และสำหรับฟิล์มเพชรชนิด Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าคือประมาณ $2 \times 10^{-3} \text{ eV}$

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรแบบ Single, ซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์[2]

Materials	Diamond	Si	GaAs
Crystal Structure	Diamond	Diamond	Zinc blends
Energy gap(eV)	5.45	1.1	1.43
Electron mobility ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	2000,5*	1500	8500
Hole mobility ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	1800,5*	600	400
Breakdown field (V/cm)	10×10^6	5×10^6	6×10^6
Resistivity ($\Omega.\text{cm}$)	10^{16}	10^3	10^9
Saturated electron velocity (cm/s)	2.7×10^7	1×10^7	1×10^7
Dielectric Constat (ϵ)	5.7	11	12.5
Lattice constant (\AA)	3.567	5.431	5.653
Thermal conductivity (W/cm.k)	20	1.5	0.46

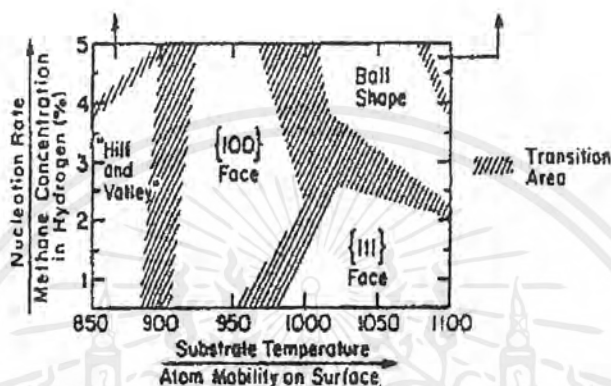
* สำหรับกรณีสารกึ่งตัวนำเพชรชนิด Polycrystalline[6]

2.5 ลักษณะการเกิดรูปทรงของผลึกเพชร

โดยทั่วไปแล้วผลึกเพชรที่เกิดจากการสร้างด้วยวิธี CVD ส่วนมากมักพบในรูปของ Octahedral, Cubo-octahedral, cubic และ Multiply twinned particles ปัจจัยที่ทำให้เพชรเกิดเป็นรูปทรงต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายอย่าง อาทิเช่น อุณหภูมิฐานรอง, ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรเจนที่ใช้ มีการรายงานเกี่ยวกับพฤติกรรมการเกิดผลึกเพชรที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน ตัวอย่างเช่น ในปีค.ศ. 1987 Haubner et al. ได้ศึกษาลักษณะรูปทรงของผลึกเพชรที่สร้างด้วยวิธี Microwave plasma บนฐานรอง Si จะพบว่ารูปทรงของผลึกเพชรที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพลาสมาที่เปลี่ยนไปตลอดจนรวมไปถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ในการสร้างเช่นแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คั้นก๊าซ, อัตราการไหลของก๊าซ, ความเข้มข้นของมีเทน และอุณหภูมิฐานรอง พวกเขาพบว่าที่ความหนาแน่นของพลาสมาและอุณหภูมิฐานรองสูงผลึกเพชรจะมีระนาบ {111} แต่หากพลาสมาที่มีความหนาแน่นต่ำและอุณหภูมิฐานรองต่ำ ผลึกเพชรที่ได้จะมีระนาบ {100} Haubner et al. ได้เสนอแนะว่าการเกิดของผลึกเพชรที่มีระนาบต่างๆกัน น่าจะเป็นผลมาจากการอึดตัวของคาร์บอนในก๊าซเฟส, ความคล่องตัวของคาร์บอนบนพื้นผิวและพลังงานพื้นผิวของผิวหน้าผลึกขณะเกิด ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชรในฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจน และอุณหภูมิฐานรอง[2]

นอกจากนี้ในปี ค.ศ.1990 Zhu et al. ได้ศึกษาถึงลักษณะการเกิดรูปทรงต่าง ๆ ของผลึกและฟิล์มเพชรที่สร้างด้วยวิธี Microwave plasma CVD Zhu et al. พบว่าการเปลี่ยนไปของอุณหภูมิฐานรอง, ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน และอัตราการไหลของก๊าซ มีผลอย่างยิ่งกับการเกิดผลึกเพชรเป็นระนาบ {111} หรือ {100} การทดลองได้นำการเพิ่มค่าอุณหภูมิฐานรองหรืออัตราการไหลของก๊าซ ตามลำดับ (อุณหภูมิฐานรองตั้งแต่ 850°C ถึง 1,150°C อัตราการไหลของก๊าซจาก 0 ถึง 400 sccm) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มเพชรจะเปลี่ยนจากระนาบ {100} เป็นระนาบ {111} และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจนจาก 0.5 % เป็น 2% รูปทรงของฟิล์มเพชรจะเปลี่ยนจากระนาบ {111} เป็นระนาบ {100} หากเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนขึ้นไปถึง 5 % ผลที่ได้จะเป็นฟิล์มเพชรที่มีผลึกขนาดเล็ก (น้อยกว่า 1 μm) ซึ่งมีกราฟต์เป็นองค์ประกอบเกิดขึ้น ผลจากการทดลองที่ได้นี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.2 แผนภาพดังกล่าวถูกเรียกว่า “แผนภาพการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชร” ซึ่งใช้ทำนายการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชรได้ในกระบวนการสร้างแบบ CVD

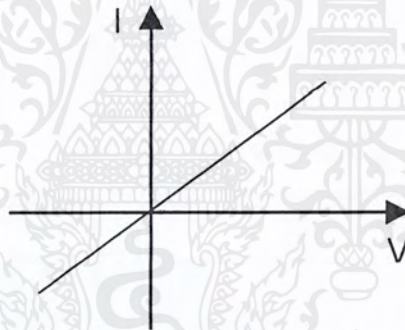
แผนภาพดังกล่าวสามารถใช้ทำนายรูปทรงของเพชรได้ โดยใช้ค่าอุณหภูมิฐานรองและความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจนเป็นหลัก ตัวอย่างเช่น ฟิล์มเพชรระนาบ {111} ส่วนมากจะพบในการสร้างที่มีอุณหภูมิฐานรองสูง และความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจนต่ำ ในขณะที่

ที่ฟิล์มเพชรระนาบ {100} ได้จากการสร้างที่ใช้อุณหภูมิฐานรองและความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจนมีค่าปานกลาง

2.6 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร

2.6.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มิก

การสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกของโลหะกับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นตัวผ่านการไหลของกระแสทั้งและสารกึ่งตัวนำในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า สามารถสร้างขึ้นได้โดยการพิจารณาจากความแตกต่างของฟังก์ชันงานของทั้งสารกึ่งตัวนำและโลหะที่จะนำมาใช้เป็นขั้วสัมผัส สำหรับการสร้างรอยสัมผัสของโลหะกับฟิล์มเพชรสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวิธีการสร้างและการนำไปใช้งาน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้กาวยเงินเป็นขั้วโลหะหรือเป็นการทำให้ผิวฟิล์มเพชรเสียหายนั่นเอง จากนั้นใช้ทั้งสแตนเป็นขั้วโลหะก็เป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มิกและยังสามารถลดความต้านทานของรอยสัมผัสได้โดยให้ความร้อน เพื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะกระแส-แรงดัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

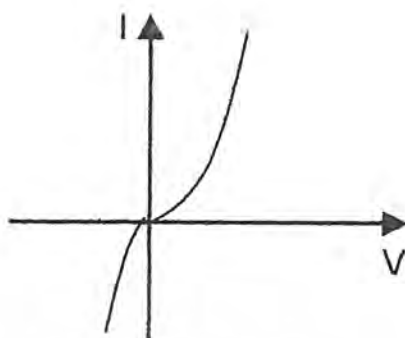


รูปที่ 2.3 กระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบ โอห์มิกระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร

2.6.2 รอยสัมผัสแบบชอตต์กี

การสร้างรอยสัมผัสแบบชอตต์กีจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับรอยสัมผัสแบบ โอห์มิก นั่นก็คือคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำเพชร ขึ้นกับคุณสมบัติสารของโลหะเพียงเล็กน้อย เช่นค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าเวิร์คฟังก์ชัน ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี แต่คุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยสัมผัส จะขึ้นอยู่กับการเตรียมและธรรมชาติของพื้นผิวของเพชร เป็นที่สังเกตว่ายังไม่มีวิธีใดที่แน่นอนในการเตรียมเพชรอันจะต่างจากกรณีของสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น ซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์ รอยสัมผัสแบบชอตต์กีนี้สามารถเกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำชนิดเพชรทั้งในผลึกธรรมชาติ และผลึกเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นโดยเคมีสารเจือโบรอน ที่สังเคราะห์ขึ้นโดย

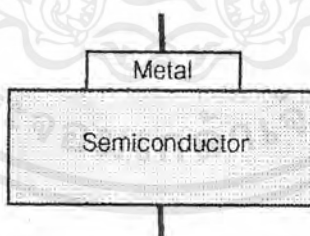
CVD วิธีการเคลือบฟิล์มโลหะต่างๆ เช่น อลูมิเนียม เมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะกระแส-แรงดัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบชอตต์กีระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร

2.7 ไดโอดโครงสร้าง MS (Metal-Semiconductor Diode)

เป็นโครงสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูปที่ 2.5 ไดโอดโครงสร้าง MS นี้ มีความสำคัญมากในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้า อันได้แก่ Bilateral และ Unilateral ซึ่งจะกล่าวถึงรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์และรอยสัมผัสโอห์มิก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่นำมาสัมผัสกัน คุณสมบัติเหล่านี้จะถูกนำไปใช้งานได้ รอยสัมผัสโอห์มิกนี้จะมีค่าความนำสูงไม่มีผลหรือเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแสบางครั้งเรียกว่า จุดต่อโอห์มิก เป็นจุดต่อที่ให้กระแสไหลเข้าหรือไหลออกจากจุดนั้นได้เท่ากัน จุดต่ออยู่ระหว่างสวดโลหะกับชั้นผลึกของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.5 ไดโอดโครงสร้าง MS

รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ หรือรอยสัมผัสแบบชอตต์กีเกิดจากจุดต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก จุดต่อจะมีคุณสมบัติเหมือนรอยต่อ P-N ขอมให้มีกระแสไหลได้ดีในทิศทางเดียว รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบ่งได้ดังนี้

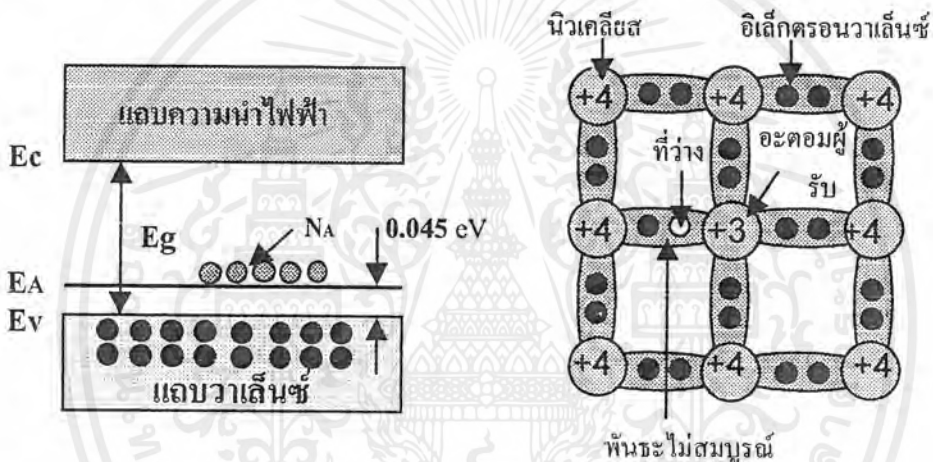
1. โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด N
2. โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทั้งสองนี้จะแสดงคุณสมบัติแบบเรกติไฟร์หรือโอห์มิกทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับค่าฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ในการทดลองนี้จะศึกษาเกี่ยวกับรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีคุณสมบัติแบบเรกติไฟร์หรือรอยต่อขอตักหรือขอตักกัไดโอด ซึ่งมีค่าของฟังก์ชันงานของโลหะ (ϕ_M) น้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งโลหะชนิด พี (ϕ_S)

2.7.1 สารกึ่งตัวนำชนิด พี

สารกึ่งตัวนำชนิด พี หมายถึงสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิด พี ได้แก่ โบรอนอะตอมสารเจือผู้รับนี้มี 3 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ เมื่อเข้าไปอยู่ในผลึกสารกึ่งตัวนำจะเกาะกับอะตอมสารกึ่งตัวนำที่อยู่ข้างเคียง เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ที่สมบูรณ์ เพียง 3 พันธะ ส่วนอีก 1 พันธะจะไม่สมบูรณ์ เพราะขาดอิเล็กตรอนไปหนึ่งตัว ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงระดับพลังงานผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด พี ที่ 0 K[12]

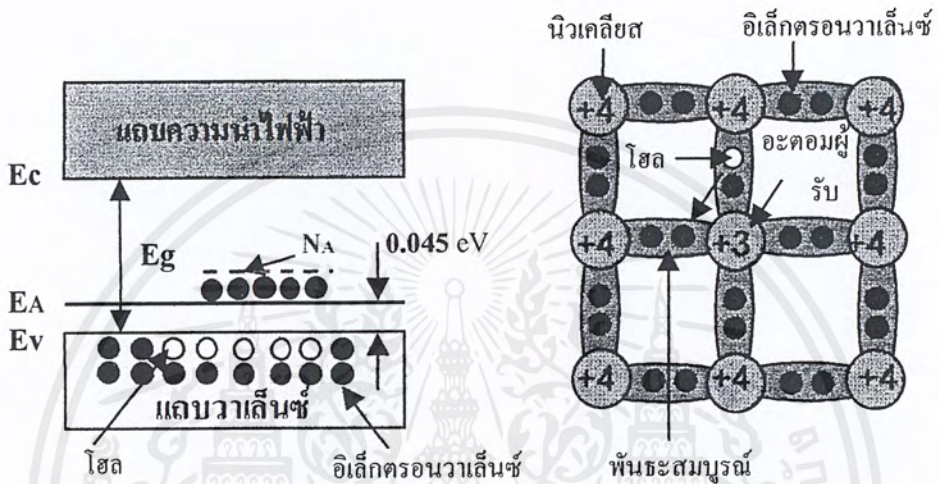
อะตอมสารเจือผู้รับทำให้เกิดมีระดับพลังงานเรียกว่า “ระดับผู้รับ” (E_A : Acceptor Level) ขึ้นที่ระหว่าง E_{FP} กับ E_V โดยจะอยู่เหนือระดับพลังงานแถบวาเลนซ์เพียงเล็กน้อย อะตอมที่ต่างชนิดกันจะมีค่าแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าพลังงานไอออไนซ์ของอะตอมสารเจือผู้รับในผลึกซิลิกอน[12]

อะตอมสารเจือ	หน้าที่	พลังงานไอออไนซ์(eV)
โบรอน(Boron)	อะตอมผู้รับ	0.045
อะลูมิเนียม(Aluminum)	อะตอมผู้รับ	0.057
แกเลียม(Gallium)	อะตอมผู้รับ	0.065

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นโบรอนในสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ระดับผู้รับ E_A จะอยู่สูงกว่าระดับวาเลนซ์ E_v เพียง 0.045 eV นั่นคือ อิเล็กตรอนวาเลนซ์ได้รับพลังงานจากภายนอกเพียง 0.045 eV จะสามารถเข้าไปอยู่ที่ระดับ E_A ในอะตอมผู้รับได้ในอุณหภูมิสูงกว่า อะตอมสารเจือนี้จะรับอิเล็กตรอนจากพันธะโควาเลนต์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำที่อยู่ใกล้เคียงได้โดยง่าย เพื่อให้พันธะจับสมบูรณ์ การรับอิเล็กตรอนเข้ามาจะกลายเป็นไอออนลบเรียกว่า “ ไอออนลบของอะตอมผู้รับ ” ดังรูปที่ 2.7

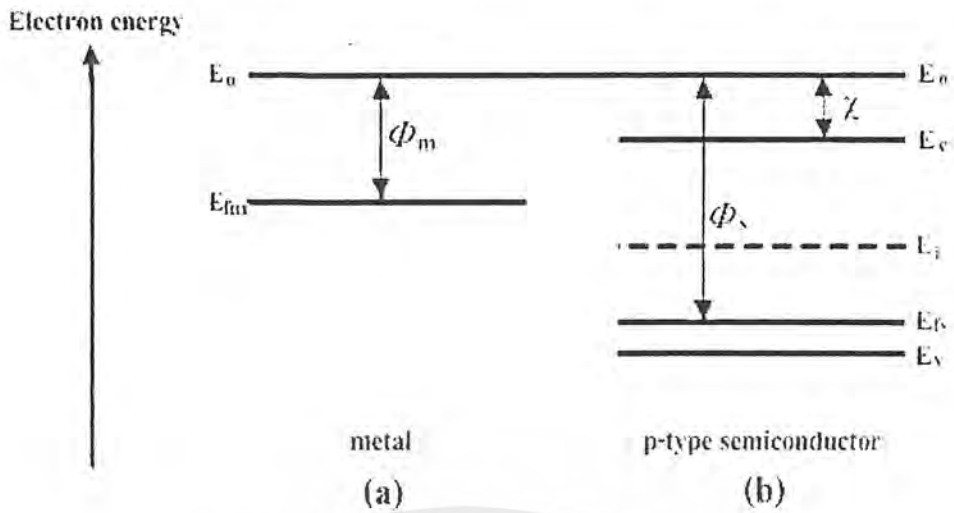


รูปที่ 2.7 แสดงระดับพลังงานผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่ 300 K [12]

อิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่ออกจากพันธะโควาเลนต์จะทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ เสมือนว่าอะตอมสารเจือผู้รับทำให้เกิดโฮล โดยไม่มีอิเล็กตรอนนำไฟฟ้า

2.7.2 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด พี [13,14]

รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด พี หรือเรียกได้อีกอย่างว่ารอยต่อ MS ซึ่งจะมีค่าฟังก์ชันงานของโลหะคือ ϕ_M มีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิด พี คือ ϕ_S ดังนั้นลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิด พี สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงแถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด พี

(a) โลหะ

(b) สารกึ่งตัวนำ

จากรูป	E_0	คือ ระดับพลังงานสูญญากาศ
	E_C	คือ ระดับพลังงานแถบความนำ
	E_i	คือ ระดับพลังงานกึ่งกลางของ E_g
	E_V	คือ ระดับพลังงานแถบวาเลนซ์
	E_{FM}	คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ
	E_{FS}	คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิด พี
	E_A	คือ ระดับพลังงานสารเจือผู้รับ
	E_g	คือ ช่องว่างพลังงาน
	ϕ_M	คือ ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ
	ϕ_S	คือ ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิด พี

ด้านโลหะจะมีค่าฟังก์ชันงาน ϕ_M ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะนั้นๆ ซึ่งค่าของฟังก์ชันงานของโลหะ ϕ_M จะเป็นคุณสมบัติมูลฐานที่บอกรายละเอียดของโลหะ ค่าฟังก์ชันงานมีหน่วย eV

ด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี จะมีค่าฟังก์ชันงาน ϕ_S ขึ้นอยู่กับการโด๊ป เพราะตำแหน่งของระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำชนิด พี จะถูกเติมด้วยอะตอมผู้รับจะปรากฏอยู่ที่ระดับต่ำกว่าระดับกึ่งกลางของแถบพลังงาน ถ้าเติมอะตอมสารเจือผู้รับ (N_A) ให้มากขึ้นระดับเฟอร์มิ (E_{FP}) จะอยู่ต่ำกว่าระดับกึ่งกลางมากยิ่งขึ้นอีก อันจะเข้าใกล้ระดับวาเลนซ์ (E_V) มากยิ่งขึ้นอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิด พี โดยเทียบกับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารอินทรีนซิก (E_i)

$$E_i - E_{FP} = KT \cdot \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (2.1)$$

โดยระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกที่ 300 K จะได้

$$E_i = \frac{E_g}{2} \quad \text{eV} \quad (2.2)$$

อย่างไรก็ตามความแตกต่างของพลังงานระหว่างระดับพลังงานสูญญากาศ (E_0) และระดับพลังงานแถบความนำ (E_C) จะทำให้เกิด (electron affinity energy; χ) จะหาได้จากสมการ

$$\chi = E_0 - E_C \quad (2.3)$$

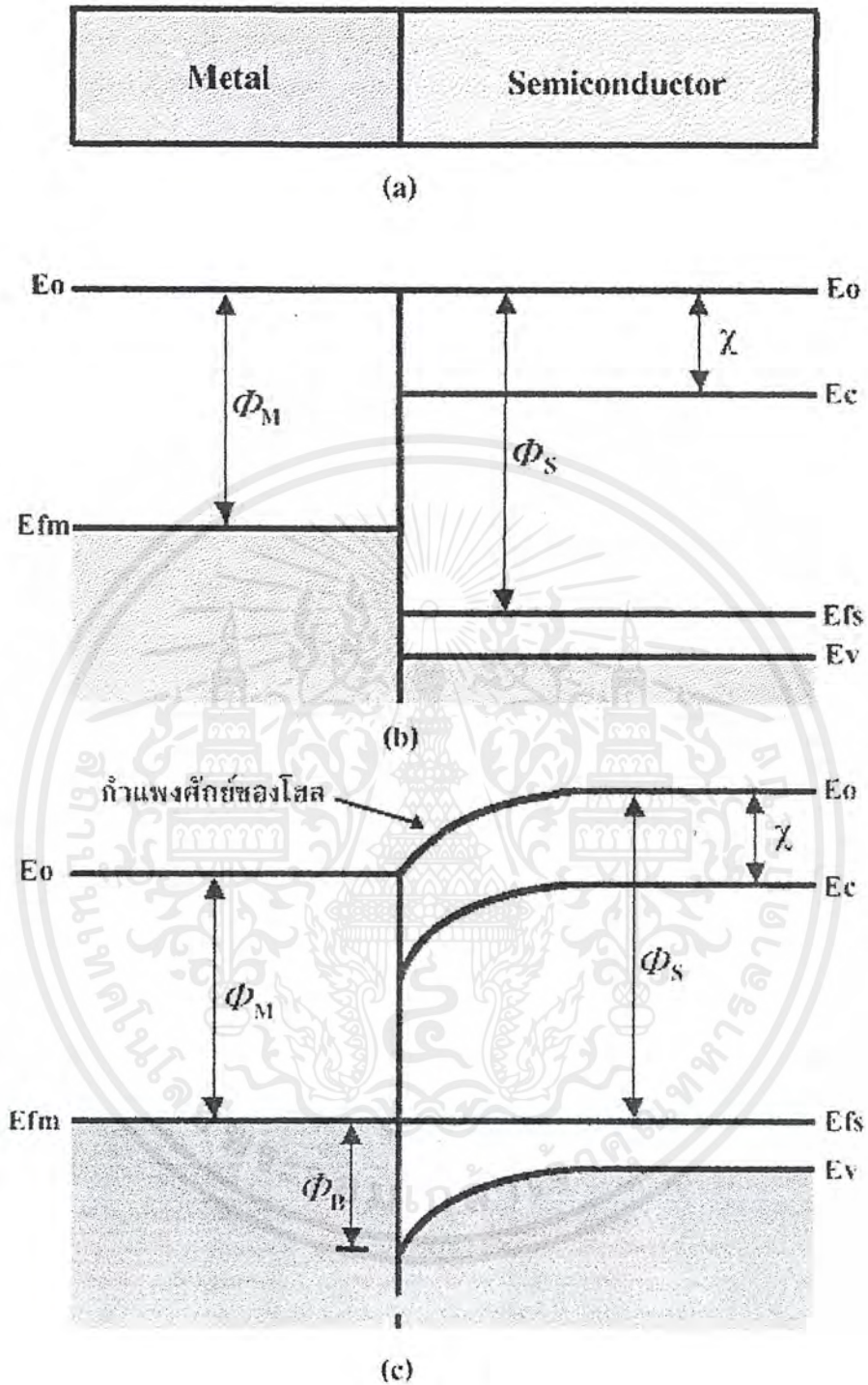
ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) จะเป็นผลต่างระหว่าง E_0 และ E_{FP} ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งค่าของ $E_C - E_F$ จะมีค่าเท่ากับแถบพลังงานต้องห้ามหรือช่องว่างพลังงาน

2.7.3 ไดโอดโครงสร้าง MS ในสถานะสมดุลความร้อน[13,14]

โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด พี ก่อนสัมผัสกันดังรูปที่ 2.9(a) จะมีฟังก์ชันงานของโลหะ ϕ_M มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ϕ_S ซึ่งไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.9(b) เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด พี มาสัมผัสจะทำให้มีการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองนี้ โดยด้านโลหะจะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อเข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี

ไปตั้งนั้นที่บริเวณรอยต่อด้านโลหะจะเป็น ไอออนบวกส่วนด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี จะเป็น ไอออนลบ จะเกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อสนามไฟฟ้าจะมีทิศด้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.9(c) แถบพลังงานจะงอโค้งลงเพื่อด้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ถ้าเมื่อใดสนามไฟฟ้ามีค่าพอดี จะทำให้ด้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหยุดหยั่งลงได้ จะทำให้สารทั้งสองอยู่ในสถานะสมดุล ดังนั้นจะมีระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองชนิดอยู่ที่ระดับเดียวกัน หรือต่อเนื่องเป็นระดับเดียวกันโดยตลอด ในที่สุดจะอยู่ในสถานะสมดุล เกิดกำแพงศักย์ของโฮลขึ้นที่รอยต่อโดยมีการสะสมของอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี ดังนั้นรอยต่อจะมีคุณสมบัติเหมือนกับรอยต่อ P-N ทั่วๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



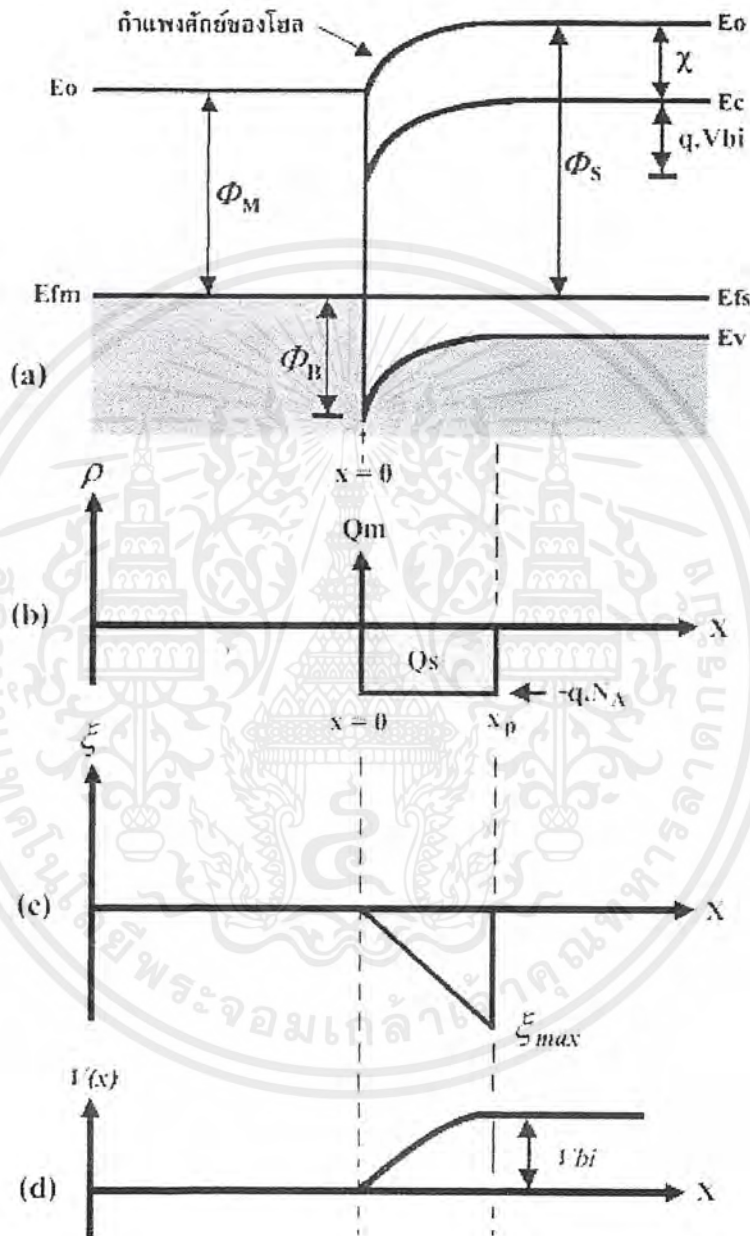
รูปที่ 2.9 แบบจำลองแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด พี

- (a) รูปรอยต่อ MS
- (b) รูปก่อนสัมผัส
- (c) รูปหลังสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3.1 คุณสมบัติรอยต่อขอตักในสถานะสมดุล

รอยต่อขอตักหรือขอตักไดโอด จะมีคุณสมบัติแรงคิฟร็กกล่าวคือ จะเห็นว่ารอยต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิด พี โดยมี $\phi_M < \phi_S$ จะสามารถยอมให้กระแสไหลได้ดีในทิศทางเดียวคล้ายกับคุณสมบัติของรอยต่อ P-N ในภาวะสมดุลดังรูปที่ 2.10(a)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิด พี

- รูปแถบพลังงานของรอยต่อ MS ในสถานะสมดุล
- ความหนาแน่นประจุบริเวณรอยต่อ MS ในสถานะสมดุล
- สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อ MS ในสถานะสมดุล
- ศักดาไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อ MS ในสถานะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเกิดกำแพงศักย์ของโฮลมีความสูงดังสมการที่ 2.4

$$qV_{bi} = \phi_M - \phi_S \quad \text{หน่วย eV} \quad (2.4)$$

ส่วนจากรูปที่ 2.9(b) จะเกิดกำแพงศักย์ของโฮลมีความสูงดังสมการที่ 2.5

$$qV_{bi} = \phi_M - \chi - (E_C - E_F) \quad \text{หน่วย eV} \quad (2.5)$$

ความหนาแน่นประจุบริเวณรอยต่อ ดังรูป 2.10(b) จุดเริ่มต้นที่ x สิ้นสุดที่ $x=x_p$ ซึ่งคิดกับบริเวณปลายพาหะ โดยด้านโลหะจะมีพาหะข้างมากคือ อิเล็กตรอน ส่วนด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี จะมีพาหะข้างมากคือ โฮล พาหะจากด้านที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะแพร่ไปด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า นั่นคือ โฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี จะแพร่ข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านโลหะ และอิเล็กตรอนทางโลหะ จะแพร่ข้ามรอยต่อเข้ามาด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี ดังนั้นที่บริเวณรอยต่อด้านโลหะจะมีสภาพเป็นอ็อนบวก ส่วนบริเวณรอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีสภาพเป็นอ็อนลบ ของอะตอมสารเจือผู้รับเกิดขึ้น ค่าความหนาแน่นของประจุบริเวณปลอดพาหะในส่วนด้านสารกึ่งตัวนำ พี ดังสมการ

$$P_p \cong -qN_A \quad (2.6)$$

ที่บริเวณผิวของโลหะ จะเกิดประจุที่ผิวขึ้นมีค่าเป็นบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเป็นลบ ทั้งนี้ก็เพราะ ไม่มีประจุอยู่ ดังสมการที่ 2.7

$$-Q_S = -qN_A \cdot x_p = +Q_M \quad \text{หน่วย coul/cm}^2 \quad (2.7)$$

ที่บริเวณรอยต่อจะเกิดมีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นซึ่งไม่มีพาหะอยู่เนื่องจากพาหะจะถูกอิทธิพลสนามไฟฟ้าผลักออกไปนอกบริเวณนี้ เรียกว่าบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) หรือ (transition region) ดังรูปที่ 2.10(c) จุดเริ่มต้นที่ x สิ้นสุดที่ $x=x_p$ สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดดังสมการ

$$\mathcal{E}(x) = \frac{1}{\mathcal{E}_S} \int qN_A^- dx + A_1 = \frac{qN_A^- x}{\mathcal{E}_S} + A_1 \quad (2.8)$$

จาก $\mathcal{E}(x_p) = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathcal{E}(x_p) = \frac{-qN_A \cdot x_p}{\mathcal{E}_S} + A_1 = 0$$

ซึ่ง

$$A_1 = \frac{qN_A \cdot x_p}{\mathcal{E}_S}$$

จะได้

$$\mathcal{E}(x) = \frac{qN_A}{\mathcal{E}_S} \cdot (x_p - x) \quad (2.9)$$

สนามไฟฟ้าสูงสุดซึ่งปรากฏที่บริเวณรอยสัมผัส บริเวณปลอดพาหะนี้จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านโลหะและด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี เรียกว่า ศักย์สัมผัส (contact potential, V_0) หรือแรงดันภายใน (Built in voltage, V_{bi}) มีหน่วยโวลต์ คล้ายกับรอยต่อ P-N โดยมีคุณสมบัติเรกติไฟร์ ขนาดของแรงดันภายในจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือและอุณหภูมิที่รอยต่อ ดังรูป 2.10(d) ซึ่ง $V_{(x_p)} = V_{bi}$ โดยเลือกให้ $V_{(x=0)} = 0$ ระดับพลังงานศักย์สัมผัสจะใช้สมการที่ 2.10

$$V_{(x)} = \int \mathcal{E}(x) dx + A_2$$

จากสมการที่ 2.9

$$\begin{aligned} V_{(x)} &= \int \left(\frac{qN_A}{\mathcal{E}_S} \right) (x_p - x) dx + A_2 \\ &= \frac{qN_A}{\mathcal{E}_S} \cdot x_p x - \frac{qN_A}{\mathcal{E}_S} \left(\frac{x^2}{2} \right) + A_2 \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณา $0 \leq x \leq x_p$

$$V_{(x_p)} = V_{bi} = \frac{qN_A x_p x_p}{\mathcal{E}_S} - \frac{qN_A}{\mathcal{E}_S} \cdot \frac{x_p^2}{2} + A_2$$

โดย

$$A_2 = V_{bi} = \frac{-qN_A}{\mathcal{E}_S} \cdot \frac{x_p^2}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ฟังก์ชันของพลังงานศักย์สัมผัส

$$V(x) = V_{bi} - \frac{qN_A}{2\mathcal{E}_S} \cdot (x_p - x)^2 \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 เราใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ว่าตำแหน่ง $x=0$ ถ้า $V=0$ ในที่สุดจะได้สมการที่ 2.11 ซึ่งจะเห็นว่าพลังงานศักย์สัมผัสในส่วน $0 \leq x \leq x_p$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างพาราโบลาโบว์กับการเพิ่มขึ้นของระยะทาง x

$$V_{bi} = \frac{qN_A}{2\mathcal{E}_S} \cdot x_p^2 \quad (2.11)$$

และค่า

$$x_p = \sqrt{\frac{2V_{bi}\mathcal{E}_S}{qN_A}}$$

ค่าศักย์สัมผัสจะหาได้อีกโดยจากสมการที่ 2.5

2.7.3.2 ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์[12]

การกระจายความหนาแน่นของโฮลที่ระดับพลังงานใดๆในแถบวาเลนซ์ หาได้จากผลคูณของความหนาแน่นสถานะกับค่าความหนาแน่นของโอกาสที่จะพบโฮลที่ระดับพลังงานนั้นๆ ดังสมการที่ 2.12

$$p(E)_{\text{ในแถบวาเลนซ์}} = S(E)_{\text{ในแถบวาเลนซ์}} \cdot P(E)_{\text{ของโฮลในแถบวาเลนซ์}} \quad (2.12)$$

โดย $p(E)$ คือความหนาแน่นของโฮลที่ระดับพลังงาน E ในแถบวาเลนซ์ (โฮล/ลบ.ซม)

$S(E)$ คือ ความหนาแน่นของสถานะในแถบวาเลนซ์ (สถานะ/ลบ.ซม)

$P(E)$ คือ โอกาสที่จะพบ โฮลที่ระดับพลังงาน E ใดๆในแถบวาเลนซ์

ว่าระดับพลังงานที่แท้จริงของระดับพลังงาน E ใดๆในแถบวาเลนซ์ก็คือ

$$E_{\text{ในแถบวาเลนซ์}} = E_V - E \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความหนาแน่นสถานะที่ระดับพลังงานในแถบวาเลนซ์โดยแทน m ด้วย m_p^* เป็นมวลยังผลของโฮลลงในสมการที่ 2.14

$$S(E) = \frac{8\sqrt{2}}{h^3} \cdot \pi m^{3/2} \cdot E^{1/2} \quad (2.14)$$

$$S(E) = \frac{\pi}{2} \left[\frac{8m_p^*}{h^2} \right]^{3/2} (E_V - E)^{1/2} \quad (2.15)$$

ความหนาแน่นของโอกาสที่จะพบโฮลก็คือ ความหนาแน่นของโอกาสที่ระดับพลังงานนั้น จะว่างหรือไม่มีอิเล็กตรอนเข้าเต็มเต็ม ดังสมการที่ 2.16

$$\text{โอกาสที่จะพบโฮล } E = I - P(E) = I - \frac{I}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \quad (2.16)$$

ซึ่ง $E \ll E_F$ โดยระดับ E_F จะอยู่สูงกว่าระดับ E มากกว่า $3kT$ ดังในรูปที่ 2.10 เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\text{โอกาสที่จะพบโฮล } E = e^{(E_V - E_F)/kT} = e^{-(E_F - E_V)/kT} \quad (2.17)$$

ดังนั้นหาความหนาแน่นของโฮลที่ระดับพลังงานใดๆในแถบวาเลนซ์ โดยแทนสมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.12 แล้วอินทิเกรตตั้งแต่ระดับพลังงาน ค่าลบอนันต์ถึงระดับ E_V จะได้สมการความหนาแน่นของโฮลดังสมการที่ 2.18

$$p = N_V e^{-(E_{FS} - E_V)/kT} = N_V e^{(E_V - E_{FS})/kT} \quad (2.18)$$

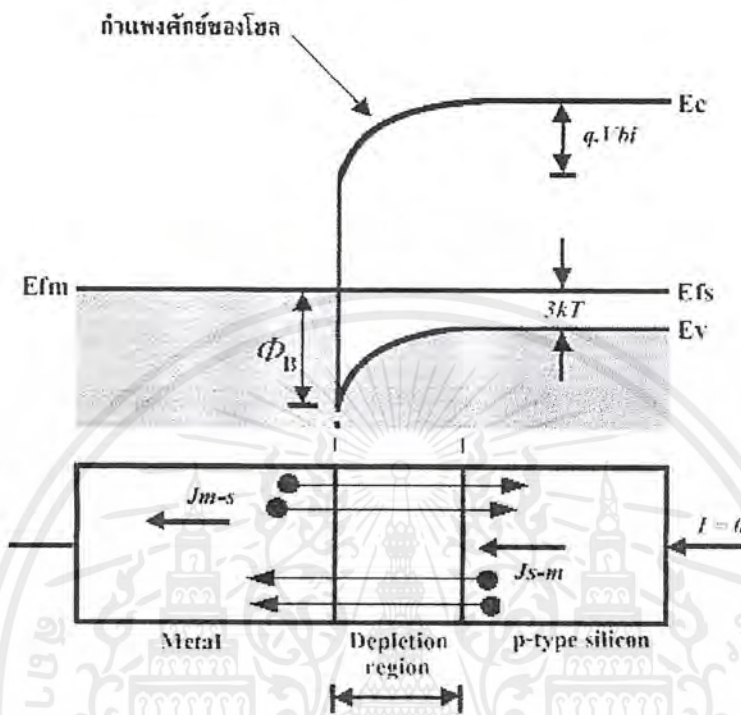
หรือ
$$p = n_i e^{(E_i - E_{FS})/kT} \quad (2.19)$$

โดยที่ N_V คือ ความหนาแน่นสถานะยังผลของแถบวาเลนซ์ (Effective density of state of valence band) หน่วย สถานะ/ลบ.ซม. โดยปกติค่า N_V ของซิลิกอนมีค่าเท่ากับ $1.83 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และ E_g เท่ากับ 1.12 eV ที่อุณหภูมิ 300 K ในสารกึ่งตัวนำชนิด พี ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับก็คือ N_A ซึ่ง $p \cong N_A$ ดังนั้นจะเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการที่ 2.20

$$p_S = N_V e^{-\phi_B / kT} = N_A e^{-qV_{bi} / kT} \tag{2.20}$$

โดยที่

$$\phi_B = qV_{bi} + (E_C - E_{FS})_{bulk}$$



รูปที่ 2.11 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MS ในอุณหภูมิต่ำ
สมมูลความร้อน, $V_A = 0$

ในโลหะจะมีพาหะนำประจุเพียงชนิดเดียวคือ อิเล็กตรอน ซึ่งมีสภาพเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิวเคลียสและอิเล็กตรอนนั้นคือ ไม่มีแถบพลังงานต้องห้ามหรือช่องว่างพลังงาน ($E_g = 0$) ดังนั้นในโลหะจึงไม่มีโฮลเหมือนในสารกึ่งตัวนำ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อก็คือ กระแสที่เกิดจากการแพร่ของพาหะส่วนน้อย โดยกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนจะไหลจากด้านโลหะเข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี ดังสมการ

$$J_{S-M} = -q \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*} \right)^{1/2} N_A e^{-(E_{FS} - E_V) / kT} \tag{2.21}$$

ส่วนกระแสการแพร่ของโฮล จะไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี เข้าไปยังด้านโลหะดัง
สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

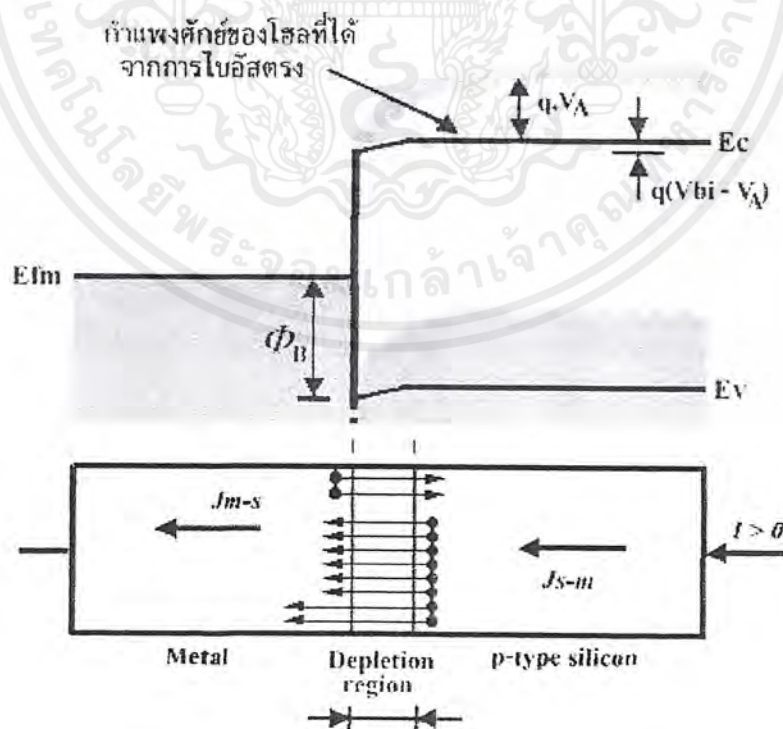
$$J_{M-S} = q \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*} \right)^{1/2} N_V e^{-(E_{FS} - E_V)/kT} \quad (2.22)$$

โดยค่าของ K_1 คือค่าคงที่ของวัสดุ

ขณะที่มีการถ่ายเทของพาหะ ข้ามรอยต่อนี้ ระดับพลังงานเฟอร์มิจะมีการปรับระดับให้เท่ากันอย่างต่อเนื่องโดยตลอด ($E_{FM} = E_{FS}$) จนอยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งจะไม่มีการเคลื่อนที่ไหลผ่านรอยต่อ MS นี้อีก จะมีความหนาแน่นของพาหะคงที่ เนื่องจากอัตราการเกิด และอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเกิดขึ้นพร้อมกันและมีค่าเท่ากัน โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากสารกึ่งตัวนำชนิด พี ไปยังโลหะ

2.7.4 ไดโอดโครงสร้าง MS ในสภาวะการให้ไบอัสตรง[13,14]

รอยต่อ MS ได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี นำขั้วบวกมาต่อเข้า ส่วนด้านโลหะนำขั้วลบมาต่อเข้า ดังรูป 2.12 จะทำให้ระดับพลังงานทุกระดับในสารกึ่งตัวนำชนิด พี เพิ่มขึ้น โสไลทางด้านสารกึ่งตัวนำ และอิเล็กตรอนทางด้าน โลหะจะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ MS ไปยังด้านตรงข้ามได้โดยสะดวก รอยต่อ MS จะเสมือนเป็นตัวนำกระแสถูกต้านด้วยความต้านทานของเนื้อสารที่มีค่าน้อยมาก ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะก็จะแคบลงกว่าตอนภาวะสมดุล เกิดเป็นกระแสไหลในวงจรรายนอกได้



รูปที่ 2.12 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MS ในอุดมคติสภาวะไบอัส

ตรง, $V_A > 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น J_{S-M} จะคงเหลือค่าดังสมการที่ 2.20 หรือ 2.21 ส่วน J_{M-S} จะเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยพิจารณาได้จากแรงดันภายนอก V_A จะไปปรากฏที่รอยต่อและช่วยหักล้างศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อ MS ดังนั้นแรงดันตกคร่อมรอยต่อจะมีค่า $(V_{bi} - V_A)$ กำแพงศักย์ของโฮลมีค่า $q(V_{bi} - V_A)$ พาหะส่วนน้อยที่บริเวณปลายปอดพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเอกโพรเนนเชียล กับแรงดันไบอัสตรงที่ป้อนให้แก่รอยต่อ

$$J_{M-S} = q \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*} \right)^{1/2} N_A e^{q(V_{bi} - V_A) / kT} \quad (2.23)$$

ผลรวมของกระแส J_{M-S} และ J_{S-M} เคลื่อนที่สวนกันจะได้ดังสมการที่ 2.24.a

$$J = q \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*} \right)^{1/2} N_A e^{qV_{bi} / kT} \cdot e^{qV_A / kT} - q \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*} \right)^{1/2} N_A e^{qV_{bi} / kT}$$

แยกแฟกเตอร์

$$J = q \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*} \right)^{1/2} N_A e^{qV_{bi} / kT} \left[e^{qV_A / kT} - 1 \right]$$

ซึ่ง $N_V = N_A$ ดังนั้น

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.24)$$

$$J = q \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*} \right)^{1/2} N_V e^{qV_{bi} / kT} \left[e^{qV_A / kT} - 1 \right] \quad (2.24.a)$$

ให้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ จะได้ดังสมการที่ 2.24.b

$$J_0 = q \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*} \right)^{1/2} N_V e^{qV_{bi} / kT} = q \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*} \right)^{1/2} N_V e^{-\phi_B / kT} = K e^{qV_{bi} / kT} \quad (2.24.b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_0 = \frac{4\pi q m_p^* k^2}{3h} T^2 e^{-q\phi_B / kT} \quad (2.24.b.1)$$

ค่าคงที่ Richardson $A^* = \frac{4\pi q m_p^* k^2}{3h}$ (2.24.b.2)

โดย $J_0 = \frac{I_S}{A}$ (2.24.b.3)

ดังนั้นกระแสอิ่มตัว (I_S) จะเท่ากับ

$$I_S = AA^* T^2 e^{-q\phi_B / kT} \quad (2.24.b.4)$$

สามารถหาความสูงของกำแพงศักย์ได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.24.b.4

$$q\phi_B = kT \ln \left(\frac{AA^* T^2}{I_S} \right) \quad (2.24.b.5)$$

ซึ่งมีความหนาแน่นพาหะส่วนมากเท่ากับค่าความหนาแน่นพาหะส่วนน้อย หรืออีกนัยคือ กระแสจะถูกจำกัดโดยกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ อิเล็กตรอนในโลหะจะมีค่าของพลังงานลดลงน้อยกว่าเดิม สมการที่ 2.24.a กลายเป็น

$$J = J_0 \left(e^{qV_A / kT} - 1 \right) \quad (2.25)$$

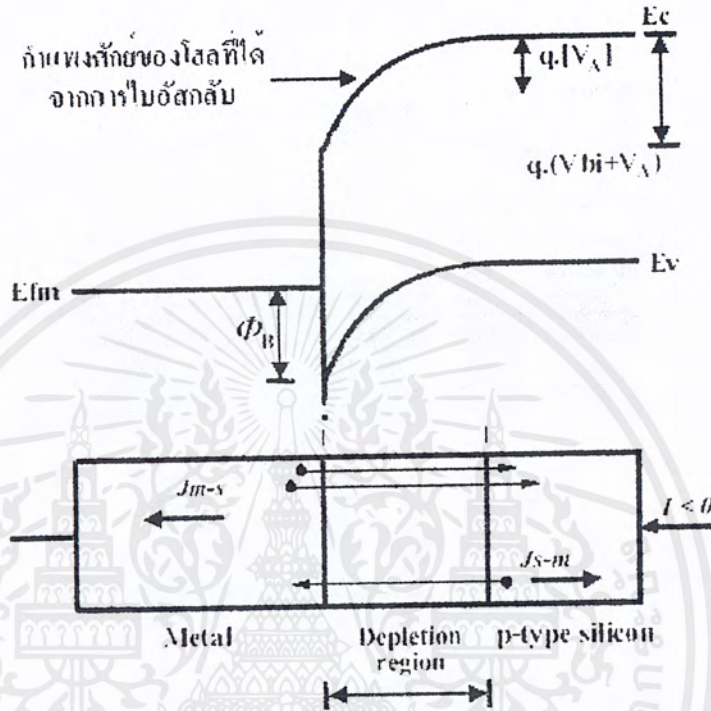
สมการนี้เป็นสมการ ไดโอดหรือสมการเรกติไฟร์ ซึ่งอธิบายถึงการเกิดกระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อยซึ่งถูกฉีดข้ามรอยต่อในขณะรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

2.7.5 ไดโอดโครงสร้าง MS ในสภาวะการให้ไบอัสกลับ[13,14]

รอยต่อ MS ได้รับแรงดันไบอัสกลับ กล่าวคือทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี นำขั้วลบมาต่อเข้า ส่วนด้านโลหะนำขั้วบวกมาต่อเข้า ดังรูป 2.13 จะทำให้ระดับพลังงานทุกระดับในสารกึ่งตัวนำชนิด พี ลดลง แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า V_A จะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อให้มีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเดิม ดังนั้นแรงดันตกคร่อมรอยต่อจะมีค่า $(V_{bi} + V_A)$ นั่นคือศักดาไฟฟ้ารอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้น
 กำแพงศักย์ของโฮลมีค่า $q(V_{bi} + V_A)$ จะสูงขึ้นมาก บริเวณหลอดพาหะจะกว้างขึ้น ทำให้พาหะ
 ส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้ รอยต่อ MS จะเสมือนเป็นฉนวนไม่ยอมให้กระแสไฟ
 ฟ้าไหลผ่านได้



รูปที่ 2.13 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MS ในอุดมคติสภาวะไบอัส
 กลับ, $V_A < 0$

เนื่องจากแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ V_A จะทำให้โฮลจากส่วนโลหะ และอิเล็กตรอนจากส่วน
 ซี เป็นพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ ทำให้บริเวณหลอดพาหะมีปริมาณความหนาแน่นของ
 พาหะส่วนน้อยลดลงอย่างเอกโปเรเนนเชียล ดังนั้น J_{S-M} จะคงเหลือค่าดังสมการที่ 2.25 และสม
 การที่ 2.24.a จะได้สมการที่ 2.26

$$J \cong -J_0 = -K(e^{-qV_A/kT} - 1) \tag{2.26}$$

ซึ่งเราจะพิจารณาดังสมการไดโอดหรือสมการเรกติไฟร์ อธิบายการเกิดกระแสแพร่ของ
 พาหะส่วนน้อยข้ามรอยต่อในขณะรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสกลับ ดังสมการที่ 2.27

$$J = J_0(e^{-qV_A/kT} - 1) \tag{2.27}$$

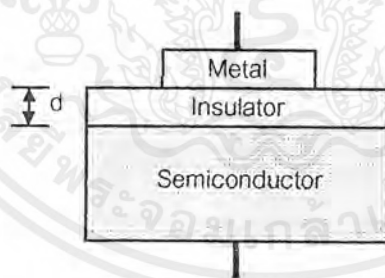
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมาย $-J_0$ เป็นกระแสย้อนกลับมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ซึ่ง J_0 เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งมีค่าน้อยกว่ามาก และไม่ขึ้นกับแรงดันไบอัสที่จ่ายให้ แต่ขึ้นกับอุณหภูมิของรอยต่อ

จากทฤษฎีของไดโอด โครงสร้าง MS จะได้ไดโอดที่มีคุณสมบัติการเรกติไฟร์หรือขอตักไดโอดเป็นอย่างดี แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ไดโอดโครงสร้าง MS ที่สังเคราะห์จากฟิล์มเพชรชนิดพี จะมีกระแสรั่วไหลในภาวะไบอัสกลับเป็นจำนวนมาก กล่าวอีกนัยได้ว่า ไดโอดโครงสร้าง MS ที่สังเคราะห์จากฟิล์มเพชรชนิดพีนี้มีอัตราการกรองการไหลของกระแสต่ำ (Low current rectification ratio) อันเป็นข้อเสีย, ข้อบกพร่องของไดโอดโครงสร้าง MS ที่สังเคราะห์จากฟิล์มเพชรชนิดพี [2,10] ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะลดข้อเสีย, ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับไดโอดโครงสร้างนี้ นั่นก็คือ ทำการสร้างชั้นฉนวน [9] หรือฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกขึ้นกั้นตรงกลางของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรชนิดพี ดังจะได้โครงสร้างไดโอด MIS ในหัวข้อต่อไป

2.8 ไดโอดโครงสร้าง MIS (Metal-Insulator-Semiconductor Diode)[14]

เป็นโครงสร้างรอยต่อของโลหะ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ ในปีค.ศ. 1951 Moll และ Pfann&Garrett ได้เสนอโครงสร้างนี้ขึ้นเป็นครั้งแรก ดังรูปที่ 2.14 ต่อมา Frankl และ Lindner ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของโครงสร้าง MIS ดังนั้นในหัวข้อนี้จะพิจารณาดังทฤษฎีของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติโดยเลือกพิจารณาเฉพาะกรณีของชั้นสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี



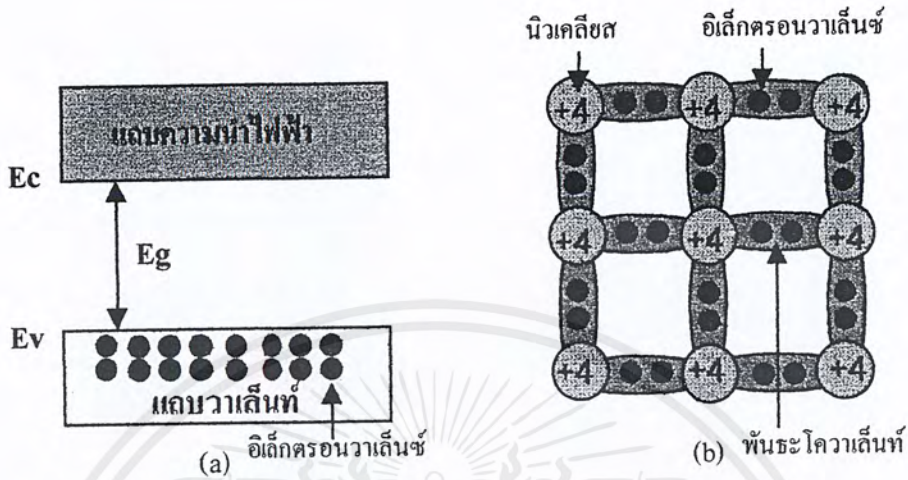
รูปที่ 2.14 ไดโอดโครงสร้าง MIS

2.8.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก

สารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกหรือบางครั้งเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด I (I-type semiconductor) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ กล่าวคือ ไม่มีสารเจือปนของอะตอมเจือปนใดๆ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.15(b) ซึ่งแต่ละอะตอมของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกจะเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม โดยเป็นการเกาะเกี่ยวแบบ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) มีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน อิเล็กตรอนเหล่านี้คือ อิเล็กตรอนวาเลนซ์นั่นเอง ที่อุณหภูมิต่ำๆ หรือ 0K อิเล็กตรอนทุกตัวจะถูกยึดแน่นกับแกนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอม (Core of atom) หรือ อิเล็กตรอนจะมีค่าพลังงานต่ำสุด อิเล็กตรอนทุกตัวจะอยู่ในพันธะโควาเลนต์ ดังรูปที่ 2.15(a)



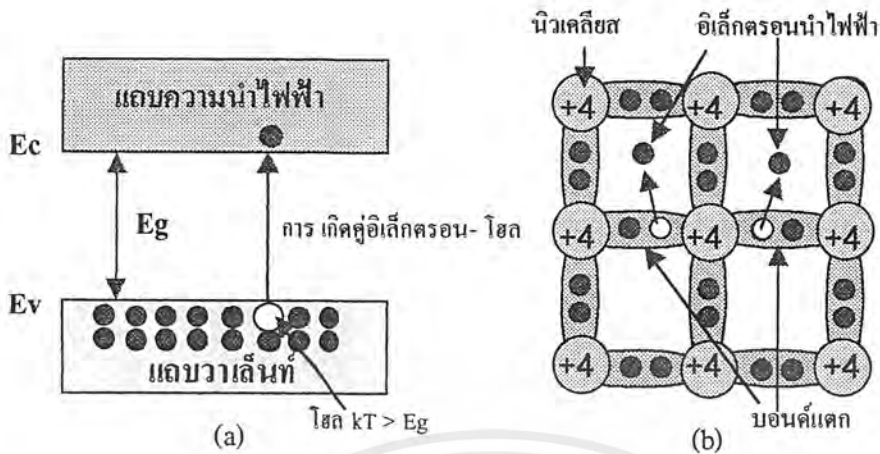
รูปที่ 2.15 ที่อุณหภูมิต่ำๆ หรือ $T = 0 \text{ K}$ [12]

(a) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค

(b) แบบจำลองพันธะโควาเลนซ์

คั้งนั้นสถานะทุกสถานะในแถบวาเลนซ์จึงมีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่เต็มทุกสถานะ เรียกว่า แถบเต็ม (Full band) ส่วนแถบนำไฟฟ้า ทุกสถานะจะว่างเปล่าไม่มีอิเล็กตรอนเข้าไปครอบครองอยู่เลย เรียกว่า แถบว่าง (Empty band) สารกึ่งตัวนำอินทรีนซิคจะแสดงคุณสมบัติคล้ายกับฉนวน คือนำไฟฟ้าได้ไม่ดี

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 K หรือพิจารณาที่ 300 K พลังงานความร้อนจะมีค่ามากพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนวาเลนซ์บางส่วนในพันธะโควาเลนซ์ให้สามารถเอาชนะพลังงานที่อิเล็กตรอนถูกยึดเหนี่ยวไว้จากนิวเคลียสให้หลุดออกมาจากพันธะได้ อิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่หลุดออกมากลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้า (Conduction electron) มีคุณสมบัติคล้ายอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) ดังรูปที่ 2.16(b) ที่พันธะนี้จะเกิดที่ว่างขึ้น เรียกว่า โฮล เป็นพันธะนำประจุชนิดบวกมีประจุไฟฟ้าเท่ากับอิเล็กตรอน ซึ่งโฮลจะเคลื่อนที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์ ทุกครั้งที่พันธะแตกออกจะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole Pair) ดังรูปที่ 2.16(a) พลังงานภายนอกเช่น ความร้อนหรือโฟตอนที่มีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงาน (E_g) จะสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าสภาพเป็นอิเล็กตรอนอิสระ และทิ้งให้เกิดที่ว่างที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่า โฮล



รูปที่ 2.16 ที่อุณหภูมิสูง $T > 0 \text{ K}$ หรือ การเกิดคู่วาเลนซ์อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากได้รับพลังงาน กระตุ้นจากภายนอก[12]

- (a) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก
(b) แบบจำลองพันธะโควาเลนต์

2.8.1.1 ความหนาแน่นของพาหะในสารอินทรีนซิก

การเกิดอิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดเป็นคู่ๆ เป็นปรากฏการณ์การเกิดพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกทั่วไป พิจารณาจากสมการความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานใดๆ ในแถบนำไฟฟ้าเป็น

$$n(E)_{\text{ในแถบนำไฟฟ้า}} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{8m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} \exp[-(E - E_F)/kT] \quad (2.28)$$

อินทิเกรตสมการที่ 2.28 จะได้

$$n = 2 \left(\frac{2m_n^* kT \pi}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad (2.29)$$

โดยที่

$$N_C = 2 \left(\frac{2m_n^* kT \pi}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหัวข้อที่ 2.7.3.2 ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ แทนสมการที่ 2.13 และ สมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.12 จะให้ความหนาแน่นของโฮลที่ระดับพลังงานใดๆในแถบวาเลนซ์ ดังสมการที่ 2.31

$$P(E)_{\text{ในแถบวาเลนซ์}} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\delta m_p^*}{h^2} \right)^{3/2} (E_V - E)^{1/2} \exp[-(E_F - E)/kT] \quad (2.31)$$

จากสมการที่ 2.24.a ค่า N_V จะได้

$$N_V = 2 \left(\frac{2m_p^* kT \pi}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.32)$$

ค่าความหนาแน่นสถานะยังผลของแถบวาเลนซ์ (Effective density of state of valence band) จากสมการที่ 2.30 และสมการที่ 2.32 จะมีค่าความแตกต่างกันเฉพาะค่ามวลยังผลของอิเล็กตรอนและโฮลเท่านั้น สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิดกันค่าของความหนาแน่นสถานะ N_C และ N_V ก็จะมีค่าแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความหนาแน่นสถานะยังผลในแถบความนำไฟฟ้า และแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆที่ 300 K[12]

สารกึ่งตัวนำ	$N_C(\text{cm}^{-3})$	$N_V(\text{cm}^{-3})$	$E_g(\text{eV})$
Si	3.22×10^{19}	1.83×10^{19}	1.12
Ge	1.03×10^{19}	5.35×10^{18}	0.66
GaAs	4.21×10^{17}	9.52×10^{18}	1.42

ดังนั้นการเกิดของพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค โดยการคูณสมการที่ 2.29 และสมการที่ 2.31 จะได้

$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp \left[- \left(\frac{E_C - E_V}{kT} \right) \right] \quad (2.33)$$

แทนค่า N_C, N_V โดย $E_C - E_V = E_g$ ลงในสมการที่ 2.33 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_i = KT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.34)$$

โดย n_i คือ ความหนาแน่นอินทรินซิก (Intrinsic concentration)

E_g คือ ขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

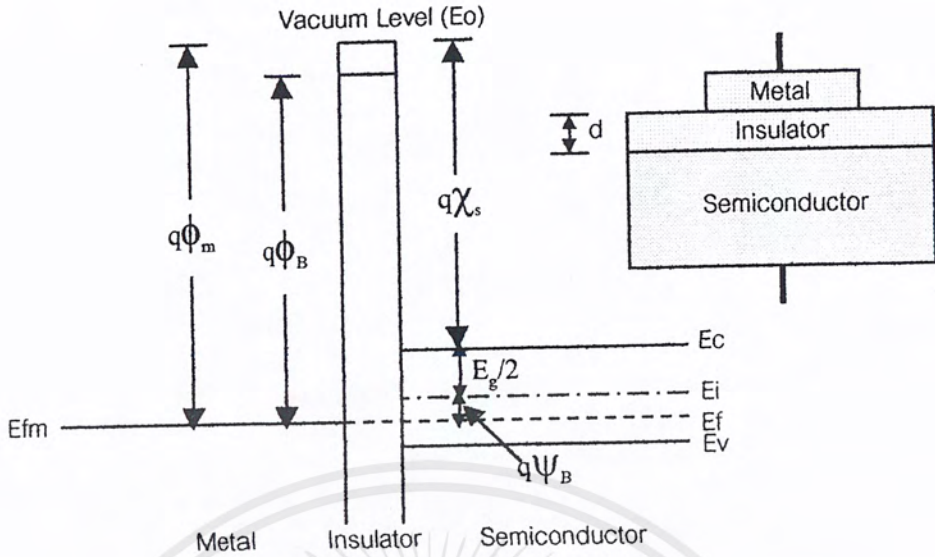
$$K \text{ คือ ค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ} = 2\left(\frac{2kT\pi}{h^2}\right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4}$$

จากสมการข้างบนที่ 2.34 จะเห็นว่าค่าของ n_i ขึ้นกับอุณหภูมิ T และ E_g ไม่เกี่ยวข้องกับระดับเฟอร์มิเลเย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของ n_i จะมีค่ามากขึ้น โดย n_i แปรกับ $T^{3/2}$ ทั้งนี้อิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่อยู่ต่ำกว่าระดับ E_g ลงไป สามารถถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ จำนวนอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและโฮลจึงมีปริมาณมากขึ้น ถ้า E_g เพิ่มขึ้น จะทำให้ n_i ลดลงอย่างเอกโปเนนเชียลซึ่งที่อุณหภูมิ 300K ถ้า n_i ของซิลิกอนมีค่าประมาณ 10^{10} อนุภาคต่อลบ.ซม. ของเยอรมันเนียมมีค่าประมาณ 2×10^{13} อนุภาคต่อลบ.ซม. และของแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งมีค่า E_g มากกว่าสารทั้ง 2 ข้างต้น จะมีค่า n_i ประมาณ 2.25×10^6 อนุภาคต่อลบ.ซม. ที่อุณหภูมิ 300K พลังงานจากความร้อนทำให้เกิดอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและโฮลได้เพียง 1×10^{10} อนุภาคต่อลบ.ซม. เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนออกมาแล้ว จำนวนพันธะโควาเลนต์ 10^{13} พันธะ จะมีเพียง 1 พันธะ เท่านั้นที่มีโอกาสแตกออกอันทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล 1 คู่ได้ นั่นแสดงว่า ความหนาแน่นอินทรินซิก (n_i) ถูกพิจารณาว่ามีค่าน้อยมากที่อุณหภูมิคงที่ ในภาวะสมดุลความร้อน ค่าความหนาแน่นอินทรินซิกมีค่าดังสมการที่ 2.35 เรียกว่ากฎเมสแอคชั่น (Law of Mass action)

$$np = n_i^2 \quad (2.35)$$

2.8.2 ไดโอดโครงสร้าง MIS ในภาวะสมดุลความร้อน

ดังรูปที่ 2.17 จะเป็นการแสดงถึงลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุณหภูมิตั้งแต่อยู่ในภาวะสมดุลความร้อน หรือ ไม่มีแรงดันไบอัสจากภายนอกเลย ($V=0$)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติสถานะสมดุลความร้อน ($V=0$)

คุณสมบัติของไดโอด โครงสร้าง MIS ในอุดมคติขณะในภาวะสมดุลความร้อน จะมีค่าความแตกต่างของพลังงานฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (ϕ_{MS}) ในภาวะสมดุลความร้อนเป็นศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ 2.36

$$\phi_{MS} = \phi_M - \left[\chi_s + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right] = 0 \quad (2.36)$$

โดย ϕ_{MS} คือ ค่าต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

ϕ_M คือ ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ

ϕ_B คือ ค่าค่าแฟงศักย์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

χ_s คือ ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ

E_g คือ แถบพลังงานช่องว่างของสารกึ่งตัวนำ

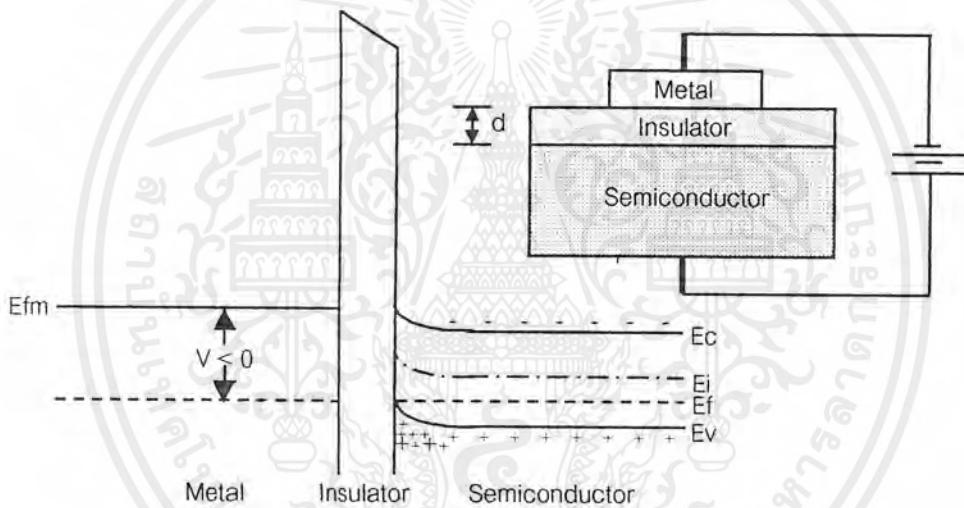
ψ_B คือ ค่าต่างของค่าแฟงศักย์ระหว่างระดับ E_f กับระดับ E_i

ค่าประจุต่างๆ ไม่สามารถปรากฏอยู่ในโครงสร้างได้ โดยประจุเหล่านี้จะปรากฏในสารกึ่งตัวนำในปริมาณเท่ากับในชั้นโลหะ แต่จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกันที่บริเวณพื้นผิวที่ติดกับชั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวน ส่วนประจุพาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นฉนวนภายใต้กรณีการให้ไบอัส ก็คือ พิกัดความต้านทานของฉนวนมีค่าเป็นอนันต์

2.8.3 ไดโอดโครงสร้าง MIS ในสถานะการให้ไบอัสตรง

ให้ศักดาแถบที่ชั้นโลหะ และศักดาแถบที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีของไดโอด ประจุพาหะโฮลในระดับพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ (E_V) มีพลังงานสูงขึ้น และระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ (E_{Fp}) อยู่ในระดับคงที่เนื่องจากไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อของฉนวน จะทำให้ระดับพลังงานวาเลนซ์ที่บริเวณรอยต่อกับฉนวนมีลักษณะ โค้งขึ้น นอกจากนี้ยังจะทำให้ความหนาแน่นของประจุพาหะโฮลที่บริเวณพื้นผิวสารกึ่งตัวนำมีปริมาณสูงขึ้นเกิดการสะสมของประจุพาหะส่วนมากโฮล ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติสภาวะไบอัสตรง (ไปข้างหน้า)

เนื่องจากในทางอุดมคติแล้วถือว่าการนำไฟฟ้าในชั้นฉนวนนี้มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในความเป็นจริงจะพบว่าฉนวนสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยสนามไฟฟ้าสูงๆ โดยที่ทั่วๆ ไปแล้ว ลักษณะการไหลของกระแสผ่านชั้นฉนวนหรือการนำไฟฟ้ามิได้หลายลักษณะ สำหรับการไหลของกระแสผ่านชั้นฉนวนแบบ Schottky emission จะเป็นการนำไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับการนำไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอตัขึ่งขึ้นอยู่กับความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส ดังสมการที่ 2.37

$$q\phi_R = V_{hi} + \Delta E \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ลักษณะการนำกระแสผ่านชั้นฉนวนในโคโอด โครงสร้าง MIS[9]

รูปแบบการนำกระแส	สมการความสัมพัทธ์
Schottky Emission	$I = \left(\frac{4\pi q m_h^* k^2}{h^3} \right) A T^2 \exp \left[\frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV / 4\pi\epsilon_i d})}{kT} \right]$
Frenkel - Poole Emission	$I \approx \frac{AV}{d} \exp \left[\frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV / \pi\epsilon_i d})}{kT} \right]$
Tunnel or Field Emission	$I \approx \frac{AV^2}{d^2} \exp \left[\frac{4d\sqrt{(2m_h^*)}(q\phi_B)^{3/2}}{3q h V} \right]$

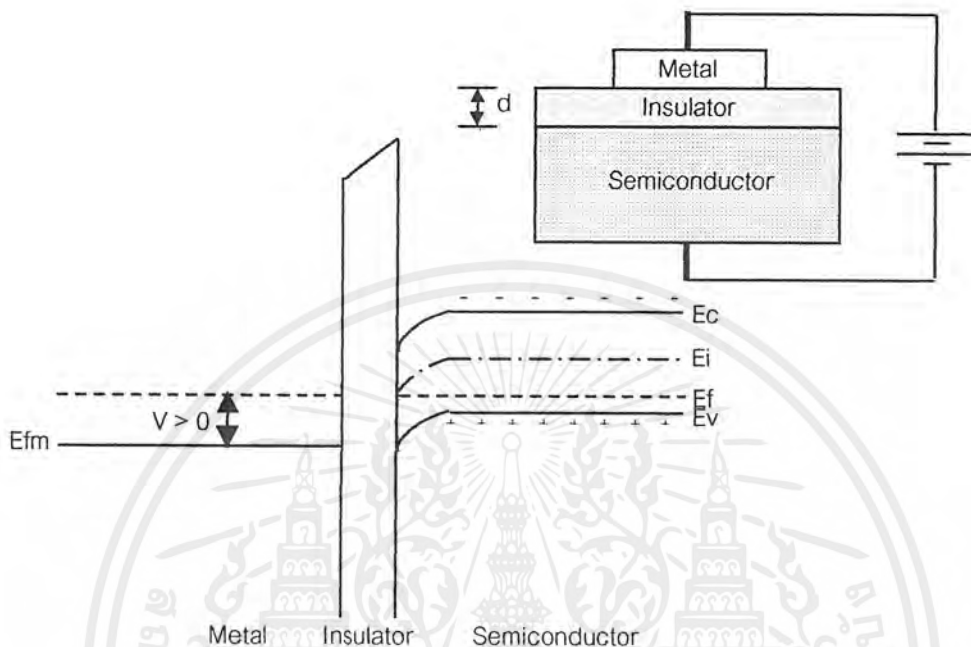
ส่วนการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole emission มีลักษณะคล้ายกันกับการไหลของกระแสแบบ Schottky emission แต่การไหลของกระแสผ่านเข้าไปในชั้นของฉนวนนี้ ประจุพาหะส่วนใหญ่จะถูกแตรปด้วยสถานะพลังงานว่างภายในชั้นฉนวนนี้ จะต้องได้รับพลังงานจากภายนอกที่สูงขึ้น อันได้แก่ การให้ไบอัสหรือให้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่วนการไหลของกระแสแบบ Tunnel emission การไหลของกระแสที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

2.8.4 โคโอดโครงสร้าง MIS ในสถานะการให้ไบอัสย้อนกลับ

ให้ศึกษาวงที่ชั้นโลหะและศักดาลบที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีของโคโอด โดยสามารถพิจารณาได้ 2 ช่วงคือ

2.8.4.1 ช่วงปลอดประจุพาหะ (Depletion of majority carrier)

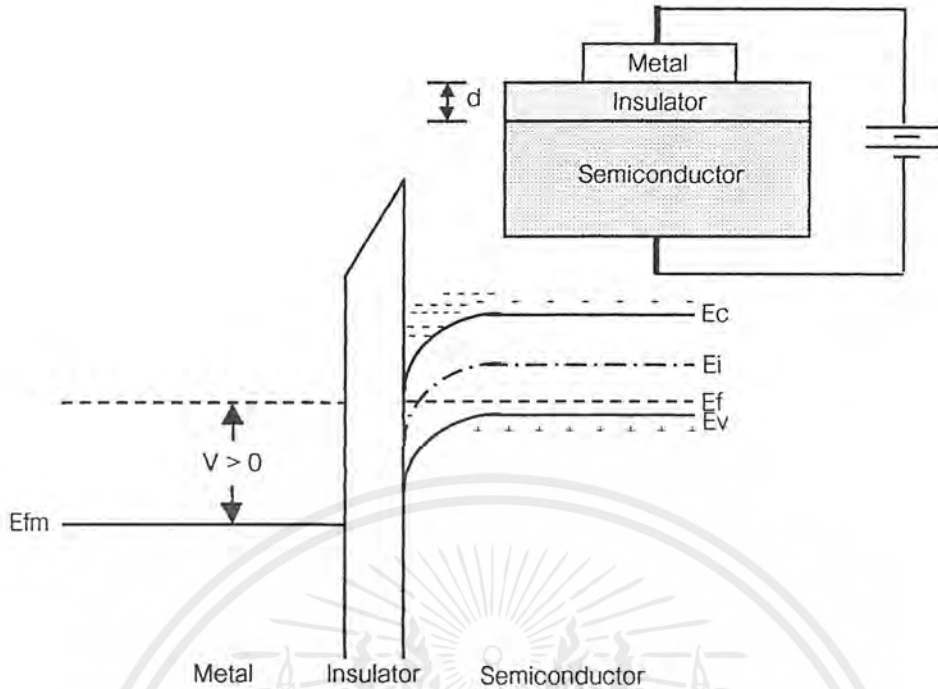
จะเป็นช่วงแรกๆที่เริ่มให้ไบอัสแก่ชั้นโลหะ เป็นผลให้ประจุพาหะส่วนมาก(ประจุบวก)โฮลของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยต่อกับฉนวนเกิดการรวมตัว (recombination) กับประจุลบที่ส่งผ่านมา เกิดเป็นช่วงปลอดประจุพาหะ ประจุโฮลที่แถบระดับพลังงานวาเลนซ์จะมีค่าลดลง ทำให้แถบระดับพลังงานวาเลนซ์มีลักษณะโค้งงอออกห่างจากระดับพลังงานเฟอร์มิดังในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติสถานะไบอัสย้อนกลับ ช่วงปลอดประจุ

2.8.4.2 ช่วงส่วนกลับประจุพาหะ (Inversion)

จะเป็นช่วงหลังจากช่วงแรก เมื่อให้ศักดาบวกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งพลังงานที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับค่าแพนซ์ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณประจุพาหะของทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณพื้นผิวมีค่าเท่ากัน ($n_s = p_s = n_i$) หรือที่เป็นช่วงที่ระดับพลังงานอินทรินซิกตัดกับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ดังในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอด โครงสร้าง MIS ในอุดมคติภาวะไบอัสย้อนกลับ ช่วงส่วนกลับประจุพาหะ

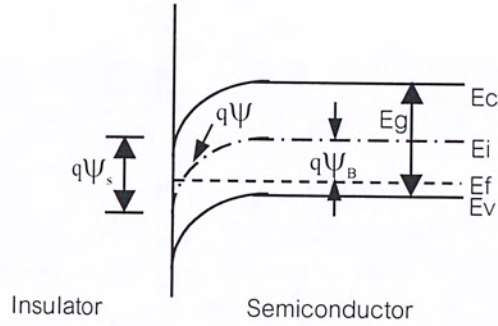
ถ้าไบอัสต่อไปจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำสูงกว่าค่าแพงศักย์ของสารกึ่งตัวนำ ($\psi_s > \psi_b$) ปริมาณประจุพาหะส่วนน้อยอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิวจะมีมากกว่าประจุพาหะส่วนมากโฮล กล่าวอีกนัยได้ว่าเป็นช่วงที่ระดับพลังงานอินทรินซิก (E_i) ข้ามผ่านระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_f) ลงมา

พิจารณาในรายละเอียด ของโครงสร้างสารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับชั้นฉนวนให้ศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ (ψ) มีค่าเป็นศูนย์ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำชนิดพีบริเวณส่วนสัมผัสกับชั้นโลหะ (ψ_s) ดังรูปที่ 2.21 จะให้ความหนาแน่นของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีค่า

$$n_p = n_{p0} \exp(q\psi / kT) = n_{p0} \exp(\beta\psi)$$

$$p_p = p_{p0} \exp(-q\psi / kT) = p_{p0} \exp(-\beta\psi)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แบบจำลองแถบพลังงานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำของไดโอดในช่วงกลับประจุพาหะ

- n_{po} คือ ความหนาแน่นประจุพาหะอิเล็กตรอนในเนื้อสารกึ่งตัวนำภาวะสมดุล
- p_{po} คือ ความหนาแน่นประจุพาหะโฮลในเนื้อสารกึ่งตัวนำภาวะสมดุล
- β มีค่าเท่ากับ q/kT

ในส่วนของค่าความหนาแน่นประจุพาหะที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำจะมีค่า

$$n_s = n_{po} \exp(\beta\psi_s) \tag{2.38}$$

$$p_s = p_{po} \exp(-\beta\psi_s) \tag{2.39}$$

สมการของ Poisson ศักย์ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำในส่วนของระยะทางได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \tag{2.40}$$

ซึ่ง

$$\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p_p - n_p) \tag{2.41}$$

$\rho(x)$ คือ ความหนาแน่นของ space charge ทั้งหมด

ϵ_s คือ permittivity ของสารกึ่งตัวนำ

N_D^+ คือ ความหนาแน่นของไอออนสารเจือผู้ให้

N_A^- คือ ความหนาแน่นของไอออนสารเจือผู้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาภายในเนื้อสารจะมีสภาพเป็นกลางของประจุไฟฟ้า นั่นคือ

$$\rho_{(x)} = 0, \quad \Psi = 0 \quad (2.42)$$

ดังนั้นสมการ Poisson

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[p_{po} (e^{-\beta\Psi} - 1) - n_{po} (e^{\beta\Psi} - 1) \right] \quad (2.43)$$

พิจารณาตั้งแต่เนื้อสารจนถึงพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ, อินทิกรัลสมการที่ 2.41, ให้ $E = -\frac{\partial\Psi}{\partial x}$

$$E^2 = \left(\frac{2kT}{q} \right)^2 \left(\frac{qp_{po}\beta}{2\epsilon_s} \right) \left[(e^{-\beta\Psi} + \beta\Psi - 1) + \frac{n_{po}}{p_{po}} (e^{\beta\Psi} - \beta\Psi - 1) \right] \quad (2.44)$$

ให้ L_D (extrinsic Debye length) ของโฮล มีค่า

$$L_D \equiv \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qp_{po}\beta}} \quad (2.45)$$

และ $F \left[\beta\Psi, \frac{n_{po}}{p_{po}} \right]$ มีค่า

$$F \left[\beta\Psi, \frac{n_{po}}{p_{po}} \right] \equiv \left[(e^{-\beta\Psi} + \beta\Psi - 1) + \frac{n_{po}}{p_{po}} (e^{\beta\Psi} - \beta\Psi - 1) \right]^{1/2} \geq 0 \quad (2.46)$$

ค่าสนามไฟฟ้า มีค่าดังสมการที่ 2.47 ซึ่งมีค่าเป็นบวกเมื่อ $\Psi > 0$ และเป็นลบเมื่อ $\Psi < 0$

$$E = -\frac{\partial\Psi}{\partial x} = \pm \frac{2kT}{qL_D} F \left[\beta\Psi, \frac{n_{po}}{p_{po}} \right] \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสนามไฟฟ้าที่พื้นผิว (E_s) มีค่าดังสมการที่ 2.48 ซึ่ง $\psi = \psi_s$

$$E_s = \pm \frac{2kT}{qL_D} F \left[\beta \psi_s \cdot \frac{n_{po}}{p_{po}} \right] \quad (2.48)$$

ค่า space charge จากกฎของเกาส์ ดังนี้

$$Q_s = \epsilon_s E_s = \pm \frac{2\epsilon_s kT}{qL_D} F \left[\beta \psi_s \cdot \frac{n_{po}}{p_{po}} \right] \quad (2.49)$$

จากสมการที่ 2.46 ถึงสมการที่ 2.48 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ space charge (Q_s) อยู่ในฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ (ψ_s) ซึ่งใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี $N_A = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ $T = 300 \text{ K}$ ดังหลักการพิจารณาในตัวอย่างดังนี้

1. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า $\psi_s = 0$ แล้วค่า $Q_s = 0$ ด้วย หรืออยู่ในช่วงระดับพลังงานแบนราบ
2. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า ψ_s เป็นลบแล้ว ค่าความหนาแน่นของ space charge จะเป็นบวก หรือ $Q_s \cong \exp(q|\psi_s|/2kT)$ ซึ่งสอดคล้องกันกับบริเวณสะสมประจุ (Accumulation region)
3. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า $0 < \psi_s < \psi_B$ แล้วค่า Q_s เป็นลบ หรือ $Q_s \approx \sqrt{\psi_s}$ นั่นคือกรณีช่วงปลอดประจุพาหะ
4. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า $\psi_s > \psi_B$ แล้วค่า Q_s เป็นลบ หรือ $Q_s \approx -\exp(q|\psi_s|/2kT)$ เป็นช่วงกรณีตัวนำกลับของประจุพาหะ จะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่ม ดังสมการที่ 50

$$\psi_{(inv)s} \cong 2\psi_B = \frac{2kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{N_i} \right) \quad (2.50)$$

ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณ space charge ในสารกึ่งตัวนำ

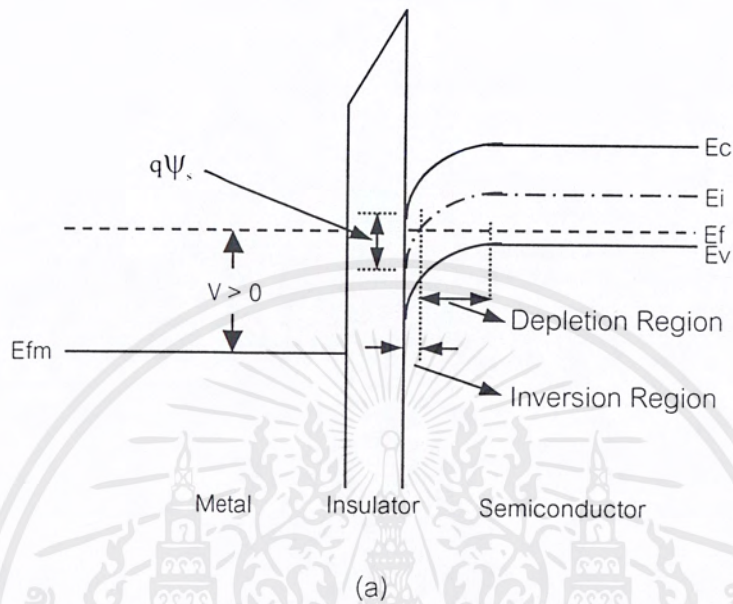
$$C_D = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2}L_D} \frac{\left[1 - e^{-\beta\psi_s} + \left(\frac{n_{po}}{p_{po}} \right) \left(e^{\beta\psi_s} - 1 \right) \right]}{F \left[\beta \psi_s \cdot \frac{n_{po}}{p_{po}} \right]} \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.51)$$

พิจารณาที่ระดับพลังงานแบนราบ ($\psi_s = 0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{D(\text{flat-band})} = \epsilon_s / L_D \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.52)$$

ต่อมาเป็นการพิจารณาโดยรวมทั้งโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ

ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมจะทำให้เกิดความต่างของฟังก์ชันงานเนื่องจากเกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมภายในโครงสร้างนี้ 2 ส่วน ได้แก่ ศักดาตกคร่อมชั้นฉนวน (V_i) และศักดาตกคร่อมที่พื้นผิวสัมผัสของชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ψ_s) ดังสมการที่ 2.53

$$V = V_i + \psi_s \quad (2.53)$$

โดย

$$V_i = \frac{Q_s d}{\epsilon_i} \quad (2.54)$$

ค่า Q_s ดังแสดงในการกระจายของประจุด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประจุกับระยะดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.22 โดยมีความหนาแน่นของประจุในระดับ ดังสมการที่ 2.55

$$Q_m = Q_n + qN_A W = Q_s \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Q_m คือ ความหนาแน่นประจุที่ชั้น โลหะ
- Q_n คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่บริเวณส่วนกลับประจุ
- $Q_{N_A} W$ คือ ความหนาแน่นของไอออนผู้รับในบริเวณ space charge ความกว้าง W
- Q_s คือ ความหนาแน่นของประจุที่รอยสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS และไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

การสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิกอน จากเป็นวัสดุที่มีอยู่แล้วในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่าง ๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทั้งยังเป็นฐานรองที่สามารถเกิดเพชรได้อย่างดีอีกด้วย ก่อนที่จะนำฐานรองไปใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรนั้น ต้องมีการเตรียมฐานรองก่อน

3.1 การทำความสะอาดผิวหน้าฐานรองซิลิกอนเริ่มต้น

- ความสะอาดด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water ; DI) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- กัดผิวด้วยกรดกัดแก้ว(HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที เพื่อซิลิกอนไดออกไซด์ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนออก
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ดั้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ดั้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ดั้มในไตรโครโรเอทิลีน(Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน(Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมพื้นผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าขนาดของผลึกเพชรที่เหมาะสมสำหรับนิวเคลียสจะมีค่าเท่ากับ 0.25 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงใช้ครีมเพชรขนาด 0.25 ไมโครเมตร ซึ่งจะขัดที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน โดยขัดด้วยมือ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดความหนาแน่นการนิวเคลียสที่สูงขึ้นจึงเลือกลักษณะการขัดจะขัดในลักษณะวนไปรอบ ๆ ทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา เพื่อให้เกิดรอยขีดเล็กๆสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าแผ่นซิลิกอน ใช้เวลาขัดประมาณ 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาดโดยทั่วไปทั้งฐานรองแล้วนำฐานรองไปล้างครีมเพชรออกโดย

- ต้มน้ำที่ขัดเสร็จแล้วในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิกในอะซิโตน 10 นาที
- อุลตราโซนิกในน้ำ DI 10 นาที
- เป่าแผ่นซิลิกอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูรอยขีดที่เกิดจากการขัด ลักษณะพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชรจะได้ดังรูปที่ 3.1

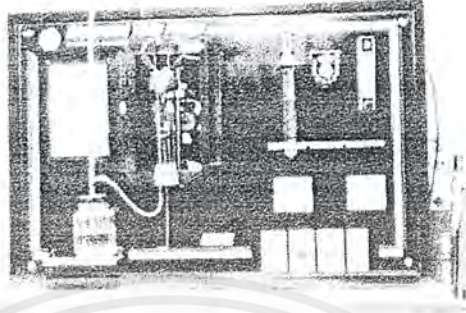


รูปที่ 3.1 รูปแสดงผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชร

ตัดฐานรองให้มีขนาด 3x3 mm แล้วนำไปล้างอีกครั้งด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลาประมาณ 2 นาที แล้วล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง

3.3 ชุดเครื่องมือในการสร้างฟิล์มเพชร

กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี และชนิดอินทรินซิก ในโครงการนี้ด้วยชุดเครื่องมือ ดังในรูปที่ 3.2 จะใช้ขบวนการ CVD แบบความร้อน



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี HF CVD ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

จากรูปชุดทดลองสร้างฟิล์มเพชรประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ต่อไปนี้คือ

1. ถังแก๊สไฮโดรเจน
2. เรคกูเลเตอร์ (ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของก๊าซไฮโดรเจน)
3. Flow meter (ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผ่านเข้าไปในแหล่งจ่าย)
4. แหล่งจ่าย (เอซิลแอลกอสอลด์)
5. Chamber ทำจากท่อควอตซ์ทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร
6. ขั้วจ่ายไฟกระแสตรง
7. นาฬิกาจับเวลา
8. สวิตช์พัลลมระบายความร้อน
9. สวิตช์ Power
10. ปุ่มปรับกระแส
11. DC-Voltmeter
12. DC-Ampmeter
13. แบตเตอรี่ 12 โวลท์ 3 ชุด
14. ขวดใส่น้ำสำหรับเช็ดก๊าซไฮโดรเจนที่ไหลออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร

ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน มีพารามิเตอร์หลายอย่างที่มีผลต่อคุณภาพของฟิล์มเพชร ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาเงื่อนไขการสร้างที่เหมาะสม อันได้แก่อุณหภูมิของฐานรองและลักษณะพื้นผิวของฐานรองต่างก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งอุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นได้ ส่วนลักษณะพื้นผิวฐานรองเป็นพารามิเตอร์ที่จะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิกอน โดยลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ได้จะมีความสำคัญมากต่อการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งาน

ในโครงการนี้จะใช้เงื่อนไขการสร้างฟิล์มเพชรได้ดังนี้

- ขนาดของฐานรองซิลิกอนที่ใช้ทำการทดลองมีค่า 3x3 mm.
- อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนมีค่า 10 ml/min.
- จ่ายกระแสประมาณ 7.65 แอมแปร์ และแรงดันประมาณ 20 โวลต์ ให้กับไส้หลอด
- อุณหภูมิไส้หลอดประมาณ 2000-2100 °C
- อุณหภูมิฐานรองประมาณ 960 °C
- ระยะห่างระหว่างฐานรองกับไส้หลอดประมาณ 1-2 mm.
- ระยะเวลาในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี 1 ชั่วโมง และระยะเวลาในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก 10, 20, 30, 40 นาที ตามลำดับ
- ใช้แหล่งจ่าย (Source) 2 ชนิดด้วยกันคือ เททริลแอลกอฮอล์ เพื่อสร้างเป็นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก (i) และสารละลายโบรอน ไตรออกไซด์ (B_2O_3) ในแอทมิแอลกอฮอล์ เพื่อสร้างเป็นฟิล์มเพชรชนิดพี (p) ตามลำดับ ก๊าซไฮโดรเจนจะทำหน้าที่เป็นตัวพาไอระเหยจากแหล่งจ่ายไปยังบริเวณที่สร้างฟิล์ม (Chamber) ซึ่งมีอัตราการไหลของก๊าซคงที่ตลอดเวลา จากนั้นก๊าซจะถูกปล่อยออกสู่อากาศที่ความดันปกติโดยผ่านน้ำเพื่อเช็ดการไหลของก๊าซ
- ในการเคลือบอิมูนิเนียม เราจะทำหน้าสัมผัสเป็นลักษณะวงกลมซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.75 mm.
- ในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี มีอัตราส่วน B:C ด้วยกัน 3 ค่า อันได้แก่ 10ppm, 100ppm และ 1000ppm
- ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการวัดและตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

ซึ่งกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรสามารถพิจารณา โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบวาล์ว 1 ให้อยู่ตำแหน่งเปิดออก และปั๊มปรับกระแสให้อยู่ตำแหน่งซ้ายสุด
2. เปิดถังก๊าซไฮโดรเจนปรับเรกกูเลเตอร์ที่ถังก๊าซเพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนให้มีค่า 200 ml/min จับเวลา 15 นาที
3. ปรับวาล์ว 1 เพื่อแบ่งก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนไหลผ่าน Flow meter พร้อมกับปรับวาล์ว 2 ของ Flow meter ให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 10 ml/min
4. ปรับวาล์ว 1 ให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเหลือ 70 ml/min พร้อมทั้งปรับวาล์ว 2 เพื่อให้ได้อัตราการไหลของก๊าซที่ผ่าน Flow meter เป็น 10 ml/min คงที่ จับเวลาอีก 15 นาที
5. เปิดวาล์ว 3 เพื่อตรวจสอบระบบว่าเป็นก๊าซไฮโดรเจน โดยจุดไฟเผาก๊าซในหลอด จากนั้นปิดวาล์ว 3 ตามลำดับ
6. เปิดสวิตช์ Power และเปิดสวิตช์พัลลคมระบายนความร้อน
7. ค่อยๆเพิ่มการจ่ายกระแสอย่างช้าๆ โดยการหมุนปั๊มปรับกระแสไปทางขวา ขณะนี้กระแสไฟจะถูกจ่ายให้กับไส้หลอดทั้งสแตน ทำการจ่ายกระแสไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้อุณหภูมิที่ไส้หลอดตามต้องการ (ประมาณ $2,000^{\circ}\text{C}$)
8. ปรับระยะห่างระหว่างไส้หลอดทั้งสแตนกับฐานรองซิลิกอนให้ได้ระยะที่เหมาะสม
9. สร้างฟิล์มเพชรชนิดพี และชนิดอินทรีนซิก ตามเวลาที่ต้องการ
10. เมื่อครบเวลาสร้างฟิล์มเพชรที่กำหนดแล้วค่อยๆลดการจ่ายกระแส โดยปรับปั๊มจ่ายกระแสไปทางซ้ายมืออย่างช้าๆ พร้อมทั้งปิดถังก๊าซไฮโดรเจน ปิดสวิตช์ Power
11. รอจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนที่ค้างอยู่ในระบบไหลออกหมด โดยสังเกตจากฟองน้ำในขวดรูปชมพู่
12. ปิดวาล์ว 2 รอจนกระทั่งระบบเย็น ปิดสวิตช์พัลลคมเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร นำฟิล์มไปตรวจสอบต่อไป

3.5 กระบวนการกำจัดชั้นฐานรองซิลิกอน

ขั้นตอนการกำจัดฐานรองซิลิกอนออกให้หมดก่อนจะนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปทำการเคลือบชั้นโลหะ ก็เพื่อลดผลของรอยต่อระหว่างฐานรองซิลิกอนกับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้วิธีการกัด (etching) ด้วยสารละลาย โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วทำการล้างสารละลาย KOH ออกโดยการต้มในน้ำ DI จากนั้นจึงลอกชั้นออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ด้วยสารละลาย HF 5% ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.6 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชรของไดโอด

ในโครงการนี้ได้สร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร ดังนี้

ไดโอดโครงสร้าง MIS มีการสร้างรอยสัมผัส 2 แบบ ได้แก่

รอยสัมผัสแบบ โอห์มิก โดยใช้โลหะทองคำเป็นขั้วสัมผัสบนฟิล์มเพชรชนิดพี

รอยสัมผัสแบบชอตต์กี โดยใช้โลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วสัมผัสบนฟิล์มเพชรชนิดพี

ไดโอดโครงสร้าง MIS มีการสร้างรอยสัมผัส ดังนี้

รอยสัมผัสแบบชอตต์กีโดยใช้โลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วสัมผัสบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

3.6.1 การสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิก ของไดโอดโครงสร้าง MS

ขั้นตอนนี้ใช้โลหะทองคำสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิกบนฟิล์มเพชรชนิดพี ก็เพื่อทำการตรวจสอบหาค่าความหนาแน่นของโฮลที่ทำการเติมสารเจือขณะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยรอยสัมผัสของทองคำนี้มีลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร 2 ขั้ว ห่างกันด้วยระยะ 1 มิลลิเมตร ดังขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิกอนชนิดพี หนา(100)มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.4 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับ โบรอน ไตรออกไซด์ โดยในที่นี้ใช้อัตราส่วน B:C เป็น 10 ppm, 100 ppm, และ 1000 ppm ซึ่งวิธีการคำนวณหาค่า B:C ในภาคผนวก ก
- ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman spectroscopy, SEM และ X-ray Diffraction ดังแสดงในภาคผนวก ข
- ถ้าคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เหมาะสม จึงทำการเคลือบโลหะทองคำเพื่อทำขั้วสัมผัสรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร 2 ขั้ว ห่างกันด้วยระยะ 1 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator ดังแสดงในภาคผนวก ง-1

แผนภาพอธิบายขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสแบบ โห้มีคของ ไดโอด โครงสร้าง MS ดังแสดงด้วยแผนภาพรูปที่ 3.3



ทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิกอนระนาบ (100)



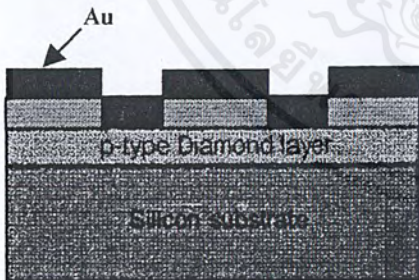
ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 ไมครอน แล้วตัดฐานรองซิลิกอนให้มีขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร



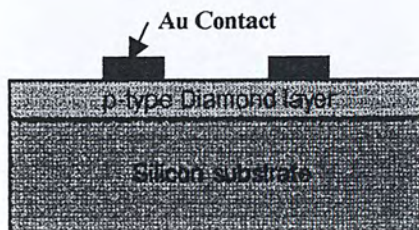
ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี



ทำการเตรียมหน้ากาก (Au Mask) ก่อนการเคลือบโลหะทองคำเพื่อสร้างขั้วสัมผัสวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร ห่างกัน 1 มิลลิเมตร



ทำการเคลือบทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator



ทำการลอกหน้ากากออก

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนขบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

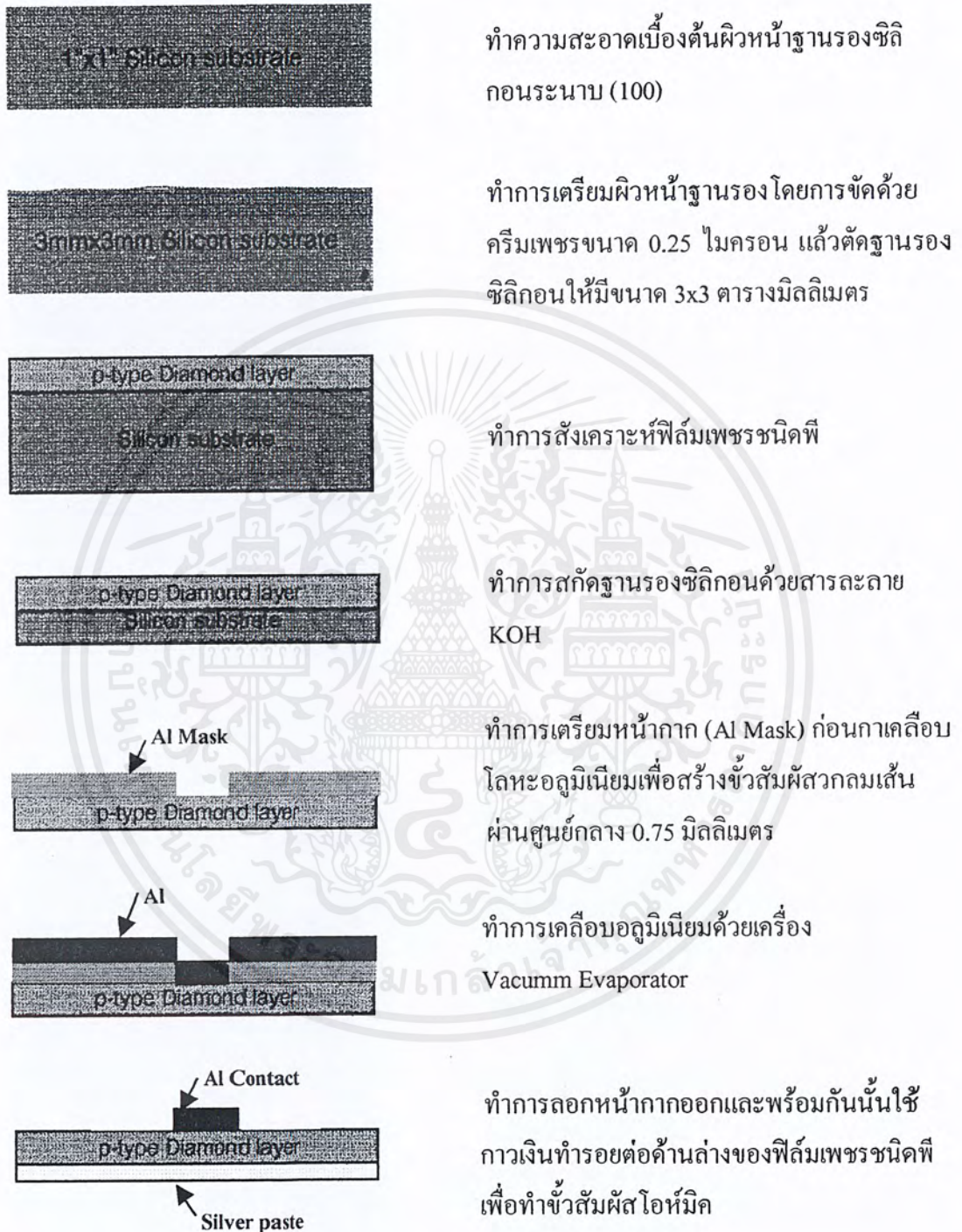
รอยสัมผัสที่สร้างเสร็จแล้วจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดที่
ด้วยเครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A ดังแสดงรูปเครื่องมือวัดในภาคผนวก ง-2

3.6.2 การสร้างรอยสัมผัสแบบขอตัดกีของไดโอดโครงสร้าง MS

ขั้นตอนนี้ใช้โลหะอลูมิเนียมสร้างรอยสัมผัสแบบขอตัดกีบนฟิล์มเพชรชนิดที่เพื่อเป็น
แนวทางในการพิจารณาและเปรียบเทียบ ตลอดจนเสีย ข้อบกพร่องต่างๆของไดโอดโครงสร้าง MS นี้
โดยพัฒนาไปเป็นไดโอดโครงสร้าง MIS ซึ่งรอยสัมผัสแบบขอตัดกีของอลูมิเนียมนี้มีลักษณะเป็น
วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร ดังขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิกอนชนิดที่ ระบาย(100)มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดที่ ด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.4 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสาร
ละลายผสมของแอลกอฮอล์กับ โบรอนไตรออกไซด์ โดยในที่นี้ใช้อัตราส่วน B:C เป็น
10 ppm, 100 ppm และ 1000 ppm
- กำจัดเขม่าคาร์บอนหรือพวกกราไฟต์ด้วยการต้มด้วยสารละลายของ $H_2SO_4 + CrO_4$
แล้วล้างออกด้วยการต้มในสารละลายกรด $HCl + HNO_3$ ต้มในน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วย
ก๊าซ N_2
- ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman spectroscopy , X-ray Diffraction
และ SEM ดังแสดงในภาคผนวก ค
- ถ้าคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เหมาะสม จึงทำการกำจัดฐานรองซิลิกอนออก
ตามหัวข้อที่ 3.5
- ทำการเคลือบอลูมิเนียมเพื่อทำขั้วสัมผัสแบบขอตัดกี มีลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง
0.75 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator ดังแสดงในภาคผนวก ง-1
- ทำการสร้างรอยสัมผัส โอห์มิกด้วยกาวเงิน บริเวณด้านหลังของฟิล์มเพชรชนิดที่

แผนภาพอธิบายขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสแบบขอตัดกึ่งของไดโอดโครงสร้าง MS ดังแสดงแผนภาพรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสแบบขอตัดกึ่งของไดโอดโครงสร้าง MS

รอยสัมผัสที่สร้างเสร็จจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัด Hewlett

Packard 4061A ดังแสดงในรูปเครื่องมือวัดในภาคผนวก ง-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 การสร้างรอยสัมผัสแบบขดตึกิ ของไดโอดโครงสร้าง MIS

3.6.3.1 การศึกษาผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

ขั้นตอนนี้ใช้โลหะอลูมิเนียม สร้างรอยสัมผัสแบบขดตึกิบนฟิล์มเพชรชนิดพี ก็เพื่อทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด โครงสร้าง MIS โดยรอยสัมผัสของอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร ดังขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิกอนชนิดพี ระบาย(100)มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.4 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์ โดยในที่นี้ใช้อัตราส่วน B:C 10 ppm, 100 ppm และ 1000 ppm
- สร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกทับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ตามวิธีหัวข้อที่ 3.4 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นแอลกอฮอล์ โดยแปรความหนาของชั้นอินทรีนซิกตามตารางที่ 3.1 และจะได้ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่ใช้ในการทดลอง

อัตราส่วน B:C (ppm)	ความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก (นาทึ)			
10	10	20	30	40
100	10	20	30	40
1000	10	20	30	40

- กำจัดเขม่าคาร์บอนหรือพวกกราไฟต์ด้วยการต้มด้วยสารละลายของ $H_2SO_4 + CrO_4$ ล้างออกด้วยการต้มในสารละลายกรด $HCl + HNO_3$ ต้มในน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman spectroscopy , X-ray Diffraction และ SEM พร้อมทั้งตรวจสอบความหนาของฟิล์มเพชรอินทรีนซิก ที่สร้างได้เมื่อใช้เวลาใน การสังเคราะห์นาน 10 นาทึ, 20 นาทึ, 30 นาทึ และ 40 นาทึ ตามลำดับ
- ถ้าคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เหมาะสม จึงทำการกำจัดฐานรองซิลิกอนออกตามหัวข้อที่ 3.5
- ทำการเคลือบอลูมิเนียมเพื่อทำขั้วสัมผัสแบบขดตึกิที่มีลักษณะเป็น วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator ดังแสดงในภาคผนวก ง-1
- ทำการสร้างรอยสัมผัสโอมิกด้วยกาวเงิน บริเวณด้านหลังของฟิล์มเพชรชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

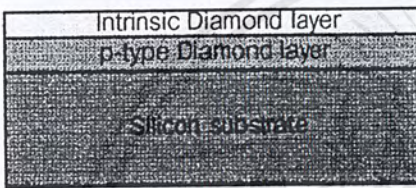
แผนภาพอธิบายขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสแบบขอตัดกีของไดโอดโครงสร้าง MIS ดังแสดงแผนภาพรูปที่ 3.5



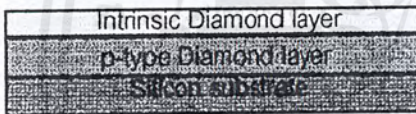
ฐานรองซิลิกอน หนาขนาด (100) ผ่านการทำทำความสะอาดเบื้องต้น



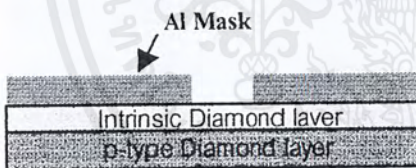
ทำการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยการขัดด้วยครีมเพชรขนาดเม็ดผลึก 0.25 ไมครอน แล้วตัดให้มีขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร



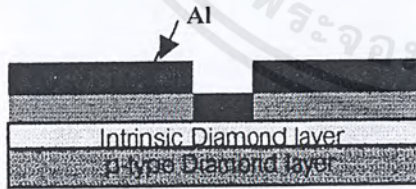
ตั้งเครื่องพีลล์เพชรชนิดพี โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นสารละลาย $C_2H_5OH + B_2O_3$ แล้วตั้งเครื่องพีลล์เพชรชนิดอินทรีนซิก โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นสารละลาย C_2H_5OH



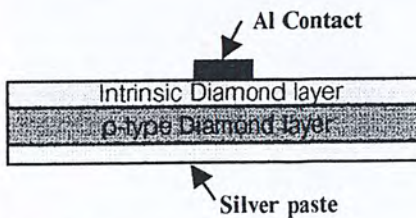
กำจัดฐานรองซิลิกอน โดยการกัดด้วยสารละลาย KOH



ทำการเตรียมหน้าปกก่อนการเคลือบโลหะอลูมิเนียมเพื่อทำขั้วสัมผัสวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร



เคลือบ โลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator



ลอกหน้าปกออกและทากาวเงินบริเวณด้านหลังของฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อทำขั้วสัมผัสโอห์มิก

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสแบบขอตัดกีของไดโอดโครงสร้าง MIS

รอยสัมผัสที่สร้างเสร็จจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3.2 การศึกษาผลของอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอน (B:C) ของฟิล์มเพชรชนิดพี

ในโครงการนี้เป็นการพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด โครงสร้าง MIS เมื่อมีค่าอัตราส่วน B:C ของไดโอดต่างๆกันดังตารางที่ 3.2 มีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

- ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของหัวข้อที่ 3.6.3.1
- ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี ตามหัวข้อที่ 3.4
- สร้างชั้นฟิล์มชนิดอินทรินซิกทับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีตามหัวข้อที่ 3.4 โดยมีแหล่งจ่าย เป็นแอลกอฮอล์ ในที่นี้ใช้ความหนาคงที่เป็น 10 นาที่, 20 นาที่, 30 นาที่ และ 40 นาที่
- เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 5-8 ของหัวข้อที่ 3.6.3.1

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขอัตราส่วน B:C ของไดโอดโครงสร้าง MIS

ระยะเวลาที่ใช้สร้างชั้นอินทรินซิก (นาที่)	อัตราส่วน B:C (ppm)		
10	10	100	1000
20	10	100	1000
30	10	100	1000
40	10	100	1000

แผนภาพอธิบายขั้นตอนการสร้างเช่นเดียวกับรูปที่ 3.5 โดยไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างเสร็จตามเงื่อนไขแล้วจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

3.6.3.3 การศึกษาค่าของอุณหภูมิที่มีผลต่อการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS

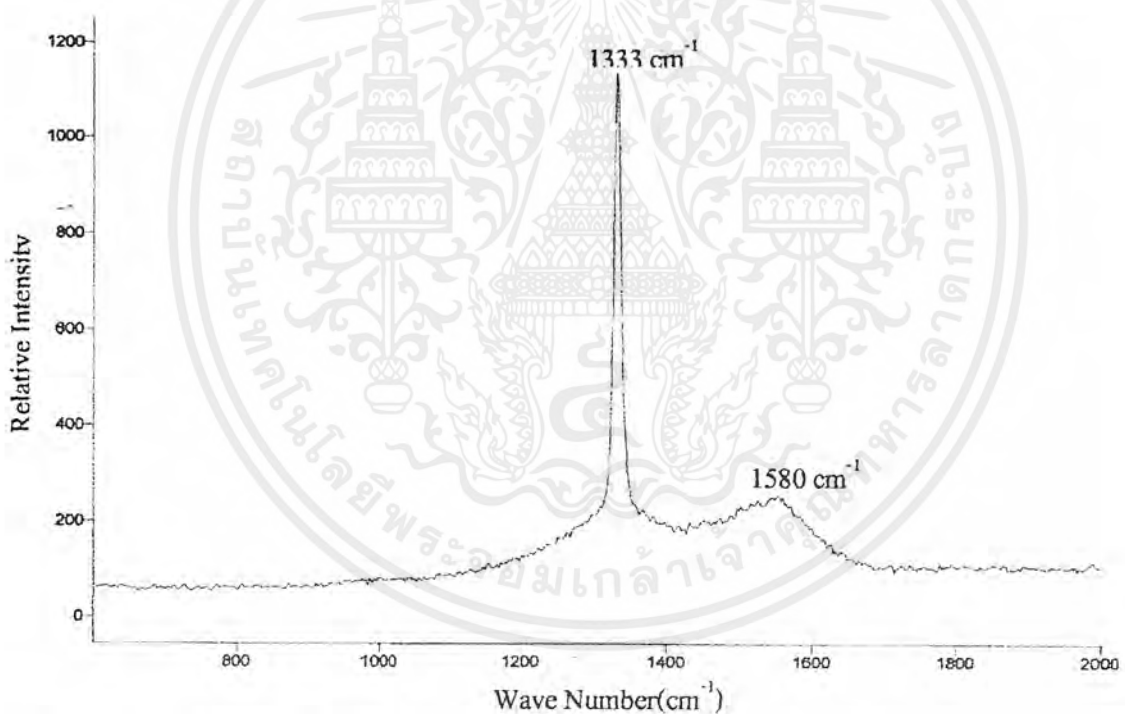
ในโครงการนี้เป็นการพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด โครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชรเพียงโครงสร้างเดียวเท่านั้น เมื่อไดโอดทำงานในอุณหภูมิ สูงๆ ในโครงการนี้ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 300 K, 400 K, 500 K โดยการเลือกใช้อัตราส่วน B:C 1000 ppm และความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกที่สร้างในเวลา 40 นาที่ (หนาประมาณ 4 ไมครอน) เป็นเงื่อนไขคงที่ โดยมีขั้นตอนการสร้างเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.6.3.1 แล้วนำไดโอดที่สร้างเสร็จแล้วไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้น

ฟิล์มเพชรในโครงการนี้จะถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยอุณหภูมิฐานรองประมาณ 960°C ใช้เวลาในการสร้างนาน 60 นาที ซึ่งเท่ากับ ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ก่อนจะถูกนำไปสร้างเป็นไดโอด โครงสร้างต่าง ๆ นั้นจะถูกนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค 3 อย่างด้วยกัน ดังนี้



รูปที่ 4.1 ลักษณะ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้

วิเคราะห์ด้วยเทคนิค **Raman spectroscopy** เพื่อตรวจสอบคุณภาพของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเครื่อง Raman spectroscopy ดังภาคผนวก ก-2 ได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.1

จะเห็นว่า Raman spectrum ที่ได้มียอดคลื่นอยู่ 2 ตำแหน่งคือ 1333 cm^{-1} และ 1580 cm^{-1} โดยตำแหน่งของยอดคลื่นที่ 1333 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมชาติ ส่วนตำแหน่งที่ยอดคลื่น 1580 cm^{-1} บอกให้ทราบว่าฟิล์มเพชรที่ได้จะมีปริมาณกราฟไฟต์ปะปนอยู่เพียงเล็กน้อย ซึ่งค่าตำแหน่งยอดคลื่นสามารถดูได้จากตารางที่ 1.1 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy นี้ จะเห็นว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติเป็นเพชรมีคุณภาพดี ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณกราฟไฟต์ปะปนอยู่เพียงเล็กน้อยก็ตามนั้นก็เพราะฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD จะพบการปะปนของ Microcrystalline graphite, Amorphous Carbon, Graphite อยู่เป็นปกติ

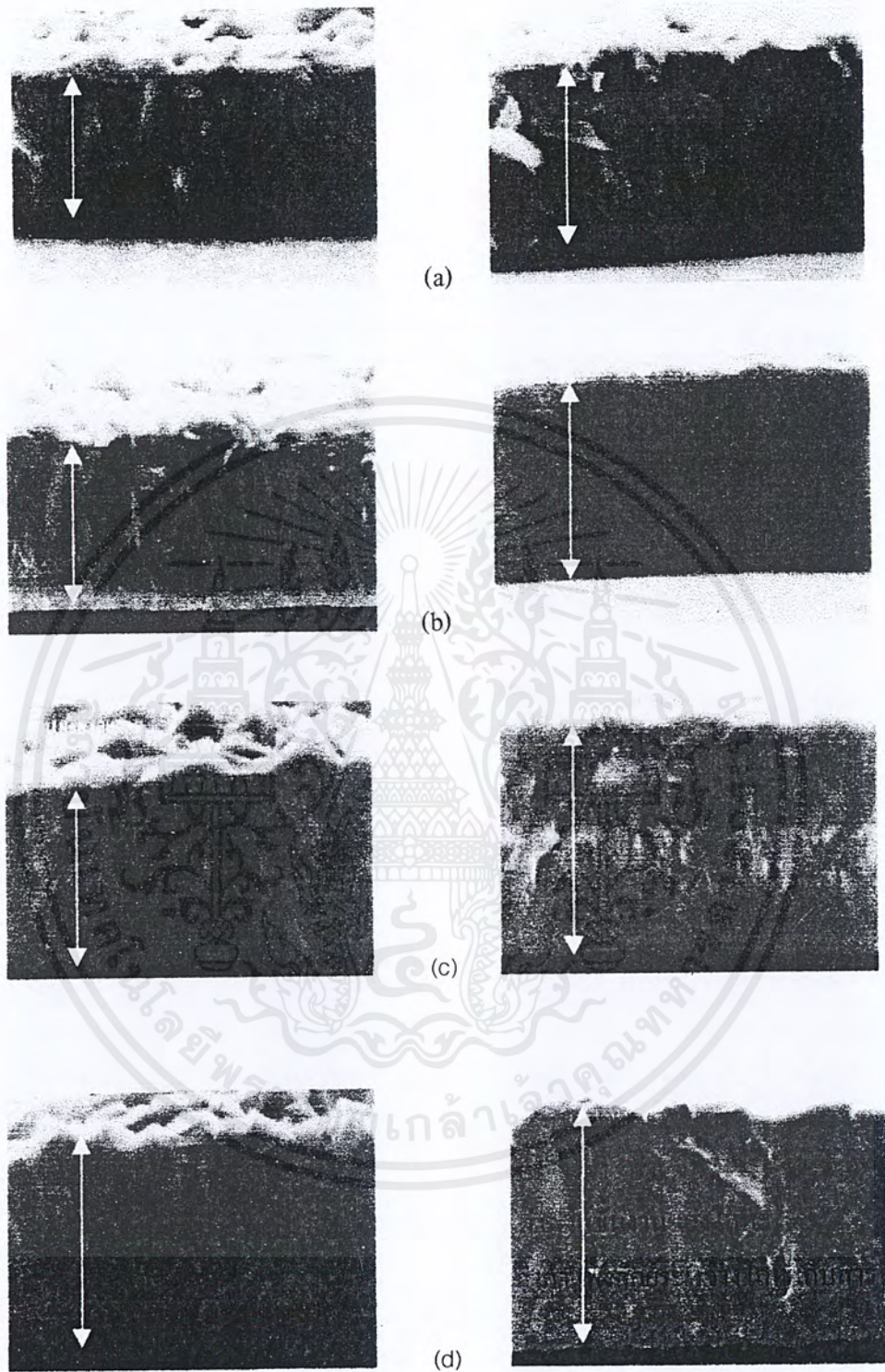
วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy เพื่อดูรูปร่างลักษณะของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ดังภาคผนวก ก-1 นั่นคือ ฟิล์มเพชรชนิดพีและชนิดอินทรีนซิก ฟิล์มเพชรทั้ง 2 จะมีรูปร่างลักษณะและระนาบผลึก ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีระนาบผลึกเช่นเดียวกันกับรูปที่ 1.3(a)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของผลที่เกิดจากการสร้างฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ $960\text{ }^{\circ}\text{C}$

- (a) ฟิล์มเพชรชนิดพี
- (b) ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

นอกจากจะดูรูปร่างแล้วยังใช้ดูความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพี และอินทรีนซิก ได้อีกด้วย ที่การสร้างชั้นอินทรีนซิกด้วยเวลา 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที และ 40 นาที จะได้ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ดังรูปที่ 4.3



ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพี

ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีชนิดซี

รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM แสดงผลความหนาโดยประมาณของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีชนิดที่สร้างทับฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยระยะเวลาต่างๆ กัน

(a) 10 นาทีได้ ≈ 1 ไมครอน

(b) 20 นาทีได้ ≈ 2 ไมครอน

(c) 30 นาทีได้ ≈ 3 ไมครอน

(d) 40 นาทีได้ ≈ 4 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) ด้วยเครื่อง Single Crystal X-ray Diffractometer ดังภาคผนวก ก-3 เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ มีคุณสมบัติเป็นผลึกระนาบใด จะได้ผลแสดงดังกราฟรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรระนาบ {111}

จากกราฟ พบยอดกราฟแรกที่ตำแหน่ง มุม 44° ซึ่งเป็นค่าการเลี้ยวเบนลำดับแรก ($n=1$) แหล่งจ่ายรังสีที่ใช้เป็น $Cu(K\alpha)$ มีความยาวคลื่น 1.5418 \AA นำค่าที่ได้แทนสมการ Bragg's law หรือสมการที่ 1.3

$$\text{ยอดกราฟที่ตำแหน่ง } 2\theta = 44^\circ, \theta = 22^\circ$$

จากสมการที่ 1.3

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

$$2d \sin 22^\circ = (1)1.5418 \text{ \AA}$$

$$d = \frac{1.5418}{2 \sin 22^\circ} = 2.059 \text{ \AA}$$

ในทำนองเดียวกัน และจากกราฟรูปที่ 4.4 ยอดกราฟที่ตำแหน่ง 75.2°

$$\text{ยอดกราฟที่ตำแหน่ง } 2\theta = 75.2^\circ, \theta = 37.6^\circ$$

จากสมการที่ 1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

$$2d \sin 37.6^\circ = (1)1.5418 \text{ \AA}$$

$$d = \frac{1.5418}{2 \sin 37.6^\circ} = 1.263 \text{ \AA}$$

นำค่าที่คำนวณได้เทียบกับค่ามาตรฐาน ASTM (6-675) ดังในภาคผนวก ข-2 ซึ่งเทียบค่า d (interplanar spacing) พบว่าค่า $d \approx 1.263 \text{ \AA}$ มี Miller indices (hkl) เป็น (220) เป็นที่สังเกตว่า ระนาบการเลี้ยวเบนจะเป็นจำนวนคู่หรือคี่ทั้งหมด เนื่องจากโครงสร้างของฟิล์มเพชรมีลักษณะ สมดุลย์เป็นผลึกแบบ Cubic ซึ่งจากกราฟรูปที่ 4.4 นี้จะไม่พบยอดของกราฟที่เป็นของซิลิกอน จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคทั้ง 3 อย่าง สามารถทำให้ยืนยันได้ว่าฟิล์มเพชรที่เราสังเคราะห์ขึ้นมาได้มี คุณสมบัติเหมาะสมที่จะถูกนำไปใช้สร้างเป็นไดโอดแต่ละโครงสร้างในต่อไป

4.2 ผลการตรวจวัดไดโอดโครงสร้าง MS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

4.2.1 ผลของคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ขึ้น

ในส่วนนี้เป็นการตรวจสอบฟิล์มเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยอัตรา B:C ที่ต่างกันดังนี้ 10ppm , 100 ppm และ 1000 ppm ซึ่งฟิล์มเพชรชนิดพีแต่ละค่าอัตรา B:C จะถูกสร้างขั้วสัมผัสโหนดขึ้น โดยโลหะทองคำ 2 ขั้ว แต่ละขั้วมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร ห่างกันด้วยระยะ 1 มิลลิเมตร ฟิล์มเพชรชนิดพีสร้างด้วยเวลานาน 60 นาที มีความหนาของฟิล์มเพชรประมาณ 10 μm ชิ้นงานจะถูกตรวจวัดด้วยวิธี Seeback effect ในสภาวะอุณหภูมิห้อง ($T = 300 \text{ K}$) เมื่อจ่ายแรงดันไบอัสแก่ขั้วโลหะทองคำแล้วจะได้คุณสมบัติตามกราฟรูปที่ 4.5

จากกราฟรูปที่ 4.5 ข้างล่างจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานจะลดลงเรื่อยๆเมื่ออัตรา B:C มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานจากกราฟสามารถนำไปคำนวณหาค่าพื้นฐานต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.1

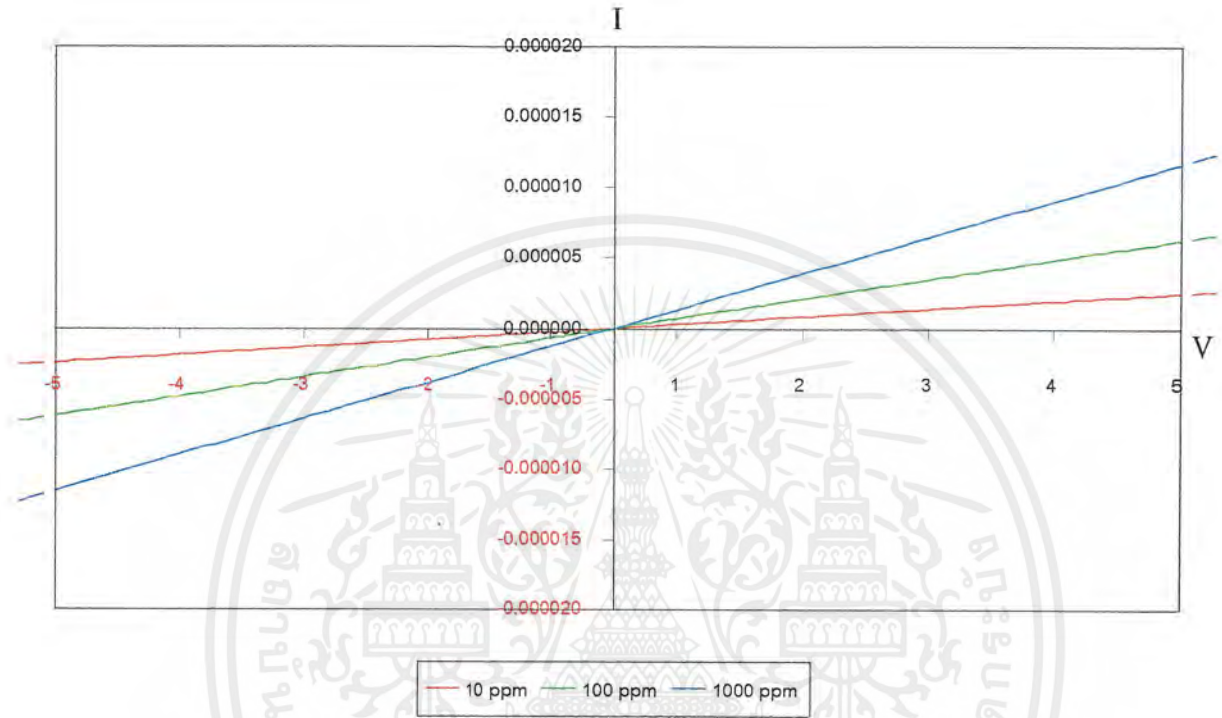
$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.1)$$

$$p = \frac{1}{q\mu_p\rho} = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \quad (4.2)$$

$$\text{โดยที่} \quad N_V = 2 \left(\frac{2\pi kT m_p^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ
$$N_A = p \cdot \left[1 + \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right) \right] \tag{4.4}$$



รูปที่ 4.5 ผลของกระแส-แรงดันของฟิล์มเพชรชนิดที่ ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ
 (a) 10ppm (—) (b) 100ppm (—) (c) 1000ppm (—)

ตารางที่ 4.1 ค่าพื้นฐานต่างๆ ของฟิล์มเพชรชนิดที่

B:C (ppm)	10	100	1000
ค่าต่างๆ			
R (Ω)	1.851×10^6	7.246×10^6	3.891×10^5
ρ (Ω.cm)	218.148	85.360	45.836
p (cm ⁻³)	5.73×10^{15}	1.464×10^{16}	2.727×10^{16}
E _F -E _V (eV)	0.186	0.163	0.141
N _A (cm ⁻³)	3×10^{18}	1.8×10^{19}	9.9×10^{19}

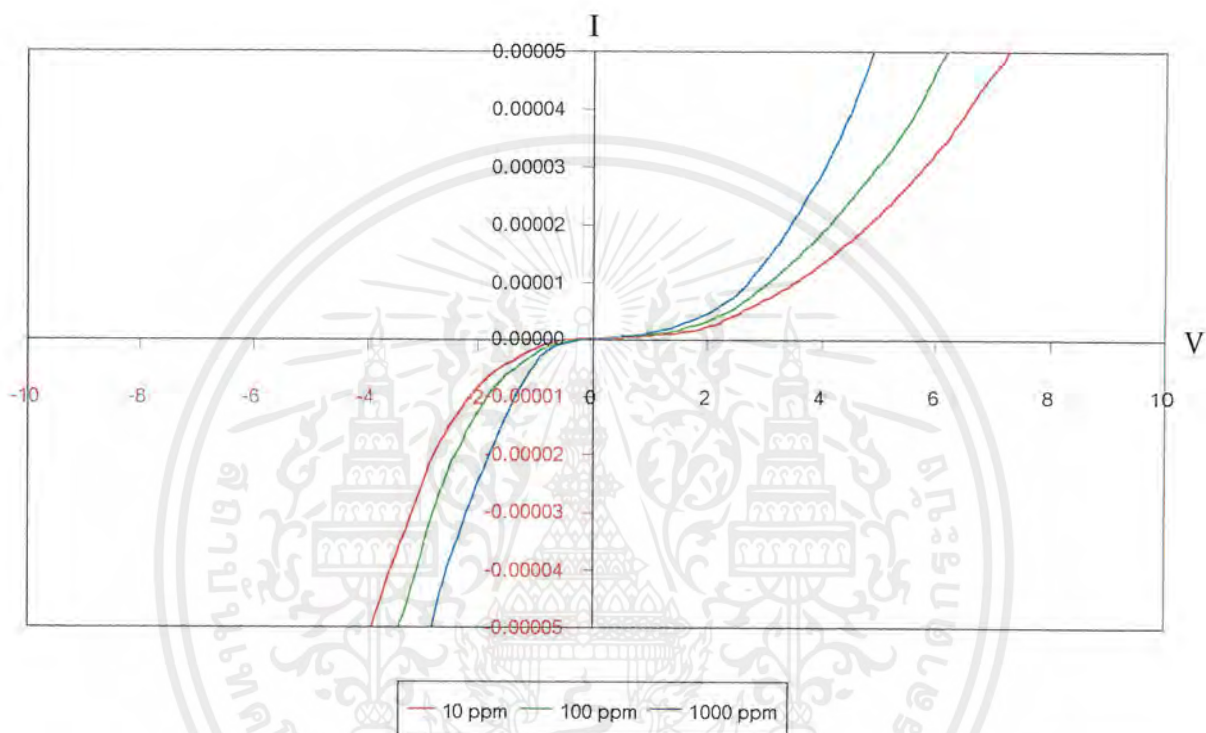
$\mu_n = \mu_p = \mu$ ของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิด Polycrystalline[6]

$m_h^* = m_p^* = m_{เพชร}^*$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

ในส่วนนี้เป็นการตรวจสอบรอยสัมผัสโลหะอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อเป็นการยืนยันว่ารอยสัมผัสนี้เป็นรอยสัมผัสชนิดขอดี ไดโอดโครงสร้าง MS นี้จะถูกสร้างขึ้นภายใต้เงื่อนไขของค่าอัตราส่วน B:C ดังนี้ 10 ppm, 100 ppm และ 1000 ppm โดยนำไปทำการวัดหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในสภาวะอุณหภูมิห้อง ($T = 300 \text{ K}$) ได้ดังกราฟรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน ของไดโอดโครงสร้าง MS ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ

(a) 10ppm (—) (b) 100ppm (—) (c) 1000ppm (—)

จากกราฟรูปที่ 4.6 จะพิจารณาจากความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยสมการไดโอดในบทที่ 2 สมการที่ 2.25 ให้ $I=I_s$, $I_s=I_0$ จะได้

$$I = I_s \left(e^{qV_A / kT} - 1 \right) \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 ถ้าพิจารณาการให้ไบอัสตรงแก่ไดโอด (V_A เป็น+) จะได้

$$I = I_s \left(e^{qV_A / kT} \right) \quad (4.6)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln(I) = \ln(I_S) + \frac{qV_A}{kT} \quad (4.7)$$

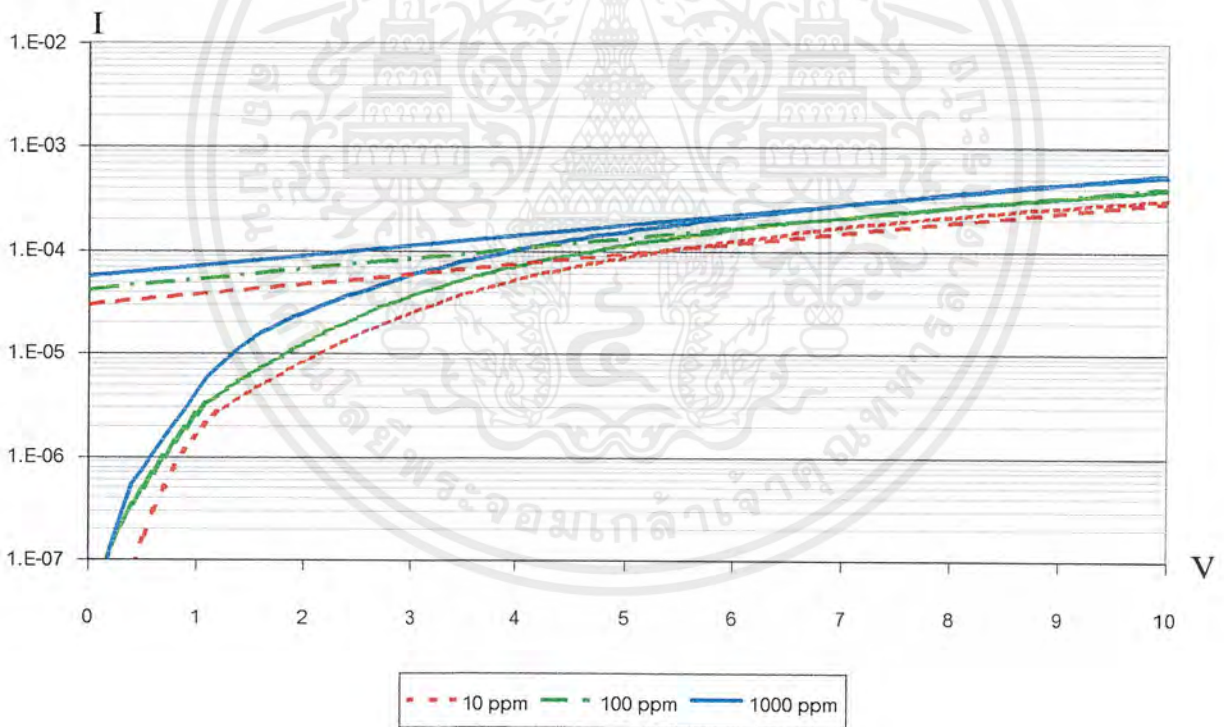
จากสมการที่ 4.7 จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับแรงดัน V_A จะได้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง

ในกรณีสมดุลความร้อน $V_A=0$ จะได้

$$\ln(I) = \ln(I_S) \quad (4.8)$$

ซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนนี้ ค่า $I=I_S$

จากสมการที่ 4.7 ทำการพล็อตกราฟ Semi-Log แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับ V_A เพื่อหาค่า I_S โดยพิจารณาช่วงการให้ไบอัสตรงแก่ไดโอดโครงสร้าง MS ทั้งนี้เราจะนำค่า I_S ไปคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้



รูปที่ 4.7 การหาค่ากระแสอิ่มตัวของขอตัก์ไดโอด โครงสร้าง MIS ด้วยอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ

(a) 10ppm (---) (b) 100ppm (---) (c) 1000ppm (—)

จากบทที่ 2 เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.24.b.1 ถึงสมการที่ 2.24.b.5 จะสามารถหาค่าความสูง

กำแพงศักย์ได้จากค่ากระแสอิ่มตัว (I_S) ดังในสมการที่ 4.9 ถึง สมการที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_0 = \frac{4\pi q m_p^* k^2}{3h} T^2 e^{-q\phi_B / kT} \quad (4.9)$$

ค่าคงที่ Richardson $A^* = \frac{4\pi q m_p^* k^2}{h^3} \quad (4.10)$

โดย $J_0 = \frac{I_S}{A} \quad (4.11)$

ดังนั้นกระแสอิ่มตัว (I_S) จะเท่ากับ

$$I_S = AA^* T^2 e^{-q\phi_B / kT} \quad (4.12)$$

สามารถหาความสูงของกำแพงศักย์ได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.12

$$q\phi_B = kT \ln \left(\frac{AA^* T^2}{I_S} \right) \quad (4.13)$$

ซึ่ง $A = \pi r^2 \quad (4.14)$

โดยในที่นี้จะพิจารณารอยสัมผัสนี้ในอุณหภูมิห้อง ($T=300$ K) ขณะที่รอยสัมผัสได้รับแรงดันไบอัสเป็นศูนย์ ($V=0$) ซึ่ง $m_p^* = 3.64 \times 10^{-31}$ kg [6] และค่า work function ของ Al เท่ากับ 4.25[14] เส้นผ่านศูนย์กลางขั้วสัมผัสเท่ากับ 0.75 mm

สำหรับฟิล์มเพชรชนิดพีมีอัตราส่วน B : C 10 ppm จะได้ว่า

$$\text{ค่า } A^* \text{ จากสมการที่ 4.6} \quad A^* = 4.798 \times 10^5 \text{ A/m}^2 - k^2$$

$$\text{ค่า } A \text{ จากสมการที่ 4.10} \quad A = 4.42 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\text{ค่า } I_S \text{ จากกราฟรูปที่ 4.7} \quad I_S = 30 \mu\text{A}$$

$$\text{ค่า } \phi_B \text{ เมื่อแทนค่า } A, A^*, I_S \text{ ในสมการ 4.9 ได้} \quad \phi_B = 0.525 \text{ V}$$

เมื่อพิจารณาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสชนิดพีที่มีอัตราส่วน B:C 100 ppm และ 1000 ppm ตามลำดับจะได้ค่าดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสอิมิตัวและความสูงกำแพงศักย์รอยสัมผัสเมื่อมีค่าความเข้มข้น โบรอนต่าง ๆ

อัตราส่วน B : C (ppm)	ค่ากระแสอิมิตัว : I_s (μA)	ความสูงกำแพงศักย์ : ϕ_B (V)
10	30	0.525
100	40	0.517
1000	52	0.510

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_B) ที่คำนวณได้ในจากตารางด้วยอัตรา B:C ต่างๆ จากการประมาณค่ากระแสอิมิตัวดังในรูปกราฟที่ 4.7 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการทดลองจริงมากดังค่าในรูปกราฟที่ 4.6 นั่นคือรอยสัมผัสขอตักที่สร้างขึ้น ได้มีคุณสมบัติเรกติไฟต์จริง ซึ่งขอตักไดโอดโครงสร้าง MS นี้เมื่อพิจารณาปริมาณการไหลของกระแสช่วงการไบอัสตรงเทียบกับไบอัสกลับแล้วจะเห็นว่าช่วงไบอัสกลับมีปริมาณการไหลของกระแสใกล้เคียงกัน นั่นก็แสดงให้เห็นว่าขอตักไดโอดโครงสร้าง MS นี้ มีอัตราการกรองกระแสต่ำ มีกระแสรั่วไหลย้อนกลับ (Leakage reverse current) ที่สูงนั่นเอง ในการใช้งานจริงแล้วต้องการค่าอัตราการกรองกระแสสูงๆ กระแสรั่วไหลย้อนกลับต่ำๆ อีกทั้งการประยุกต์ใช้งาน ไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิสูง ในโครงการนี้มีแนวคิดที่จะลดข้อบกพร่องของไดโอดโครงสร้าง MS นี้เพื่อให้ไดโอดมีคุณภาพที่ดีขึ้นตามการใช้งาน โดยจะใช้จำนวนที่สร้างขึ้นจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค ดังในหัวข้อต่อไป

4.3 ผลการตรวจสอบไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

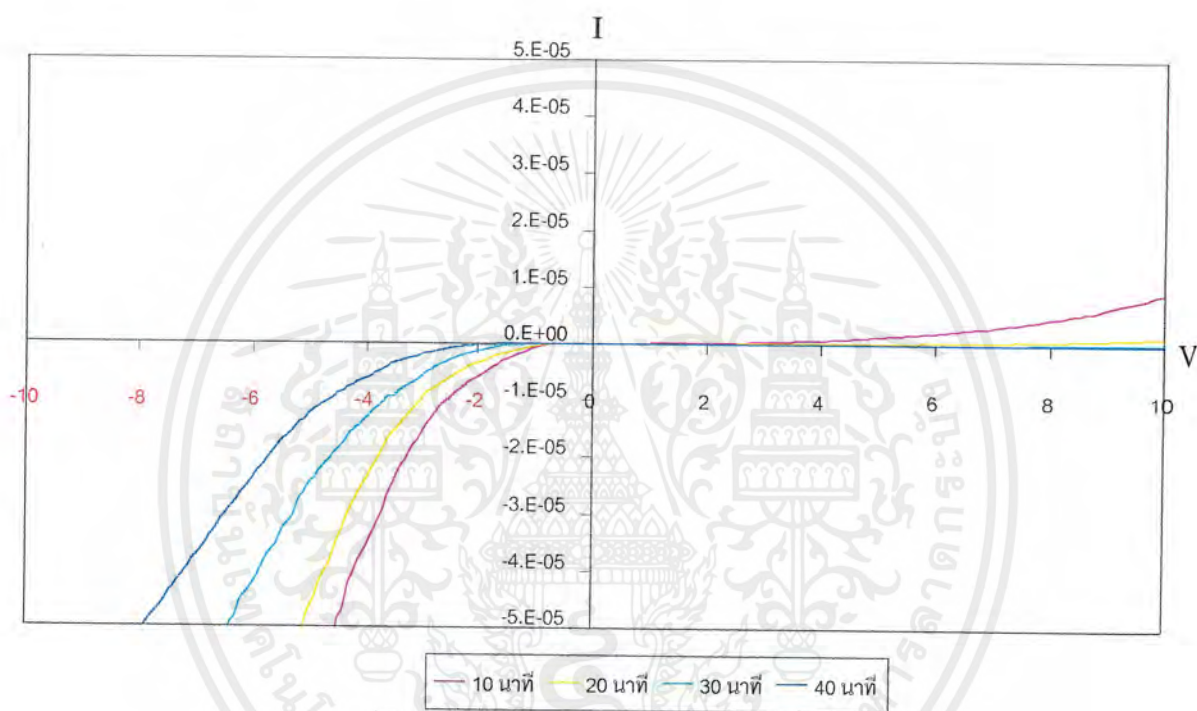
จากผลการทดลองของไดโอดโครงสร้าง MS ที่ผ่านมา เมื่อทำการเปรียบเทียบการไหลของกระแสทั้งการใช้ไบอัสไปข้างหน้าและการให้ไบอัสย้อนกลับ จะเกิดกระแสรั่ว (Leakage reverse current) สูงมาก อันเป็นข้อเสียของไดโอดโครงสร้าง MS ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนา เป็นไดโอดโครงสร้าง MIS โครงสร้างชั้นฉนวนชั้นระหว่างชั้นโลหะและชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะลดกระแสรั่วที่เกิดขึ้น โครงการนี้ได้ศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค ต่อมาเป็นการศึกษาผลของอัตราส่วน B:C ที่เจอให้กับฟิล์มเพชรชนิดพี และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS

4.3.1 ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคว่าจะมีผลต่อการไหลของกระแสภายในไดโอดโครงสร้าง MIS อย่างไร ซึ่งจะทำการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยความหนาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน อันจะประมาณได้ว่าที่ 10 นาทีได้ความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคประมาณ 1 ไมครอนส่วน 20 นาที , 30 นาทีและ 40 นาทีที่จะมีความหนา

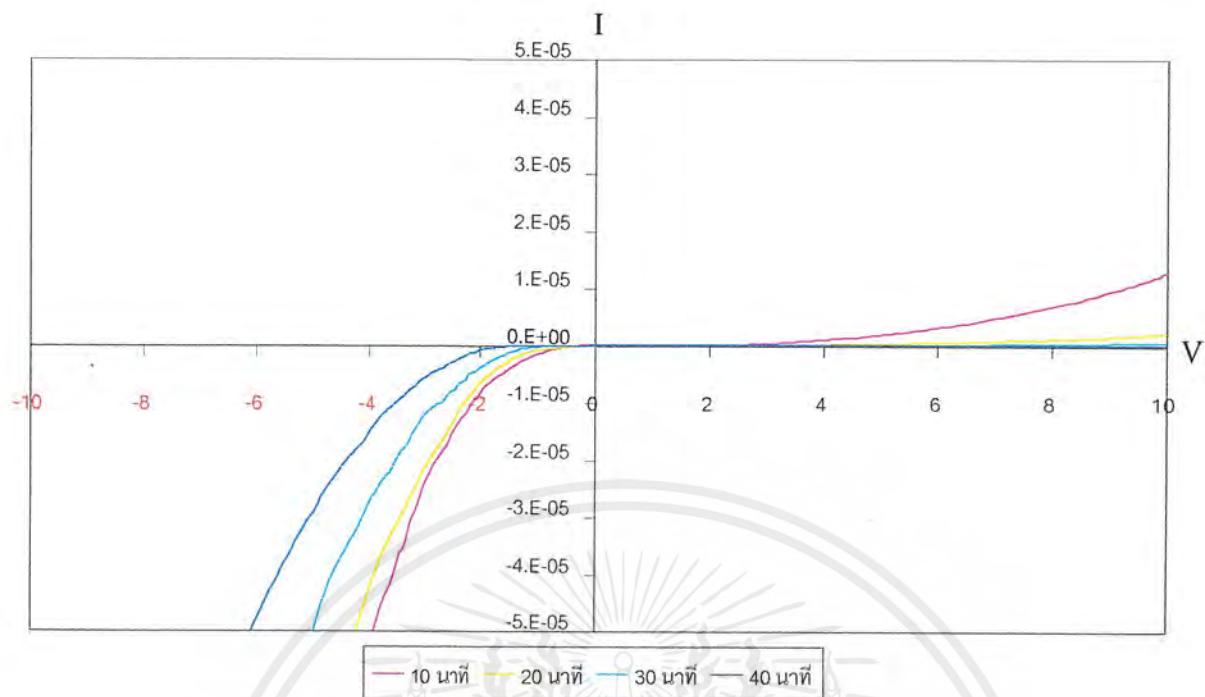
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 2 ไมครอน , 3 ไมครอนและ 4 ไมครอนตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 โดยสร้างขึ้นระหว่างชั้นโลหะกับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยค่าของอัตราส่วน B:C เป็น 10 ppm, 100ppm และ 1000ppm ในการศึกษาส่วนนี้จะทำการวัดคุณสมบัติกระแสกับแรงดันในอุณหภูมิห้อง ($T = 300K$) ด้วยเครื่องมือวัดใน ภาคผนวก ง-2 ผลที่ได้จะแสดงในรูปกราฟที่ 4.8 ถึง 4.10 ซึ่งพิจารณาค่าอัตราส่วน B:C เป็นค่าเปรียบเทียบคงที่

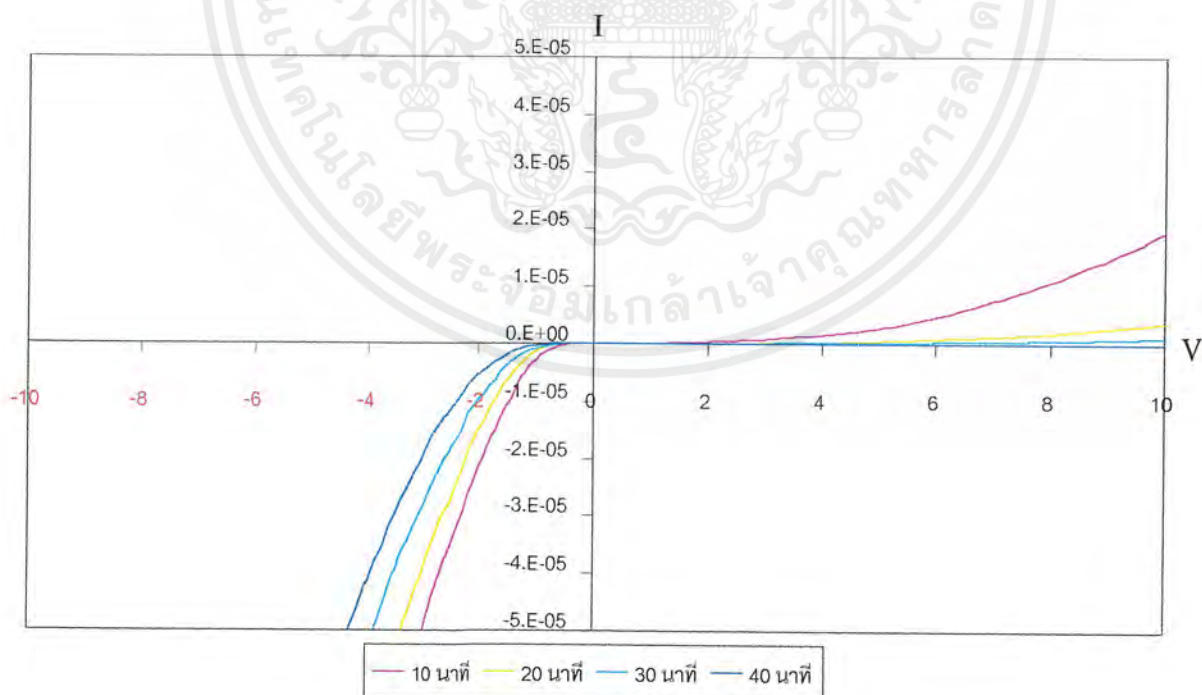


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน เมื่ออัตราส่วน B:C 10 ppm ในกรณีความหนาของชั้นอินทรีนชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน เมื่ออัตราส่วน B:C 100 ppm ในกรณีความหนาของชั้นอินทรีนซิคต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน เมื่ออัตราส่วน B:C 1000 ppm ในกรณีความหนาของชั้นอินทรีนซิคต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 ได้นำมาพิจารณาค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับที่มีค่าเท่ากับ 0.24 ไมโครแอมแปร์ โดยแบ่งเป็น 2 อย่างด้วยกัน อย่างแรกเป็นการพิจารณาขณะไดโอดได้รับแรงดันไปอัสไปข้างหน้า ดังตารางที่ 4.3 อย่างที่สองเป็นการพิจารณาขณะไดโอดได้รับแรงดันไปอัสย้อนกลับ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสรั่ว 0.24 μA เมื่อทำการไบอัสตรงแก่ไดโอด โครงสร้าง MIS ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ

อัตราส่วน B:C (ppm)	แรงดันไบอัสตรง (V) โดยระยะเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก			
	10 นาที	20 นาที	30 นาที	40 นาที
10	-0.83	-0.86	-1.15	-1.76
100	-0.51	-0.53	-0.98	-1.22
1000	-0.47	-0.48	-0.65	-0.85

ตารางที่ 4.4 ค่ากระแสรั่ว 0.24 μA เมื่อทำการไบอัสกลับแก่ไดโอด โครงสร้าง MIS ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ

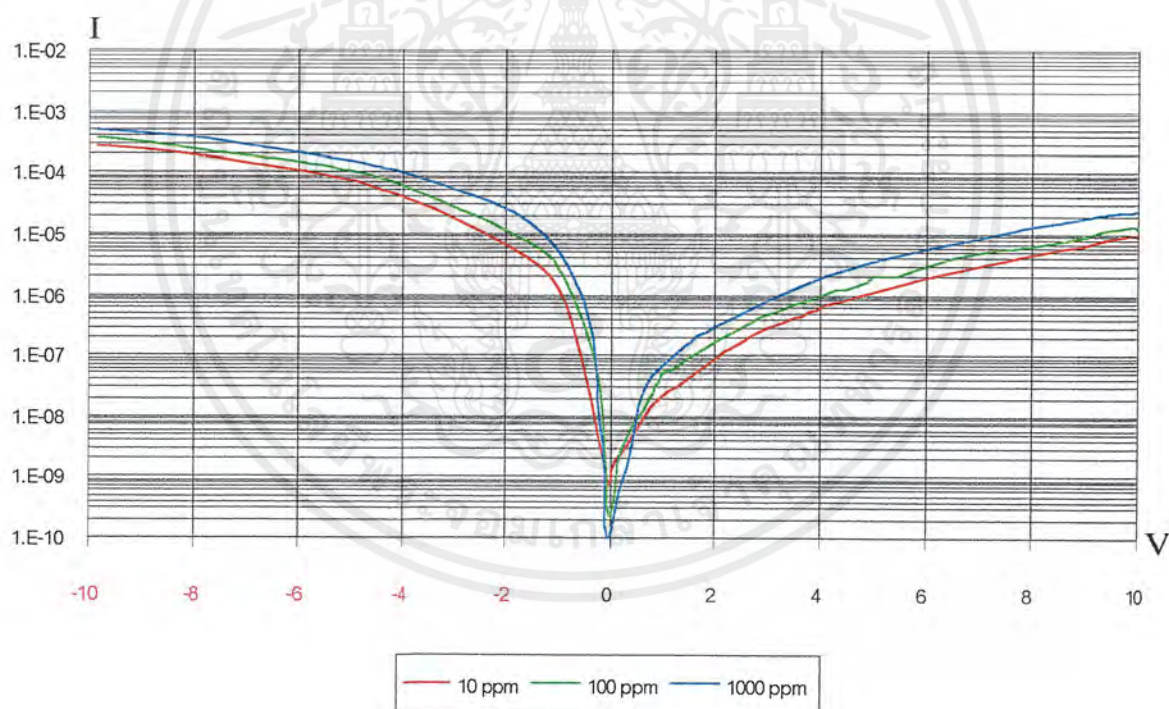
อัตราส่วน B:C (ppm)	แรงดันไบอัสกลับ (V) โดยระยะเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก			
	10 นาที	20 นาที	30 นาที	40 นาที
10	2.71	4.58	11.70	20.00
100	2.50	4.21	9.38	18.59
1000	1.80	3.85	5.87	16.37

จากค่าต่าง ๆ ใน 2 ตารางข้างบน สามารถพิจารณาได้ดังนี้ ตารางที่ 4.3 เมื่อกระแสไหลไปข้างหน้าขนาด 0.24 μA ไดโอดตัวที่มีความหนาของชั้นอินทรีนซิกมากจะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้าเพิ่มมากขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนตารางที่ 4.4 เมื่อกระแสไหลย้อนกลับขนาด 0.24 μA ไดโอดตัวที่มีความหนาของชั้นอินทรีนซิกมาก จะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับสูงอย่างเห็นได้ชัดจนกล่าวได้อีกนัย คือ ไดโอดโครงสร้าง MIS จะแรงดันพังทะลายสูงขึ้น เมื่อชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งพอที่จะสรุปได้ดังนี้ ความหนาของฟิล์มเพชรอินทรีนซิก(ฉนวน) จะมีผลต่อการไหลของกระแสย้อนกลับ โดยถ้าเพิ่มความหนาของฟิล์มเพชร

ชนิดอินทรินซิกให้มากขึ้น ก็จะทำให้ปริมาณการไหลของกระแสย้อนกลับได้น้อยลง อันเป็นผลให้กระแสรั่วไหลย้อนกลับ(leakage current) ที่เกิดขึ้นในไดโอด มีปริมาณลดน้อยลง ดังนั้นมีแรงดันพังทลายสูงขึ้น ในส่วนของกระแสไปข้างหน้า ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก(ฉนวน) จะมีผลน้อยมาก ซึ่งถือได้ว่าแทบไม่มีผลต่อปริมาณการไหลของกระแสไปข้างหน้า

4.3.2 ผลของอัตราส่วน B:C ของฟิล์มเพชรชนิดพี

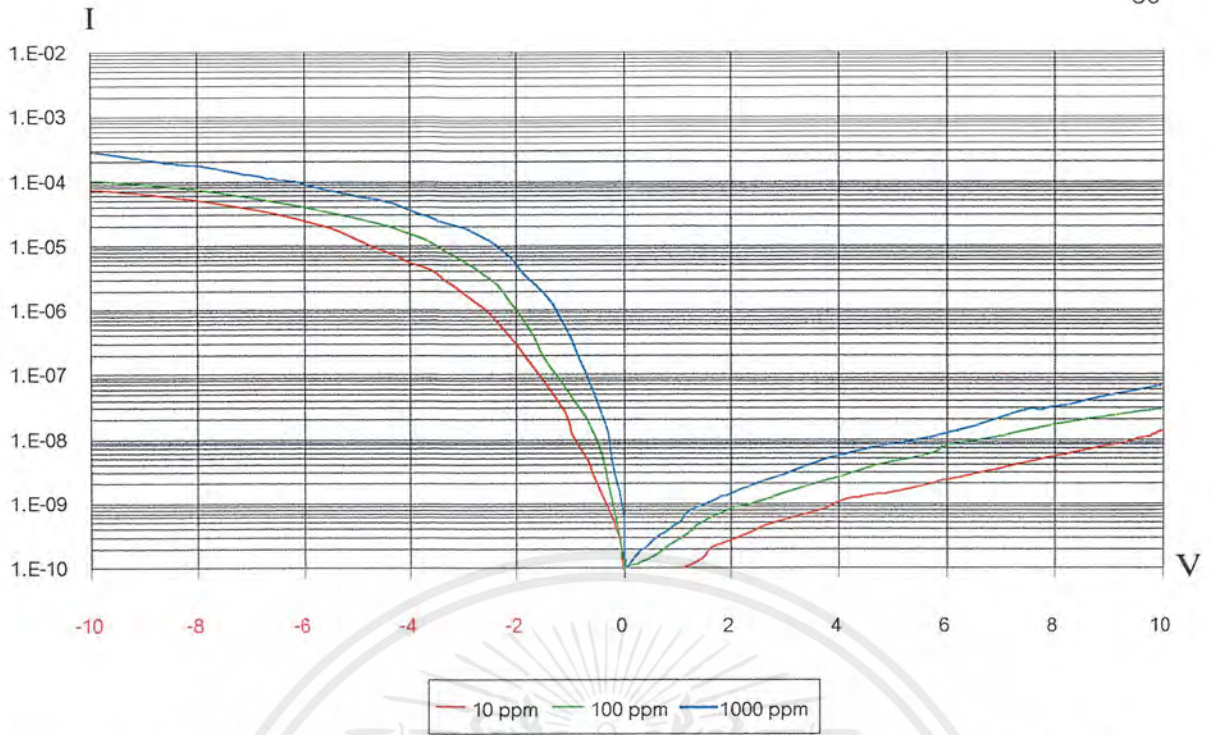
ในส่วนหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาปริมาณของอัตราส่วนต่างๆว่าจะมีผลต่อการไหลของกระแสภายในไดโอดโครงสร้าง MIS อย่างไร โดยพิจารณานำค่าจากหัวข้อที่ 4.3.1 ซึ่งจะนำค่าระยะเวลาที่ใช้ในการสร้างชั้นอินทรินมาพิจารณา พล็อตกราฟ Semi-Log ของความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันในอุณหภูมิห้อง ($T = 300\text{ K}$) โดยพิจารณาค่าระยะเวลา 10 นาที่และ 40 นาที่ ในการสร้างชั้นความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกเป็นค่าเปรียบเทียบกับอัตราส่วน B:C 10ppm , 100 ppm และ 1000 ppm ตามลำดับ ผลที่ได้จะแสดงในรูปภาพที่ 4.11 ถึง 4.12



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันในลักษณะ Semi-Log ระยะเวลา 10 นาที่ ในการสร้างชั้นอินทรินซิก ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ

(a) 10 ppm (—) (b) 100 ppm (—) (c) 1000 ppm (—)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันในลักษณะ Semi-Log ระยะเวลา 40 นาที่ ในการสร้างชั้นอินทรินซิก ด้วยอัตรา B:C ต่างๆ

(a) 10 ppm (—) (b) 100 ppm (—) (c) 1000 ppm (—)

จากรูปกราฟ Semi-Log ข้างบนทั้ง 2 รูป จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสที่เกิดจากการไบอัสตรง (กระแสไปข้างหน้า) มีค่าที่เด่นชัดที่สุดเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของปริมาณการไหลของกระแสขณะถูกแรงดันไบอัสตรง และขณะถูกแรงดันไบอัสกลับ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นอีก จะพิจารณารูปที่ 4.11 และ กราฟรูปที่ 4.12 โดยให้แรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสกลับมีค่าคงที่เท่ากับ 2 โวลต์ แก่ไดโอดโครงสร้าง MIS ที่อุณหภูมิห้อง ($T=300\text{ K}$) แล้วนำผลของปริมาณการไหลของกระแสมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณของกระแสในไดโอดโครงสร้าง MIS ที่มีระยะเวลาในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกนาน 10 นาที่ โดยขนาดของแรงดันไบอัส 2 โวลต์

B:C	ค่าปริมาณของกระแส (μA) เมื่อถูกไบอัสด้วยขนาดแรงดัน 2 V	
	ไบอัสตรง	ไบอัสกลับ
10	6.8	0.095
100	12.1	0.170
1000	25.2	0.350

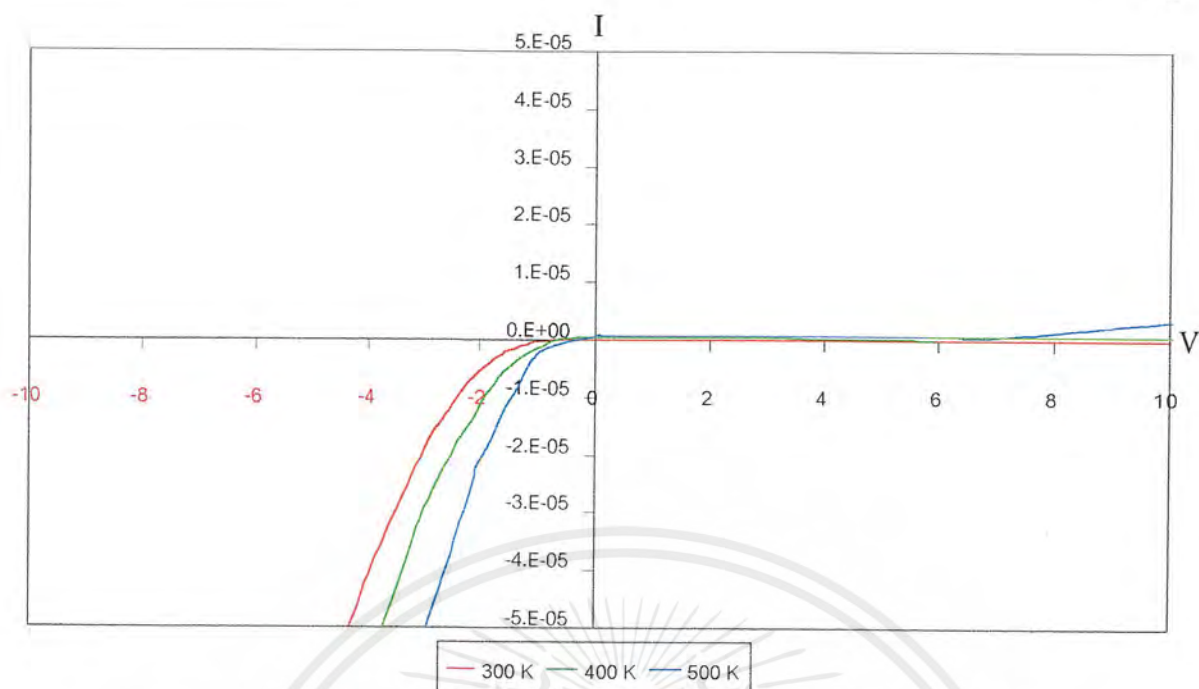
ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณของกระแสในไดโอดโครงสร้าง MIS ที่มีระยะเวลาในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคนาน 40 นาที โดยขนาดของแรงดันไบอัส 2 โวลต์

B:C	ค่าปริมาณของกระแส (μA) เมื่อถูกไบอัสด้วยขนาดแรงดัน 2 V	
	ไบอัสตรง	ไบอัสกลับ
10	0.3	0.00029
100	1.2	0.00090
1000	5.1	0.00155

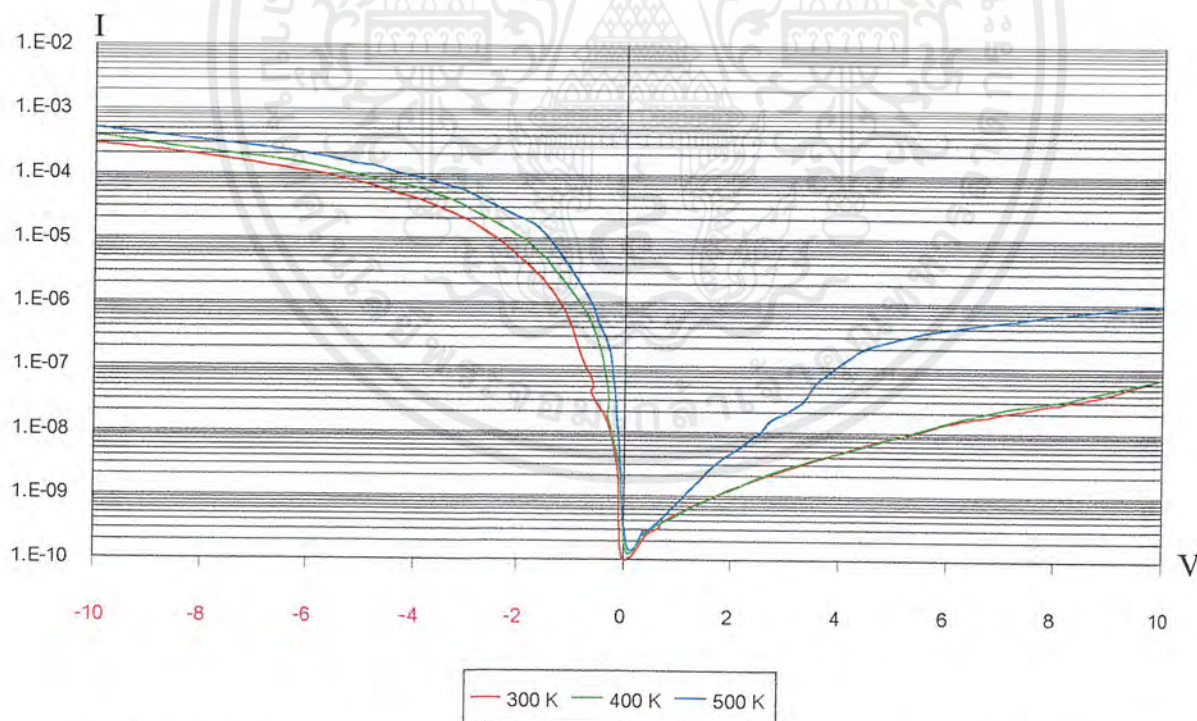
จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ถึงความแตกต่างของปริมาณการไหลของกระแสใค้ง่ายและชัดเจนยิ่งขึ้นอีก ซึ่งไดโอดโครงสร้าง MIS ที่มีอัตราส่วน B:C เพิ่มสูงขึ้น จะมีกระแสที่เกิดจากการไบอัสตรง (กระแสไปข้างหน้า) มีปริมาณการไหลของกระแสเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังในตารางที่ 4.6 ยกตัวอย่างเช่น อัตราส่วน B:C ที่ 10 ppm และ 1000 ppm จะมีปริมาณของกระแส 8.1 μA และ 65 μA ตามลำดับ ในตารางเดียวกันนี้ ส่วนของกระแสที่เกิดจากการไบอัสกลับ (กระแย้อนกลับ) มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหลของกระแสเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการไหลของกระแสไปข้างหน้า ซึ่งจะมีค่า 0.0012 μA และ 0.0071 μA ด้วยอัตราส่วน B:C 10 ppm และ 1000 ppm ตามลำดับ ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่า อัตราส่วน B:C ในฟิล์มเพชรชนิดพี จะมีผลต่อการไหลของกระแสไปข้างหน้า โดยถ้าเพิ่มอัตราส่วน B:C ให้มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ปริมาณของกระแสไหลไปข้างหน้าเพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของกระแย้อนกลับ อัตราส่วน B:C ในฟิล์มเพชรชนิดพีจะมีผลน้อยมาก ซึ่งถือได้ว่าแทบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแย้อนกลับ

4.3.3 ผลการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่อุณหภูมิต่างๆ

หัวข้อนี้เป็นการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร เลือกใช้อัตราส่วน B:C 1000 ppm และความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคที่ระยะเวลา 40 นาที เมื่ออยู่ในอุณหภูมิตั้งแต่ 300 K, 400 K, 500 K แล้วทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดคงภาคผนวก ง ดังแสดงในรูปกราฟที่ 4.13 และนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ Semi-Log ของการเปลี่ยนแปลงกระแสกับแรงดัน เมื่อทำงานที่อุณหภูมิต่างๆกัน ดังแสดงผลในกราฟรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของไดโอดโครงสร้าง MIS ด้วยอัตรา B:C1000 ppm ความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่ระยะเวลา 40 นาที ในขณะอุณหภูมิต่างๆ
 (a) 300 K (—) (b) 400 K (—) (c) 500 K (—)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันในลักษณะ Semi-Log ของไดโอดโครงสร้าง MIS ด้วยอัตรา B:C 1000 ppm ความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่ระยะเวลา 40 นาที ในขณะอุณหภูมิต่างๆ
 (a) 300 K (—) (b) 400 K (—) (c) 500 K (—)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.13 จะเห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสไหลไปข้างหน้ามีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น หรือค่าที่ทำให้แรงดันไบอัสไปข้างหน้ามีค่าลดลง ซึ่งทำให้ไดโอดโครงสร้าง MIS นำกระแสได้ ในส่วนของปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในขณะที่อุณหภูมิค่า จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 500 K จะเห็นว่ามีปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับมากขึ้นอย่างชัดเจนกว่ากราฟอุณหภูมิอื่นๆ ดังในกราฟรูปที่ 4.14 จากกราฟนี้เองที่อุณหภูมิ 500 K แรงดันไบอัส 10 โวลต์ จะยังมีอัตราการกรองการไหลของกระแสโดยประมาณที่ยังสูงอยู่ นั่นก็แสดงว่าไดโอดโครงสร้าง MIS นี้จะยังคงรักษาเสถียรภาพในการทำงาน(เรกติไฟร์)เอาไว้จนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงถึง 500 K

4.3.4 กระบวนการตรวจสอบลักษณะการไหลของกระแสผ่านชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

จากหัวข้อที่ 2.8.3 ในบทที่ 2 คังตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ถึงการไหลของกระแสผ่านชั้นจนวนหรือการนำไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS มีได้ 3 ลักษณะด้วยกัน ในส่วนหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาตรวจสอบ รูปแบบการไหลของกระแสผ่านโครงสร้างของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก (ชั้นจนวน) ที่มีระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก และชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยอัตรา B:C ได้แก่ 10 ppm, 100 ppm, 1000 ppm ตามลำดับ

4.3.4.1 การตรวจสอบลักษณะการไหลของกระแสผ่านชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกแบบ Frenkel-Poole Emission

จากตารางที่ 2.4 จะได้สมการ

$$I \approx \frac{AV}{d} \exp \left[\frac{(-q\phi_B - \sqrt{qV / \pi\epsilon_i d})}{kT} \right] \quad (4.15)$$

หรืออีกนัยหนึ่ง

$$I = \eta_1 \frac{AV}{d} \exp \left[\frac{(-q\phi_B - \sqrt{qV / \pi\epsilon_i d})}{kT} \right] \quad (4.16)$$

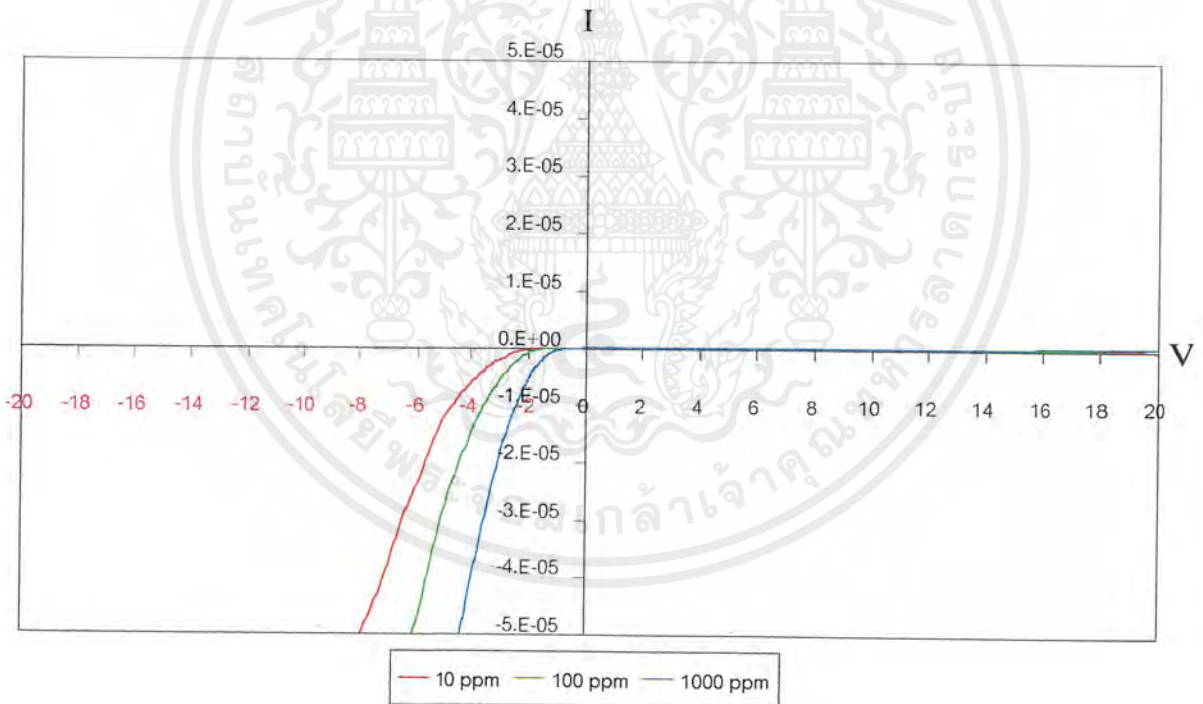
โดย η_1 คือ Collection factor ในการไหลของกระแส Frenkel-Poole หัวข้อนี้กำหนดให้ $\eta_1 =$ ค่าคงที่ หน่วย $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่ \ln ทั้ง 2 ข้างของสมการพร้อมจัดรูปสมการใหม่จะได้

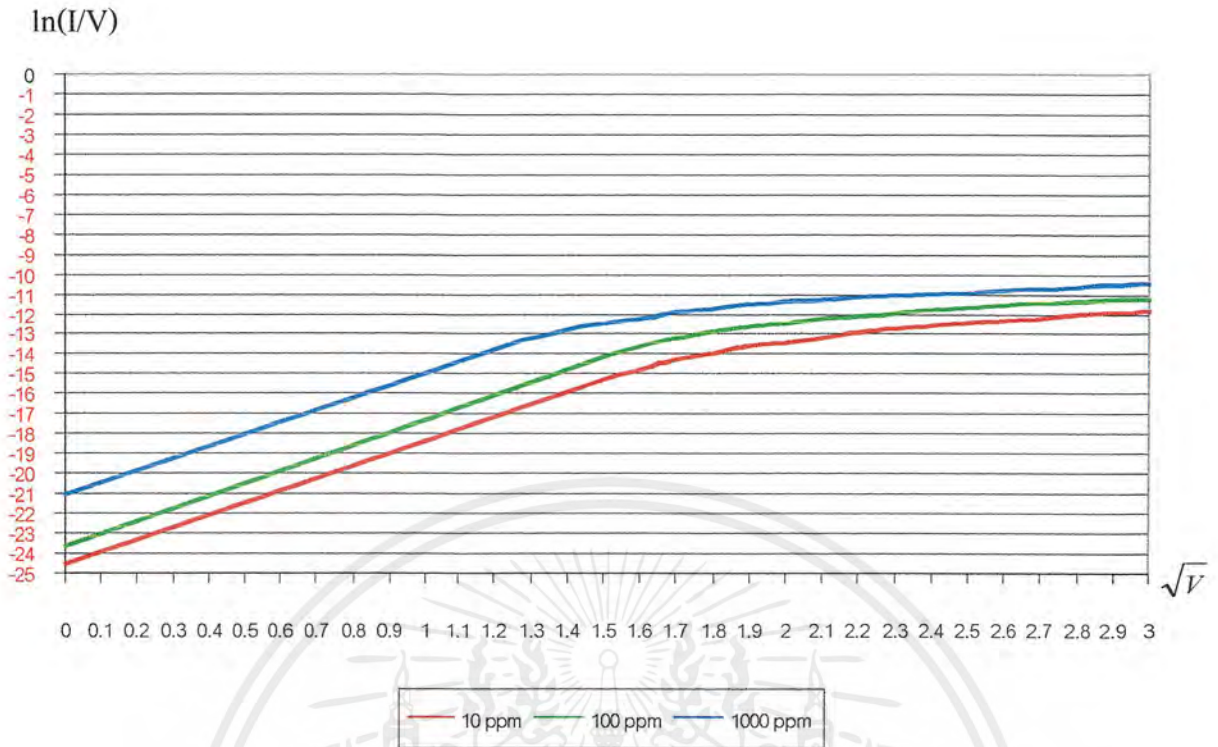
$$\ln\left(\frac{I}{V}\right) = \frac{q}{kT} \sqrt{\frac{q}{\pi\epsilon_i d}} \sqrt{V} + \left[\ln\left(\frac{A\eta_I}{d}\right) - \frac{q\phi_B}{kT} \right] \quad (4.17)$$

จากสมการ 4.17 จะได้ความสัมพันธ์ของ $\ln\left(\frac{I}{V}\right) \propto \sqrt{V}$ เมื่อนำข้อมูลที่ได้ จากการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ คือ ระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ส่วนชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยอัตราส่วน B:C ได้แก่ 10 ppm, 100 ppm, 1000 ppm จะได้ผลดังกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันดังรูปกราฟที่ 4.15 ส่วนความสัมพันธ์ของ $\ln\left(\frac{I}{V}\right) \propto \sqrt{V}$ ดังกราฟรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ผลของการนำกระแสแบบ Frenkel-Poole Emission ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมีระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกด้วยอัตรา B:C ต่างๆ
 (a) 10 ppm (—) (b) 100 ppm (—) (c) 1000 ppm (—)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของ $\ln\left(\frac{I}{V}\right) \propto \sqrt{V}$ ภายใต้การนำกระแสแบบ Frenkel-Poole Emission ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมี ระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิด อินทรีนซิคด้วยอัตรา B:C ต่างๆ
 (a) 10 ppm (—) (b) 100 ppm (—) (c) 1000 ppm (—)

จากกราฟรูปที่ 4.15 และ 4.16 จะได้ความสัมพันธ์ของ $\ln\left(\frac{I}{V}\right) \propto \sqrt{V}$ มีความชันเป็นบวก เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วง 0.04 ถึง 1.45 ($0 < \sqrt{V} < 1.45$) ซึ่งมีความสอดคล้องกับ ความสัมพันธ์ของ $\ln\left(\frac{I}{V}\right) \propto \sqrt{V}$ จะมีช่วงการไบอัสตรงประมาณค่าต่ำจนถึง 2.1 โวลต์ ถ้าพิจารณา ช่วงที่เป็นเส้นตรง เปรียบเทียบกับสมการที่ 4.17 และกำหนดให้ $\sqrt{V} = 0$ จะได้ค่า η_1 ดังสมการที่ 4.18

$$\eta_1 = \frac{d}{A} \exp \left[\ln\left(\frac{I}{V}\right) + \frac{q\phi_B}{kT} \right] \quad (4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า η_1 สำหรับการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole

อัตราส่วน B:C (ppm)	ระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก โดยให้ $\sqrt{V} = 0$	
	$\ln(I/V)$	η_1
10	-24.4	0.151
100	-23.5	0.273
1000	-21.0	2.538

พิจารณาปริมาณผลของกระแสที่ไหลจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณในสมการที่ 4.16 โดยเลือกค่าของ B:C เป็น 1000 ppm กับระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นจนวน เมื่อถูกไบอัสตรง 0.5 V จะได้

จากการทดลองมีกระแสไหล = 3.45×10^{-8} A

จากสมการที่ 4.16 คำนวณ

มีกระแสไหล = 34.34 nA

จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสที่ได้จากการทดลองและคำนวณมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก พอสรุปได้ว่าลักษณะการไหลของกระแสในช่วงนี้มีปริมาณค่าต่ำๆจนถึง 2.1 โวลท์ คือขณะให้แรงดันไบอัสตรงก่อนนำกระแส (ดังสมการที่ 4.16) ซึ่งเป็นลักษณะการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole Emission ในการทดลอง ปริมาณการไหลของกระแสไปข้างหน้าสามารถควบคุมได้ด้วยเงื่อนไขหลักคือ ความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก (d) ยังมีปริมาณอะตอมสารเจือโบรอนในชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี และอุณหภูมิ (T)

4.3.4.2 การตรวจสอบลักษณะการไหลของกระแสผ่านชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกแบบ

Schottky Emission

จากตารางที่ 2.4 จะได้สมการ

$$I = \eta_2 \left(\frac{4\pi q m_p^* k^2}{h^3} \right) \cdot A T^2 \exp \left[\frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV / 4\pi\epsilon_i d})}{kT} \right] \quad (4.19)$$

โดย η_2 คือ Collection factor ในการไหลของกระแส Schottky หัวข้อนี้กำหนดให้ $\eta_2 =$ ค่าคงที่ หน่วย $(\Omega\text{cm})^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

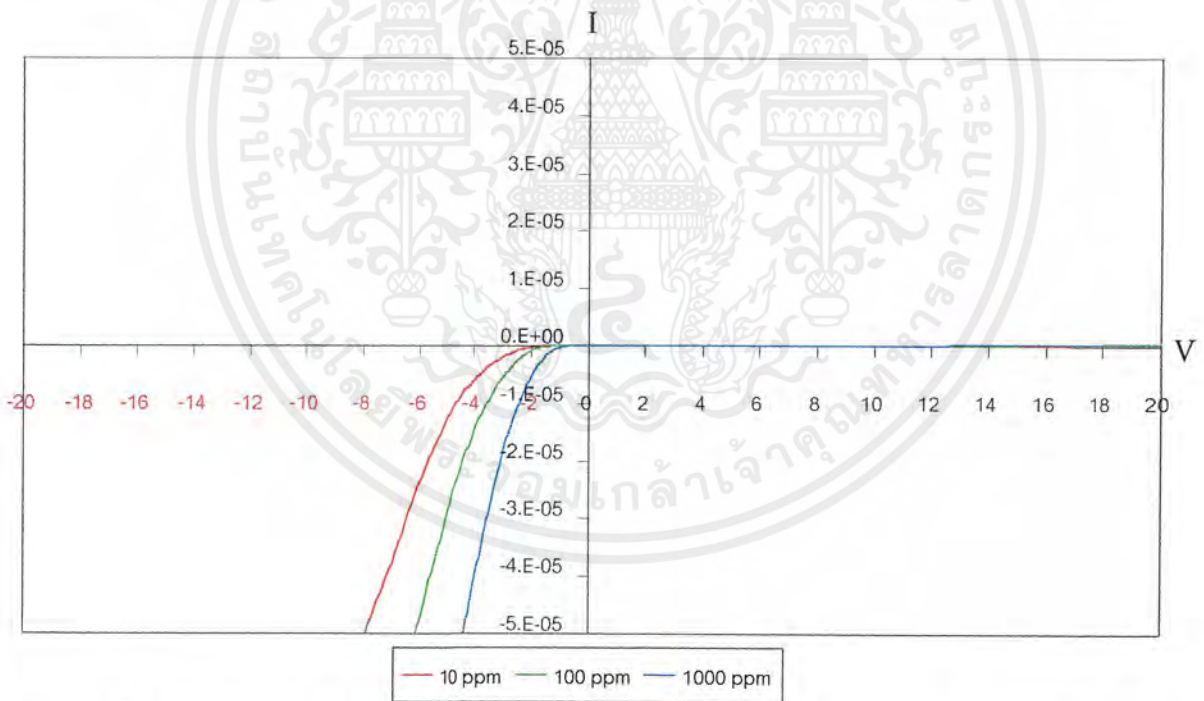
ได้ \ln ทั้ง 2 ข้างของสมการพร้อมจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\ln(I) = \ln\left(\frac{4\pi q m_p^* A T^2 k^2}{h^3} \cdot \eta_2\right) + \left[\frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/4\pi\epsilon_i d})}{kT}\right] \quad (4.20)$$

จะได้

$$\ln(I) = \frac{q}{kT} \sqrt{\frac{q}{4\pi\epsilon_i d}} \cdot \sqrt{V} + \left[\ln\left(\frac{4\pi q m_p^* A T^2 k^2}{h^3} \cdot \eta_2\right) - \frac{q\phi_B}{kT}\right] \quad (4.21)$$

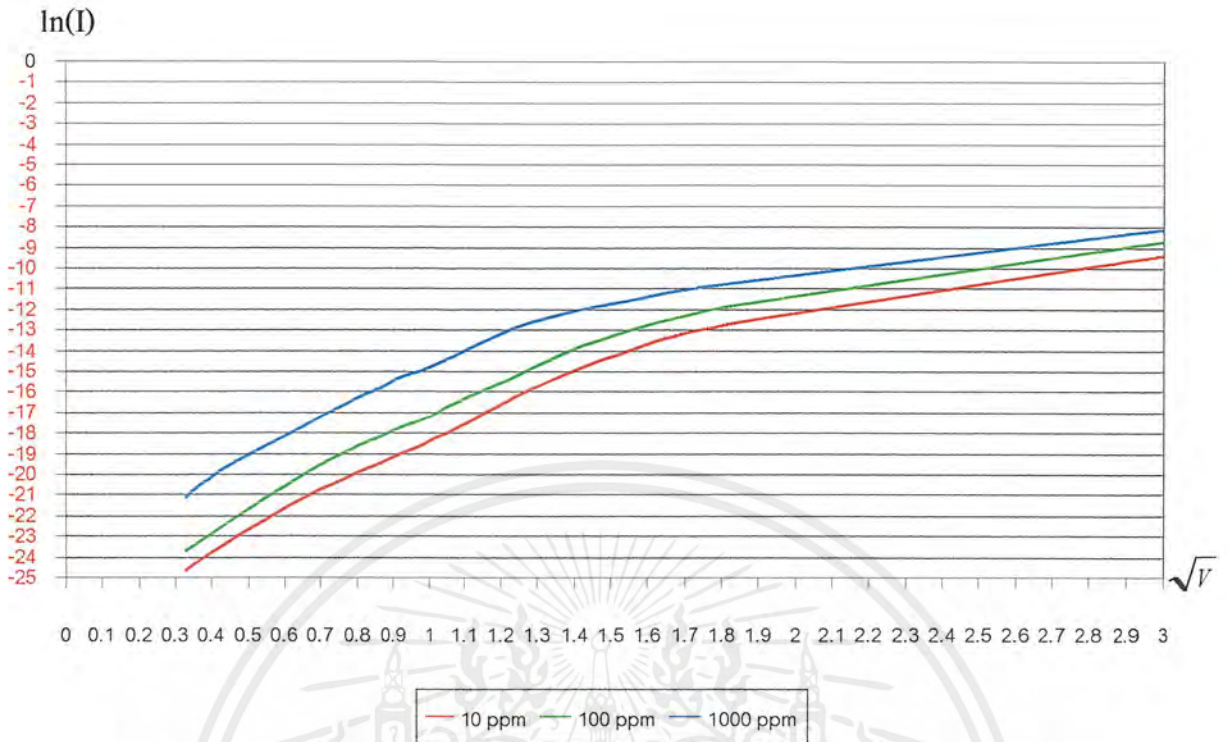
จากสมการที่ 4.21 จะได้ความสัมพันธ์ของ $\ln(I) \propto \sqrt{V}$ เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ คือระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก ส่วนชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยอัตราส่วน B:C ได้แก่ 10 ppm, 100 ppm, 1000 ppm จะได้ดังกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 4.17 ส่วนความสัมพันธ์ของ $\ln(I) \propto \sqrt{V}$ ดังกราฟรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของ $\ln(I) \propto \sqrt{V}$ ภายใต้การนำกระแสแบบ Schottky Emission ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมี ระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกด้วยอัตรา B:C ต่างๆ

(a) 10 ppm (—) (b) 100 ppm (—) (c) 1000 ppm (—)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของ $\ln(I)\alpha\sqrt{V}$ ภายใต้การนำกระแสแบบ Schottky Emission ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมี ระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีน ซิคด้วยอัตรา B:C ต่างๆ

(a) 10 ppm (—) (b) 100 ppm (—) (c) 1000 ppm (—)

จากกราฟรูปที่ 4.18 จะได้ความสัมพันธ์ของ $\ln(I)\alpha\sqrt{V}$ มีความชันเป็นบวก เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วง 1.75 ถึง 3 ($1.75 < \sqrt{V} < 3$) ซึ่งมีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ $\ln(I)\alpha\sqrt{V}$ จะมีการไบอัสตรงประมาณ 3 ถึง 10 โวลต์ ถ้าพิจารณาช่วงที่เป็นเส้นตรงเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.21 และกำหนดให้ $\sqrt{V} = 0$ จะได้ค่า η_2 ดังสมการที่ 4.22

$$\eta_2 = \frac{h^3}{4\pi q m_p^* A k^2 T^2} \exp \left[\frac{q\phi_B}{kT} + \ln(I) \right] \quad (4.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาปริมาณผลของกระแสที่ไหลจากการทดลองกับเปรียบเทียบกับการคำนวณในสมการที่ 4.19 โดยเลือกค่าของ B:C เป็น 1000 ppm กับระยะเวลา 40 นาที ในการสร้างชั้นฉนวน เมื่อถูกไบอัสตรง 6 V

จากการทดลองมีกระแสไหล = 111 μA

จากสมการที่ 4.19 คำนวณ

$$\text{กระแสไหล} = 1.10 \times 1.07 \times 10^{-6} = 116.49 \mu\text{A}$$

จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสที่ได้จากการทดลองและคำนวณมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก พอสรุปได้ว่าลักษณะการไหลของกระแสในช่วงนี้มีประมาณ 3 โวลต์ จนถึง 10 โวลต์ ซึ่งเป็นลักษณะการไหลของกระแสแบบ Schottky Emission คือขณะให้แรงดันไบอัสตรงในช่วงนำกระแสแล้ว (ดังสมการที่ 4.19) ในการทดลองปริมาณการไหลของกระแสไปยังหน้าสามารถควบคุมด้วยเงื่อนไขหลักคือ ปริมาณอะตอมสารเจือโบรอนในชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี, อุณหภูมิ (T) และความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค (d)



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

โครงการนี้เพื่อศึกษาและพัฒนาไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร เพื่อให้เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานสารกึ่งตัวนำเพชรซึ่งมีคุณสมบัติ พื้นฐานที่ดีมีเสถียรภาพ ส่วนแรกของงานจะศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MS ที่มีรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อเป็นข้อเปรียบเทียบกับส่วนหลังของโครงการ โดยทำการสร้างไดโอดโครงสร้าง MS ที่มีอัตราส่วน B:C ในฟิล์มเพชรชนิดพีอันได้แก่ 10 ppm, 100 ppm และ 1000 ppm จากการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะพบว่า ไดโอดโครงสร้าง MS มีความสูงของกำแพงศักย์อยู่ในช่วง 0.510 eV - 0.525 eV แต่เมื่อเปรียบเทียบการให้แรงดันไบอัสขนาดเท่ากันทั้งสองทิศทางจะได้ว่า กระแสรั่วไหลย้อนกลับมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับกระแสไหลไปข้างหน้า จุดประสงค์ของการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งานมักจะใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาไดโอดโครงสร้าง MIS เพื่อเป็นการปรับปรุงและพัฒนาไดโอดโครงสร้าง MS ให้มีเสถียรภาพในการทำงานที่ดีขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้งาน ตามความเหมาะสม โดยจะสร้างชั้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกชั้นระหว่างชั้นของโลหะกับฟิล์มเพชรชนิดพี ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลง เพื่อใช้แก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น โดยมีเงื่อนไขต่าง ๆ ได้แก่ พิจารณาผลของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกที่มีความหนาตามระยะเวลาในการสร้างเป็น 10 นาที 20 นาที 30 นาที 40 นาที ระหว่างชั้นของโลหะและฟิล์มเพชรชนิดพี ผลของอัตราส่วน B:C 10 ppm, 100 ppm และ 1000 ppm ที่เติมให้แก่ฟิล์มเพชรชนิดพี และการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุณหภูมิสูงต่างๆดังนี้ 300 K 400 K 500 K จากการศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก พบว่า เมื่อฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกมีความหนาเพิ่มขึ้นสามารถทำให้ปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับมีค่าลดลง ในเวลาเดียวกันกระแสไหลไปข้างหน้าขณะได้รับการไบอัสตรงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขณะที่ไดโอดถูกไบอัสย้อนกลับ ส่วนการศึกษาผลของอัตราส่วน B:C ขณะที่มีความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกคงที่ จะพบว่า เมื่อมีอัตราส่วน B:C ในฟิล์มเพชรชนิดพีให้มากขึ้น ปริมาณของกระแสไหลไปข้างหน้าเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้รับไบอัสตรง แต่ที่ปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นพอสรุปได้ว่า การเพิ่มชั้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกของไดโอดโครงสร้าง MIS จะสามารถลดปริมาณกระแสรั่วไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้อนกลับได้ และการเพิ่มอัตราส่วน B:C การเพิ่มประจุพาหะส่วนมาก สามารถเพิ่มปริมาณการไหลของกระแสไปข้างหน้าได้อย่างมาก อันเป็นการเพิ่มอัตราขยายการไหลของกระแส โดยที่ได้รับการไบอัสขนาดเท่ากันในทั้งสองทิศทาง ไดโอดโครงสร้าง MIS จะมีการไหลของกระแส 2 รูปแบบด้วยกันคือ แบบ Frenkel-Poole Emission จะมีลักษณะการไหลของกระแสก่อนนำไฟฟ้า โดยเป็นช่วงก่อนการนำไฟฟ้า นั่นก็เพราะประจุพาหะโฮลที่ถูกฉีดผ่านรอยสัมผัสเข้าไปในชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกจะถูกแตร็ปจากระดับพลังงานว่างในชั้นอินทรีนซิก ดังนั้นจึงต้องได้รับแรงดันไบอัสตรงมากขึ้น เมื่อให้ประจุโฮลสามารถไหลผ่านชั้นอินทรีนซิกไปได้ จึงเข้าสู่ช่วงนำกระแสอันจะมีลักษณะการไหลของกระแสแบบ Schottky emission ซึ่งจะมีการไหลของกระแสที่ขึ้นอยู่กับความสูงของกำแพงศักย์โดยมีอุณหภูมิคงที่ และจะมีกระแสไหลได้มากยิ่งขึ้นถ้าหากมีปริมาณประจุพาหะโฮลเพิ่มขึ้น ในส่วนของการทำงานในอุณหภูมิสูงของไดโอดโครงสร้าง MIS ยังจะพบว่าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 300 K จนถึงอุณหภูมิสูงราว 500 K ค่ากระแสที่วัดได้แม้ว่าจะเป็นไปตามทฤษฎีก็จริง แต่ก็คลาดเคลื่อนจากการคำนวณส่วนหนึ่ง ซึ่งน่าจะเป็นผลสืบเนื่องมาจากค่าของ η ในช่วงก่อนการนำกระแส เพราะว่า ฟิล์มเพชรที่เราทำการศึกษาเป็นฟิล์มเพชรประเภทโครงสร้างผลึกเชิงซ้อน ซึ่งจากสมการที่ใช้อธิบายการไหลของกระแสในโครงการนี้จะใช้สมการการไหลของกระแสในสารกึ่งตัวนำโครงสร้างผลึกเดี่ยว การประยุกต์ใช้งานของไดโอดโครงสร้าง MIS จะใช้งานตามเงื่อนไขที่ต้องการตามความเหมาะสม เช่น ใช้ในวงจร current source ใช้เป็นไดโอดตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่อุณหภูมิสูง โดยมีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ที่ดี

บรรณานุกรม

- [1] Lawrence S. Pan, Don R. Kania. **Diamond : Electronic Properties and Applications.** Massachusetts : Kluwer Academic Publishers. 1995
- [2] Robert F. Davis. **Diamond Films and Coatings.** New Jersey : Noyes Publication. 1993.
- [3] “Diamond Films for Electronic Packing”, NASA, USA.
- [4] M. Barbara, “Diamond Thin Film Capacitors Demonstrate Large Capacitance/High Temperature Capability”, Wright Laboratory, USA.
- [5] Z.L. Tolt, R.L. Fink “The Status and Future of Diamond Thin Film FED”, Si Diamond Technology, USA.
- [6] Iida M., Maekawa H., Kimura H., Akiba Y., Hirose Y., Kurosu T. and Matsumae Y. “Electrical Conduction Mechanism in Polycrystalline p-Type Diamond Films.” 2nd International Conference on the Applications of Diamond Films and Related Materials. 1993, pp. 367-370.
- [7] John R. Ferraro, Kazuo Nakamoto. **Introductory Raman Spectroscopy.** London : Academic Press.Inc. 1994
- [8] กอบศักดิ์ ศรีประภา. “การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบ ความร้อน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [9] พรศักดิ์ อรรถวานิช, วัสดุศาสตร์. พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ.2536
- [10] J. E. Field, “The Properties of Natural and Synthetic Diamond” , Academic Press Limited.1992.
- [11] J.E.Field. **The Properties of Diamond.** London : Academic Press, Inc. 1979.
- [12] สมเกียรติ สุขเกษ, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม” .คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542.
- [13] Gerold W.Neudeck, “The PN Junction Diode Second Edition” .Addison-Wesley Publishing Company. 1989.
- [14] Mauro Zambuto. “Semiconductor Devices” .McGraw-Hill. 1989.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] กอบศักดิ์ ศรีประภา และคณะ. "ผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองที่มีต่อการนิเวศชั้นของฟิล์มเพชร." ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, พฤศจิกายน 2541. หน้า 688-691.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

มวลอะตอมและมวลโมเลกุล

C	=	12.01115	
B	=	10.811	
O	=	15.9994	
H	=	1.00797	
C ₂ H ₅ OH	=	46.0695	
B ₂ O ₃	=	69.6202	

ความหนาแน่นของสารละลาย

C₂H₅OH 1 cm³ หนัก 0.796 กรัม

วิธีหาคำนวณหาอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอน (B:C)

ใช้อัตราส่วน B:C = 1 ppm ในสารละลาย 50 cm³ เป็นตัวเริ่มต้นหา

เนื่องจาก	C ₂ H ₅ OH	1 cm ³ หนัก	0.796	กรัม
	C ₂ H ₅ OH	50 cm ³ หนัก	0.796 x 50	= 39.80 กรัม

มวลโมเลกุลของ C₂H₅OH = 2(12.01115) + 6(1.00797) + 1(15.9994) = 46.0695 กรัม/โมล

ดังนั้น C₂H₅OH 1 โมล จะมี C อยู่ = 2(12.01115) = 24.023 กรัม

ซึ่ง C₂H₅OH 50 cm³ มีปริมาณ $\frac{39.80}{46.0695 \text{ กรัม / โมล}}$ = 0.8639 โมล

ดังนั้น C₂H₅OH 0.8639 โมล มี C อยู่ = 0.8639 x 24.023 = 20.7535 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{มวลโมเลกุลของ } B_2O_3 = 2(10.811) + 3(15.9994) = 69.6202 \text{ กรัม}$$

$$\text{ดังนั้น } B_2O_3 \text{ 1 โมล จะมี B อยู่} = 2(10.811) = 21.622 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น	B : C = 1 ppm	จะเท่ากับ	$\frac{1}{1 \times 10^6}$	
นั่นคือ	C	10^6 กรัม	จะมี B อยู่	1 กรัม
ถ้ามี	C	20.7535 กรัม	จะมี B อยู่เท่ากับ	2.07535×10^{-5} กรัม

ถ้า	B 21.622 กรัม	จะมีอยู่ใน B_2O_3	1	โมล
ดังนั้น	B 2.07535×10^{-5} กรัม	จะมีอยู่ใน B_2O_3 เท่ากับ	9.5983×10^{-7}	โมล

ฉะนั้นสำหรับ C_2H_5OH 50 cm^3

$$\text{จะต้องใช้ } B_2O_3 \text{ น้ำหนักเท่ากับ } (9.5983 \times 10^{-7}) (69.6202) = 6.6824 \times 10^{-5} \text{ กรัม}$$

ในโรงงานนี้ใช้ B : C เท่ากับ 10 ppm , 100 ppm , 1000 ppm ดังนั้นจะต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนักเท่ากับ

B : C = 10 ppm	ต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนัก	6.6824×10^{-4} กรัม
B : C = 100 ppm	ต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนัก	6.6824×10^{-3} กรัม
B : C = 1000 ppm	ต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนัก	6.6824×10^{-2} กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 ยอดความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สัมพันธ์จากระนาบของฟิล์มเพชร

หมายเลข	Interplanar spacing (Å)	2-theta	ความเข้มการเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์	hkl
1	2.0619	43.87	100	111
2	1.2610	75.30	25	220
3	1.0753	91.51	16	311
4	0.8913	119.60	8	400
5	0.8183	140.54	16	331

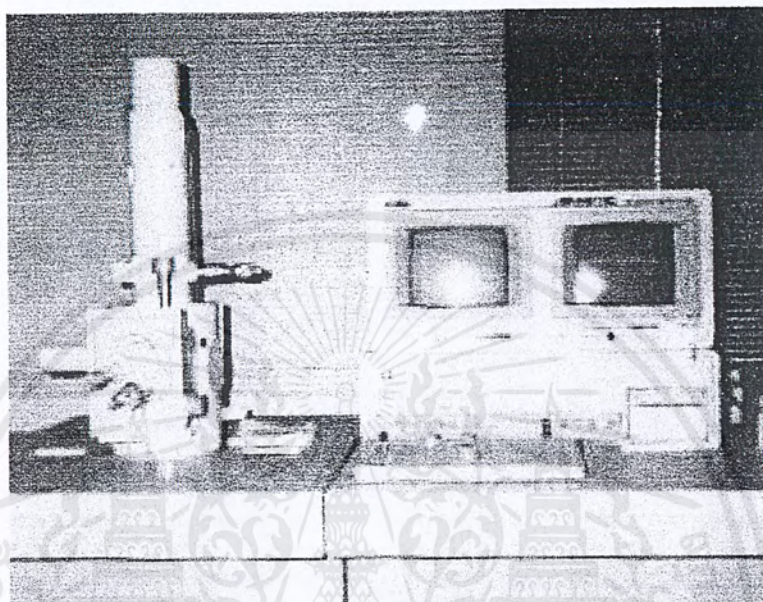
ตารางที่ ข-2 แสดงค่า Inter-planar spacing มาตรฐานของเพชร (ASTM 6-675)

Inter-planar spacing	hkl
2.06	111
1.261	220
1.0754	311
-	222
0.8916	400
0.8182	331
0.7280	422
0.6864	511 , 333
0.6305	440
0.6029	531

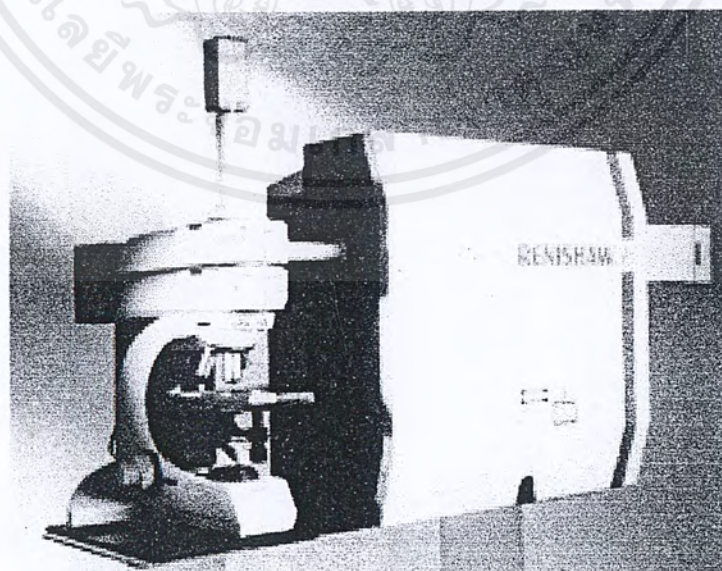
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ชุดเครื่องมือตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

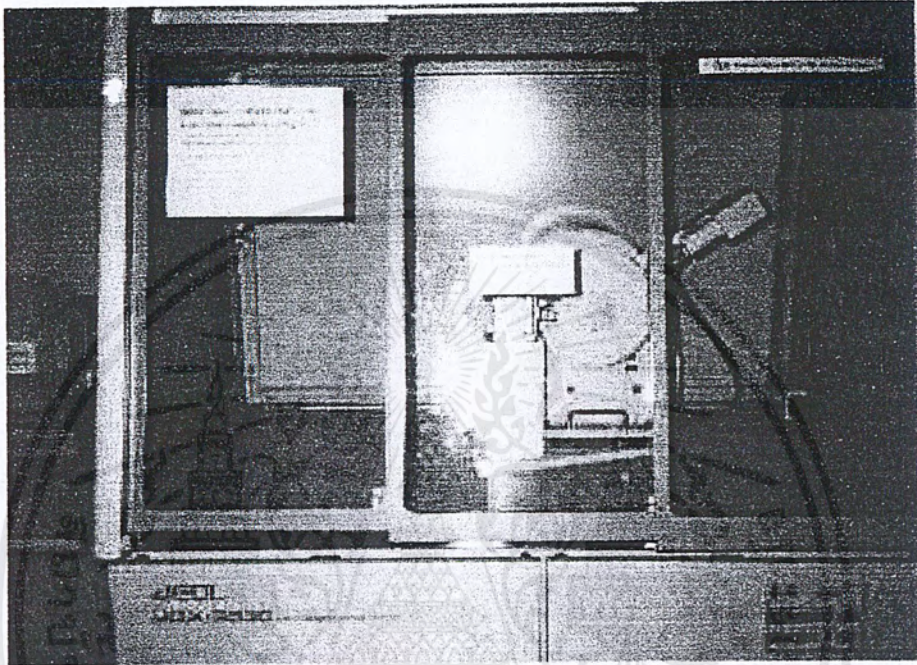


รูปที่ ก-1 เครื่อง Scanning electron microscope ของ JEOL รุ่น JSM-5410



รูปที่ ก-2 Raman Spectroscope รุ่น system 2000 ของบริษัท Renishaw

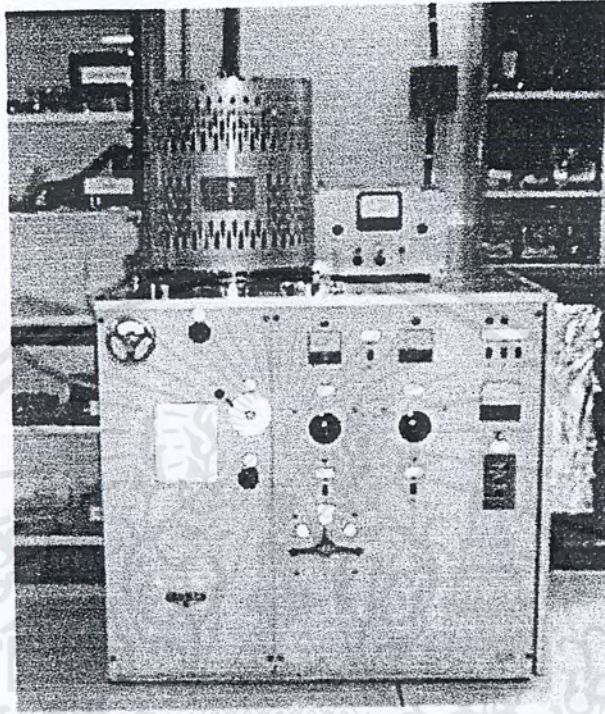
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



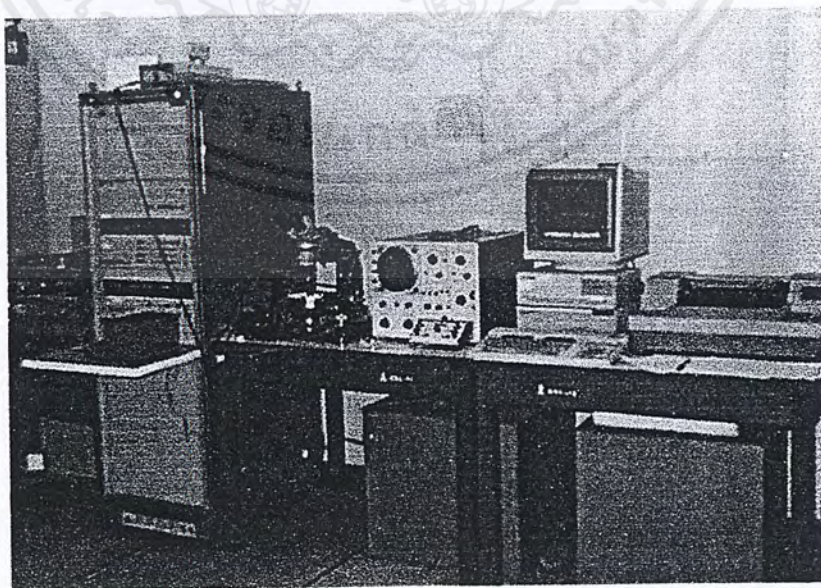
รูปที่ ก-3 Single Crystal X-ray Diffractometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง



รูปที่ ง-1 เครื่อง Vacuum Evaporator



รูปที่ ง-2 เครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/Component Test System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้