

การศึกษาและการสร้างไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/SI

THE STUDY AND FABRICATION OF DLC/SI HETEROJUNCTION DIODE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาขั้นต้นที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

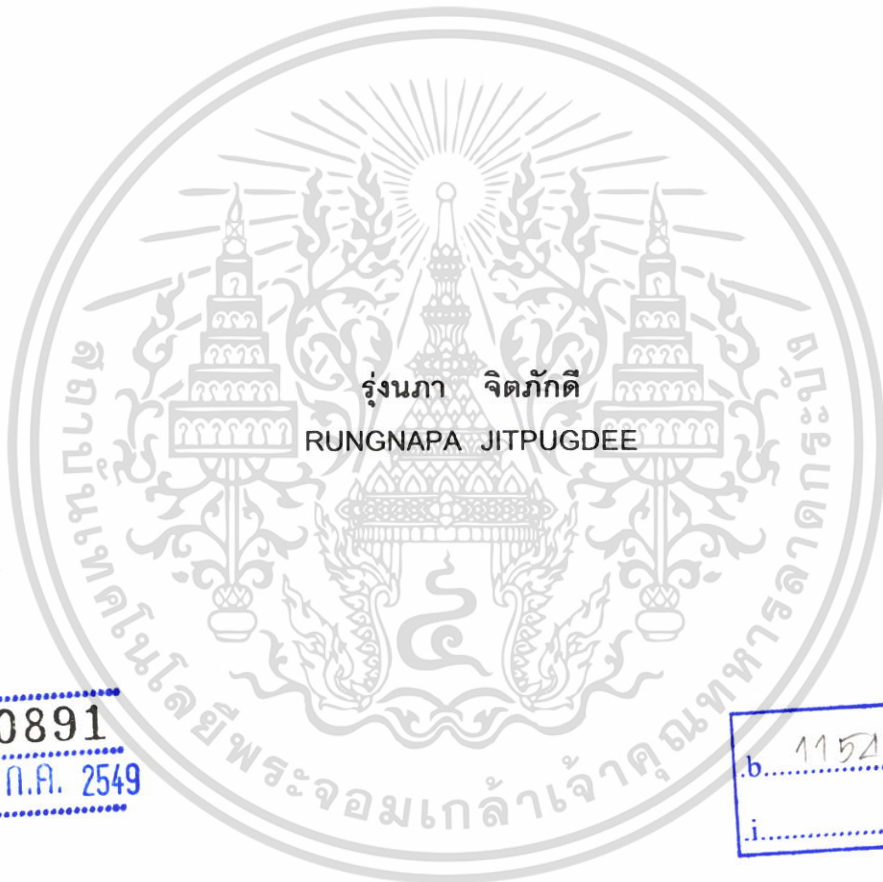
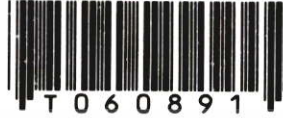
พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1820-3

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและการสร้างไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/Si

THE STUDY AND FABRICATION OF DLC/Si HETEROJUNCTION DIODE



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 60891
วัน,เดือน,ปี..... 6 ก.ค. 2549

b..... 11521039
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2548

ISBN 974 - 15 - 1829 - 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY AND FABRICATION OF DLC/Si HETEROJUNCTION DIODE



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

2005

ISBN 974 - 15 – 1829 - 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและการสร้างไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/Si
นักศึกษา	นางสาวรุ่งนภา จิตภักดี
รหัสประจำตัว	43061329
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมนั้นจะต้องมีการควบคุมการผลิตเพื่อให้มีคุณภาพคงที่อยู่เสมออีกทั้งกระบวนการตรวจสอบควรมีราคาถูกและรวดเร็วเราจึงนำเอาความสัมพันธ์ของเทคนิคการวิเคราะห์ sp^2 และ sp^3 จาก Raman Spectroscopy มาใช้เป็นตัวควบคุมคุณภาพของชั้นงานฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(Diamond Like Carbon) ซึ่งพบว่าเมื่อมีปริมาณ sp^3-C อยู่มาก ค่าความเค้นของงานจะมากตามไปด้วยและนอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาคูณสมบัติของ heterojunction ของ DLC / Si โดยพิจารณาคุณสมบัติการนำไฟฟ้ากระแสตรงทั้งชนิด DLC/p-Si และ DLC/n-Si ผลพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสและแรงดันไฟฟ้า (*I-V Characteristics*) ของ heterojunction DLC / Si จะมีค่าแรงดันภายใน(Built-in Voltage) 6 โวลต์เมื่อ heterojunction DLC / Si มี ชั้นฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) หนา 100 Å และมีค่าแรงดันพังทลาย(Breakdown Voltage) 97โวลต์ นอกจากนี้จากการทดลองยังพบอีกว่าค่าแรงดันภายในจะเปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) อีกด้วย จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้งานเพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ขณะใช้งานแบบไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Study and Fabrication of DLC/Si Heterojunction Diode
Student	Miss.Rungnapa Jitpugdee
Student ID.	43061329
Degree	Master of Engineering
Programme	Electronic Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

In industrial manufacturing process controlling quality of samples was very important. Good quality control process should be low cost and quick system. Then the correlation of analysis content of sp² and sp³ from Raman spectroscopy technique was used to be control quality of DLC samples. From this technique, it found that the content of sp³-C increased with stress of samples. Otherwise when studying characteristics of heterojunction DLC/Si by considering DC conductance property in DLC/p-Si and DLC/n-Si type. We found from the experimentals that the heterojunction DLC/Si had build-in voltage 6 volts and breakdown voltage 97 volts when the thickness of DLC is 100 Å. In addition I-V characteristics of this heterojunction diode depend on heterojunction DLC/Si had build-in voltage various with thickness of film DLC we can apply the characteristic of DLC / Si to be new electronic device to control current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความสามารถของ รศ.ดร. วิสุทธิ์ รุจิรุ่งเรือง ที่ให้ความรู้แนวทางในการแก้ไขปัญหาและช่วยสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบพระคุณ คุณจรรยา นามเสนาะ เป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ คุณลัดดาวัลย์ สุภาดี, คุณกนกทวี บำรุงศักดิ์และคุณศรัณย์ สาตารมณ ที่ให้การช่วยเหลือมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้อำนาจและให้การสนับสนุนทั้งด้านกำลังทรัพย์และกำลังใจตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
ศัพท์เทคนิค.....	XIII
สัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 เทคโนโลยีต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร.....	1
1.2.1 Arc-Evaporation Deposition.....	1
1.2.2 Ion beam Deposition Technology.....	2
1.2.3 Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition Technology.....	5
1.2.4 Microwave Plasma CVD (MPCVD) Technology.....	6
1.2.5 Hot Filament Chemical Vapor Deposition Technology.....	6
1.2.6 Alternating Current Assisted CVD Technology.....	7
1.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC), เพชรและรูปต่างๆ ของคาร์บอน.....	9
2.2.1 ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร “DLC” (Diamond Like Carbon Film).....	9
2.2.2 เพชร (Diamond)	10
2.2.3 Microcrystalline Carbon.....	12
2.2.4 Amorphous Carbon.....	13
2.2.5 Lonsdaleite.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 สมดุลยภาพของคาร์บอน	14
2.4 หลักการพื้นฐานของวิธี Ion Beam CVD.....	15
2.5 หลักการทำงานของระบบ Ion Beam CVD.....	17
2.5.1 ปฏิกิริยาการณินิวคลีเอชัน	17
2.6 การวิเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์.....	21
2.6.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM).....	21
2.6.2 การวิเคราะห์ด้วย Atomic Force Microscope (AFM)	23
2.6.3 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscope.....	27
2.6.4 การวิเคราะห์ด้วย Ellipsometer.....	31
2.7 คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	33
2.7.1 คุณสมบัติของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรเมื่อเปรียบเทียบกับเพชร.....	33
2.8 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ พี	34
2.8.1 สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น.....	34
2.8.2 สารกึ่งตัวนำชนิด พี.....	35
2.9 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	36
2.10 รอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกัน	36
2.11 สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำไดโอด	38
2.11.1 ไดโอดในอุดมคติ.....	38
2.11.2 ไดโอดในทางปฏิบัติ.....	39
2.11.3 ขอตตัก ไดโอด.....	40
2.11.4 แบคเจอร์ดไดโอด.....	41
2.12 ความรู้เกี่ยวกับซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode).....	43
2.12.1 การพังทลายของซีเนอร์ (Zener Breakdown).....	44
2.12.2 คุณลักษณะของการพังทลาย (Breakdown Characteristics).....	44
2.12.3 วงจรสมมูลของซีเนอร์ไดโอด.....	44
2.13 การประยุกต์ใช้งานซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode).....	45
2.13.1 การควบคุมแรงดันขาออกให้คงที่เมื่อแรงดันขาเข้าเปลี่ยนแปลง.....	45
2.13.2 การควบคุมแรงดันเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13.2 วงจรซีเนอร์ไดโอดตัดรูปคลื่น.....	46
บทที่ 3 การทดลอง	48
3.1 กระบวนการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรบนฐานรองซิลิกอน	48
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	48
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ Ion Beam CVD	48
3.1.3 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	48
3.1.4 ชุดอุปกรณ์วัดคุณสมบัติฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	50
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร.....	50
3.3 กระบวนการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรบนฐานรองซิลิกอนและแก้ว.....	51
3.4 การทดลองเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	51
3.5 การเตรียมฐานรอง.....	52
3.6 การทดลองวัดค่าความเค้นโดยอ้อมโดยไม่ทำลายชิ้นงาน.....	52
3.7 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	54
3.8 กระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง DLC/n-Si และ DLC/p-Si.....	55
3.9 การทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆ ของ DLC และซิลิกอน.....	56
3.9.1 การวัดความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอน.....	56
3.9.2 การวัดความต้านทานไฟฟ้าของ DLC ที่สังเคราะห์บนแก้ว.....	51
3.10 การทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆ ของ DLC/n-Si และ DLC/p-Si.....	57
3.11 นำไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/n-Si มาประยุกต์ใช้งานในวงจร.....	58
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์	59
4.1 ผลการศึกษาการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	59
4.2 ผลการทดลองหาเงื่อนไขของเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ด้วยวิธี Ion Beam CVD.....	59
4.3 ผลการทดลองตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	60
4.3.1 ผลการวัดคุณสมบัติฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) โดยใช้เทคนิค Raman.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) โดยใช้เทคนิค AFM.....	62
4.3.3 ผลการวัดความเค้นฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) โดยใช้ Tencor.....	68
4.4 ผลการทดลองวัดค่าความเค้นโดยอ้อมโดยไม่ทำลายชิ้นงาน.....	69
4.5 ผลทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆ ของ DLC และ ซิลิกอน.....	71
4.5.1 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอน.....	71
4.5.2 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร.....	72
4.6 ผลการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ DLC/n-Si.....	73
4.7 ผลการทดลองนำไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/n-Si มาประยุกต์ ใช้งานในวงจร.....	87
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเปรียบเทียบการใช้เทคนิคในการวิเคราะห์พื้นผิวชนิดต่างๆ.....	23
2.2 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน.....	29
2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่สังเคราะห์ จากวิธีการต่างๆ.....	34
3.1 แสดงเวลาในการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) เพื่อใช้ ในการทดสอบความ เค้น และค่า Raman.....	54
3.2 แสดงเวลาในการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	56
4.1 เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรด้วยวิธี IBCVD.....	59
4.2 เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	60
4.3 ตัวอย่างชิ้นงาน 5 ชิ้นดั่งนี้ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี IBCVD มีความหนาต่างๆ กัน.....	61
4.4 ค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ของ D ในชิ้นงานฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่วัดได้ จากเทคนิค Raman.....	62
4.5 ค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ของ G ในชิ้นงานฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่วัดได้ จากเทคนิค Raman.....	62
4.6 ผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรด้วยวิธีโดย AFM.....	68
4.7 ค่าความเค้นของชิ้นงานชิ้นงาน DLC ที่วัดได้จากเครื่อง Tencor.....	68
4.8 ค่าความเค้นและค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของชิ้นงานฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่วัดได้จากเครื่อง Tencor และ Raman จากผลการทดลอง 4.3.1 และ 4.3.2.....	69
4.9 แสดงผลการวัดความต้านทานไฟฟ้า DLC ที่มีความหนาต่างค่าต่างกัน.....	72
4.10 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟและแรงดันไฟฟ้าของ DLC/n-Si ที่มี ความหนาต่างกัน.....	82

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ FCVA.....	2
1.2 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ Ion Beam CVD.....	3
1.3 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 1.....	3
1.4 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 2.....	4
1.5 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVDของทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 3.....	4
1.6 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ Plasma – Enhanced.....	5
1.7 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD.....	6
1.8 การประยุกต์ใช้งานเคลือบหัวอ่าน – เขียน.....	7
2.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของคาร์บอน.....	8
2.2 Raman Spectrum ของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	9
2.3 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	9
2.4 คาร์บอนอะตอมใน DLC เกิดจากการโครงสร้างการไฮบริดเซชัน 2 แบบคือ sp^2 และ sp^3 ...	10
2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร	11
2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราไฟต์	12
2.7 แสดงแผนภาพสมดุลงานของคาร์บอน	14
2.8 ชนิดของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	15
2.9 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ Ion Beam CVD	16
2.10 กลไกการนิวคลีเอชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง.....	18
2.11 การนิวคลีเอชันบนชั้นอินเตอร์มีเดียท	19
2.12 รูปร่างของไฮบริดออร์บิทัลของคาร์บอน.....	20
2.13 เครื่องมือวัด SEM.....	21
2.14 แสดงตัวอย่างที่ได้จากภาพถ่าย SEM.....	22
2.15 เครื่องมือวัด AFM.....	24
2.16 แผนภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วย AFM.....	24
2.17 การเปลี่ยนแปลงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics).....	25
2.18 วงจรป้อนกลับ (Feedback circuit) ของ AFM.....	25
2.19 แผนภาพของ Scanning Probe Microscope (SPM).....	26
2.20 ภาพสามมิติจากการวิเคราะห์ด้วย AFM.....	26

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 เครื่องมือวัด Raman.....	27
2.22 แสดง Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างๆ กัน (a) 0.5% CH ₄ /H ₂ (b) 2% CH ₄ /H ₂ (c) 5% CH ₄ /H ₂	28
2.23 Raman Spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ Raman spectroscope.....	30
2.24 Raman Spectrum ของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	30
2.25 เครื่องมือวัด Ellipsometer.....	31
2.26 แสดงไดอะแกรมการหาผลลัพท์ Ellipsometry.....	32
2.27 แสดงการทดลองวัด Ellipsometry.....	33
2.28 แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่าง อะตอมสารเจือชนิด เอ็น และอะตอมสารกึ่งตัวนำ.....	35
2.29 แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่าง อะตอมสารเจือชนิด พี และอะตอมสารกึ่งตัวนำ.....	35
2.30 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่แยกกันอยู่.....	37
2.31 แสดงแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน แบบชนิดเอ็น และชนิดพี ที่สภาวะ สมดุลย์.....	38
2.32 แสดงไดโอดในอุดมคติ.....	39
2.33 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดัน ของไดโอดในทางปฏิบัติ.....	39
2.34 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของขอตติ์ไดโอด.....	40
2.35 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ แบคเวอริตไดโอดชนิดที่มี ความต้านทานเชิงลบ.....	41
2.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของ แบคเวอริตไดโอดชนิดที่ไม่มี ความต้านทานเชิง.....	41
2.37 แสดงปรากฏการณ์การทะลุผ่านของไดโอด ขณะ ก) ไม่มีแรงดันไบแอส ข) ได้รับแรงดัน ไบแอสย้อนกลับ.....	42
2.38 แสดงสัญลักษณ์ของซีเนอร์ไดโอด.....	43
2.39 แสดงกราฟลักษณะสมบัติทางกระแสและแรงดันของซีเนอร์ไดโอด.....	43
2.40 แสดงวงจรสมมูลของซีเนอร์ไดโอดและการหาค่าความต้านทานภายในของซีเนอร์ไดโอด.....	45
2.41 แสดงการควบคุมแรงดันขาออกให้คงที่เมื่อแรงดันขาเข้าเปลี่ยนแปลง.....	45
2.42 แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดเมื่อโหลดมีค่าความต้านทานไม่คงที่.....	46
2.43 แสดงการใช้ซีเนอร์ในวงจรตัดรูปคลื่น.....	47
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) Ion Beam CVD.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	49
3.3 ชุดอุปกรณ์วัดคุณสมบัติฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	50
3.4 โดอะแกรมระบบ IBCVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	51
3.5 โดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 1.....	53
3.6 โดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 2.....	53
3.7 โดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 3.....	54
3.8 ไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/n-Si.....	55
3.9 การวัดความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอน.....	56
3.10 การวัดความต้านทานไฟฟ้าฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	57
3.11 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/n-Si.....	57
3.12 ไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/n-Si ประยุกต์ใช้งานในวงจร.....	58
4.1 ค่า Raman spectrum ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	61
4.2 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 นาที ที่วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM.....	63
4.3 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 8 นาที ที่วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM.....	64
4.4 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 12 นาที ที่วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM.....	65
4.5 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 16 นาที ที่วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM.....	66
4.6 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที ที่วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM.....	67
4.7 แสดงความสัมพันธ์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของชั้นงาน DLC ที่วัดได้จากเทคนิค Raman เพื่อหาค่าความเค้นโดยอ้อม.....	70
4.8 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอน.....	71
4.9 ตัวอย่างผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) หนา 100 \AA°	72
4.10 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 100 \AA°	73

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 200 Å°.....	74
4.12 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 300 Å°.....	75
4.13 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 400 Å°.....	76
4.14 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 500 Å°.....	77
4.15 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 100 Å°.....	78
4.16 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 200 Å°.....	78
4.17 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 300 Å°.....	79
4.18 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 400 Å°.....	79
4.19 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 500 Å°.....	80
4.20 ตัวอย่างการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 100 Å°.....	80
4.21 ความสัมพันธ์ของ In (I) กับแรงดันไฟฟ้า heterrojunction DLC/n-Si ขณะไบอัสตรง.....	81
4.22 ความสัมพันธ์ของ In (I) กับแรงดันไฟฟ้า heterrojunction DLC/n-Si ขณะไบอัสกลับ.....	81
4.23 รูปแถบพลังงานของโลหะกับเพชร.....	84
4.24 แถบพลังงานระหว่างซิลิกอนกับฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	85
4.25 แนวสนามที่สิ้นสุดลงที่ที่ประจุลบบกพร่องในเซตปลอดพาหะหลังพื้นผิวที่ไม่ได้ปิด (underminated surface) เป็นเหตุให้แถบพลังงานหักลงอย่างรุนแรง.....	86
4.26 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/n-Si.....	87
4.27 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ ซิเนอร์ไดโอด.....	88
4.28 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/n-Si.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.29 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/n-Si.90

4.30 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ heterrojunction DLC/n-Si.91



สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

\AA	หน่วยความยาว
E_0	ระดับพลังงานที่สูญญากาศ
E_c	ระดับพลังงานความนำ
E_F	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน
E_v	ระดับพลังงานวาเลนซ์
f_T	ความถี่คัทออฟ
g_m	ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์
h	ค่าคงที่ของPlanck
k	ค่าคงที่ของ Boltzman
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส
m^*_h	ค่ามวลยังผลของโฮล
N_A	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ
p	ค่าความหนาแน่นของโฮล
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์
V_a	แรงดันไบอัสภายนอก
V_{bi}	แรงดันภายใน
V_p	แรงดันพินช์ออฟ
V_{pt}	แรงดันพินช์ทรู
V_T	แรงดันซีดีเริ่ม
W	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
Z	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส
ρ	ค่าพิกิตความต้านทาน
ϕ_B	ค่าความสูงกำแพงศักย์ต่อหนึ่ง
ϕ_m	ฟังก์ชันของโลหะต่อหนึ่งอิเล็กตรอน
ϕ_s	ฟังก์ชันงานสารกึ่งตัวนำต่อหนึ่งอิเล็กตรอน

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

μ_p

χ_s

ϵ

ความหมาย

ค่าความคล่องตัวของโพล

อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

ค่า permittivity ของสารกึ่งตัวนำ



ศัพท์ทางเทคนิค

กระแสดริฟต์	Drift Current
กระแสเดรน	Drain Current
กระแสอิ่มตัว	Saturated Current
กราไฟต์	Graphite
กล้องถ่ายภาพย่อส่วน	Reduction Camera
การตอบสนองความถี่	Frequency Response
การนิวเคลียเซชัน	Nucleation
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	X-ray Diffraction
กาวเงิน	Silver Paste
ขบวนการโฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
ครีมเพชร	Diamond Paste
ความถี่คัทออฟ	Cut-off Frequency
ความสูงของกำแพงศักย์	Barrier Height
ค่าคงที่แลตทิซ	Lattice Constant
เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ	Vacuum Evaporator
เครื่องสั่นความถี่สูง	Ultrasonic Cleaning
ช่องทางเดินกระแส	Channel
ขอตักไดโอด	Schottky Diode
ชั้นความนำไฟฟ้า	Conductive Layer
ซินเตอร์ริง	Sintering
ฐานรอง	Substrate
ดีพลีชันโหมด	Depletion Mode
ไตรคลอโรเอทิลีน	Trichloroethylene
ทรานส์คอนดักแตนซ์	Transconductance
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized Water
บริเวณปลอดพาหะ	Depletion Region
ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	Bipolar Transistor
ไบอัสกลับ	Reverse Bias

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์ทางเทคนิค(ต่อ)

ไบอัสตรง	Forward Bias
ประจุพาหะส่วนมาก	Majority Carrier
ปรากฏการณ์ซีเบก	Seebeck Effect
พินช์ออฟ	Pinch Off
ฟังก์ชันงาน	Work Function
ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก	Intrinsic Diamond Film
โฟโตมาสก์	Photo Mask
ภาวะสมดุลความร้อน	Thermal Equilibrium
ยูนิตเซลล์	Unit Cell
ยูนีโพลาทรานซิสเตอร์	Unipolar Transistor
รอยสัมผัสแบบชอตต์กี	Schottky Contact
รอยสัมผัสแบบโอห์มิก	Ohmic Contact
แรงดันขีดเริ่ม	Threshold Voltage
แรงดันภายใน	Built-in Voltage
แลตทิซ	Lattice
วงแหวนหกเหลี่ยม	Tetrahedral
สัญญาณรบกวน	Noise
สารกึ่งฉนวน	Semi-insulating
ไส้ทังสเตน	Tungsten Wire
ออกไซด์	Oxide
อิเล็กตรอน	Electron
อิเล็กตรอนอันดับที่สอง	Secondary Electron
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	Electronic Device
เอทิลแอลกอฮอล์	Ethyl-alcohol
เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด	Enhancement Mode
แอนนัล	Anneal
โฮล	Hole
ไฮโดรคาร์บอน	Hydrocarbon
ไฮโดรเจนเทอร์มิเนชัน	H-Termination

บทที่ 1

บทนำ

ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) เป็นฟิล์มซึ่งสร้างง่ายและมีราคาถูกมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ ได้แก่ มีความเสถียรภาพทางอุณหภูมิและเคมี, มีความสามารถในการยึดติดพื้นผิวต่างๆ ได้ดี รวมถึงไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีชีวิต จากคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ทำให้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) มีคุณสมบัติการเคลือบผิวได้ดี และถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น กำลังมีการวิจัยเพื่อนำฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) มาใช้ในวงการแพทย์นอกจากนี้ยังคาดว่าจะสามารถนำฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) มาใช้ในงานเกี่ยวกับ microelectronic ที่ทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงได้อีกด้วย

1.1 ความเป็นมา

Aisenberg และ Chabot เป็นผู้คิดค้นสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ขึ้นเป็นครั้งแรก โดยเขาได้สังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนลงบนแท่งเหล็ก กระตุ้นให้เกิดการวิจัยเรื่องนี้ขึ้นอีกเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสังเคราะห์ทางฟิสิก และ การสังเคราะห์ด้วยไอเคมี สำหรับ a-C ขึ้นราวศตวรรษที่ 18 Antoine Laurent Lavoisier ได้ค้นพบเพชรเป็นรูปผลึกของคาร์บอน นักทดลองได้พยายามสังเคราะห์เพชรขึ้น ซึ่งผู้ประสบความสำเร็จเป็นคนแรก คือ William G.Eversole แห่ง Union Carbideการพัฒนากระบวนการสร้างผลึกเพชรแบบ CVD ส่วนใหญ่ถูกเผยแพร่มาจาก Eversole ใน U.S. และ Spitsyn กับทีมงาน ใน Soviet Union

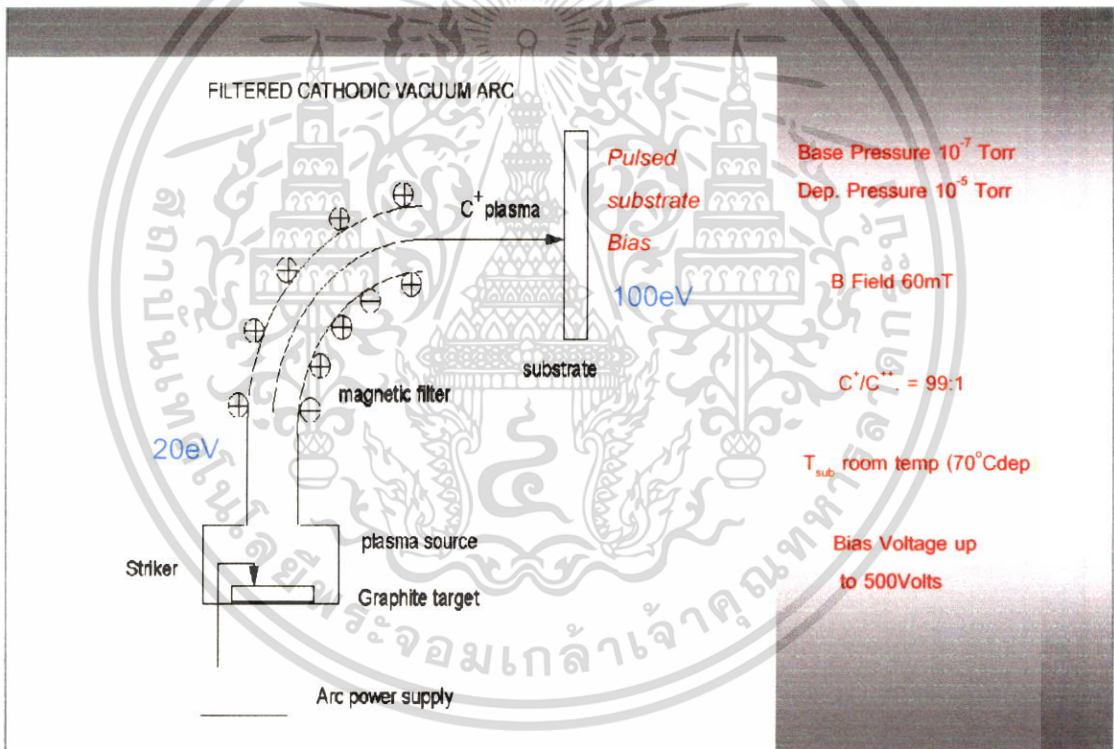
1.2 เทคโนโลยีต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)

1.2.1 Arc-Evaporation Deposition Filtered Cathodic Vacuum Arc Technology

วิธีการเคลือบผิววัสดุอุปกรณ์แบบ arc-evaporation deposition เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย หากแต่ในการเคลือบผิวนั้น มักมีอนุภาคที่ไม่ต้องการกระจายตัวปะปนอยู่ด้วย ทำให้ประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นบริษัท Nanofilm Technology International Pte., Ltd จึงได้พัฒนากกรรมวิธีการเคลือบอนุภาคสารแบบใหม่ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่า โดยเรียกว่าวิธีการนี้ว่า Filtered Cathodic Vacuum Arc (FCVA) การทำงานของวิธีการดังกล่าวอนุ Tetrahedral Amorphous Carbon (ta-C), โลหะ, ออกไซด์ และอื่นๆ จะเคลือบผิวได้อย่างดีที่สุดตามที่ต้องการ โดยในระหว่างที่อนุเหล่านี้เรียงตัวลงบนเคลือบผิว ขบวนการ cathodic vacuum arc จะทำให้ลำแสงพลาสมาซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มอนุภาคเล็กๆ และอะตอมที่เป็นกลาง แพร่กระจายออกจากจุด cathodic arc spot และ ในระหว่างนั้นอนุภาคและอะตอมต่างๆ ที่ไม่ต้องการ จะถูกกรองออกสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้เหล็กไฟฟ้าเหลือเพียงไอออนที่มีพลังงานอยู่ในช่วงที่ต้องการเท่านั้นที่จะตกลงเคลือบผิวได้ วิธีการดังกล่าวทำให้ได้แผ่นฟิล์มเคลือบผิวที่มีความแข็งแรง แน่นและสะอาด ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดี โดยแผ่นฟิล์มจะมีคุณสมบัติที่ดีตามที่ต้องการไม่ว่าจะเป็น การยึดติดกับพื้นผิว, ความใส, คุณสมบัติทางเคมี, คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางกลศาสตร์ยิ่งไปกว่านั้น ระยะเวลาที่มีการเคลือบ พื้นผิวสัมผัสจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 70°C ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้การเคลือบผิวพลาสติกทำได้ดียิ่งขึ้น ต่างจากเทคโนโลยีการเคลือบผิวที่เคยมีมา (เช่น การเคลือบละอองไอโดยทางเคมีหรือทางกายภาพ) วิธีการ FCVA เป็นการเคลือบด้วยไอออนบริสุทธิ์ 100% ซึ่งเป็นไอออนที่มีช่วงพลังงานตามที่ต้องการ และด้วยเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ทำให้สามารถผลิตฟิล์มเคลือบที่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆ อย่างเช่น ta-C และ Al_2O_3 ประสิทธิภาพสูงได้

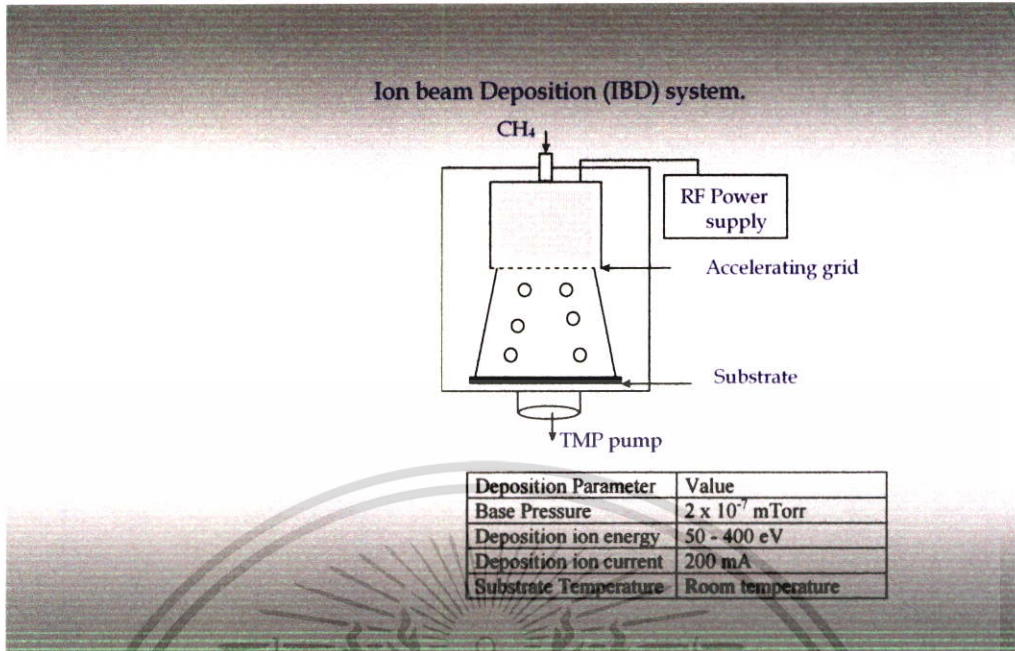


รูปที่ 1.1 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ FCVA

1.2.2 Ion Beam Deposition Technology

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Ion beam จะมีกระบวนการทำงานประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

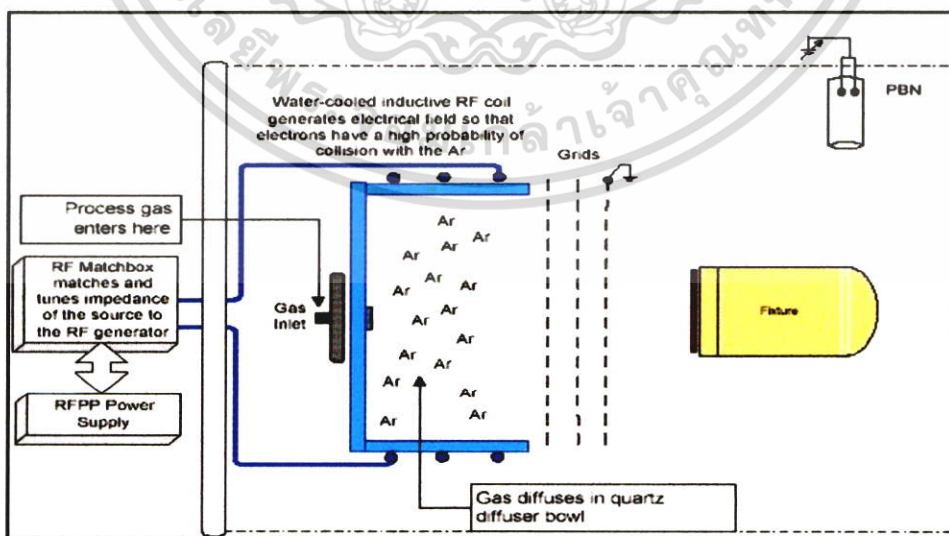
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ Ion Beam CVD

1.2.2.1 กระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวของฐานรองมีขั้นตอนการทำงาน 3 ขั้นตอนดังนี้

1.2.2.1.1 ขั้นตอนแรกปั๊มสุญญากาศจะดูดอากาศภายใน chamber ซึ่งภายใน chamber จะมีค่าความดัน 3×10^{-4} torr ให้มีค่าความดันมีค่าเท่ากับ 7×10^{-6} torr ขั้นตอนที่สองก๊าซจากนอกจะไหลเข้าสู่ chamber ด้วยอัตราความเร็ว 25 sccm



รูปที่ 1.3 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองขั้นตอนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนโดยมีเงื่อนไขในการสร้างดังนี้

1.2.2.2.1 ก๊าซออกซิเจนจะไหลเข้าสู่ chamber ด้วยอัตราการความเร็ว 25 sccm

1.2.2.2.2 Discharge voltage 40 volt

1.2.2.2.3 ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 30 นาที

1.2.2.3 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรโดยมีเงื่อนไขในการสร้างดังนี้

1.2.2.3.1 อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_2$ 4:1

1.2.2.3.2 อุณหภูมิของฐานรอง 40-50°C

1.2.2.3.3 อัตราการไหลของก๊าซ CH_4 40 ลบ.ซม./วินาที และ C_2H_2 10 ลบ

ซม/ วินาที

1.2.2.3.4 ระยะระหว่างปืนกับฐานรอง 15 ซม

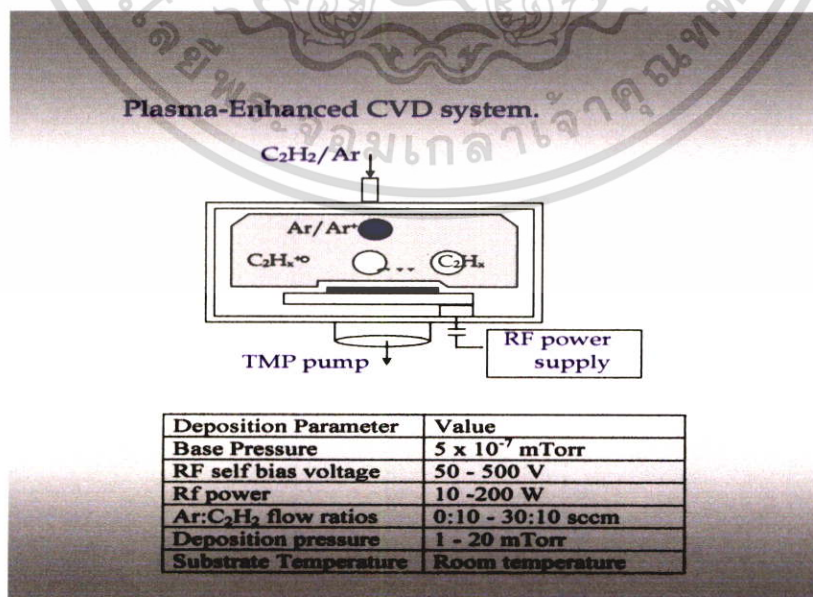
1.2.2.3.5 RF Power 350 Watts

1.2.2.4 กระบวนการทำความสะอาด chamber

1.2.2.4.1 ก๊าซออกซิเจนจะไหลเข้าสู่ chamber ด้วยอัตราการความเร็ว 20 sccm

1.2.2.4.2 RF Power 385 Watts

1.2.3 Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition Technology



รูปที่ 1.6 โดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ Plasma - Enhanced CVD

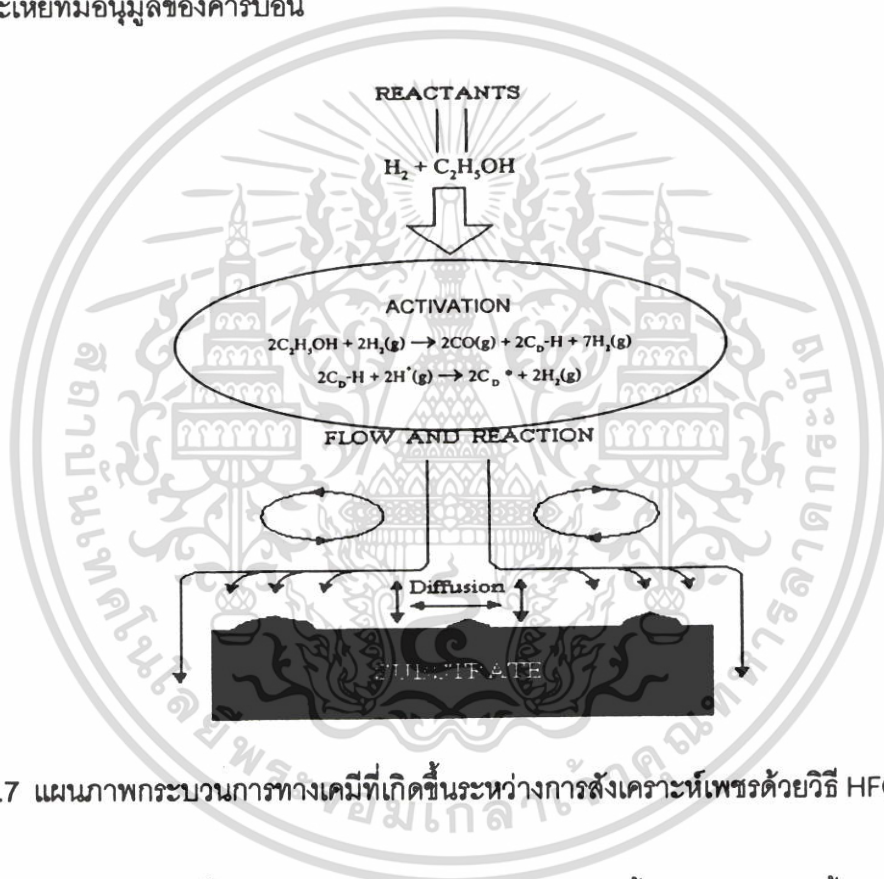
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.4 Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition (MPCVD) Technology

เป็นวิธีการตกสะสมไอเคมีในพลาสมาจากคลื่นไมโครเวฟ

1.2.5 Hot Filament Chemical Vapor Deposition Technology

การสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) วิธี CVD แบบขดลวดความร้อน (Hot Filament CVD) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ความดันต่ำหรือความดันบรรยากาศ และเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน และที่สำคัญคือ ต้นทุนในการสร้างต่ำ โดยจะมีหลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 1.7 ซึ่งในที่นี้มีเอทิล-แอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) เป็นไอระเหยที่มีอนุมูลของคาร์บอน



รูปที่ 1.7 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD

1.2.5.1 หลักการพื้นฐานของระบบ CVD แบบความร้อนนั้นจะต้องมีกลไกพื้นฐานดังนี้

1.2.5.1.1 ในระบบต้องมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

Angus et al. ได้เสนอถึงพฤติกรรมของอะตอมไฮโดรเจน เป็นส่วนสำคัญในการกำจัดและลดปริมาณกราฟไฟต์ ทำให้อะตอมคาร์บอนโครงสร้างเพชรยังคงมีพันธะแบบ sp^3 อยู่ นอกจากนั้นยังคงช่วยให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้นด้วย เนื่องจากไฮโดรเจนจะเข้าไปก่อกำหนดอะตอมคาร์บอนบริเวณพื้นผิวที่พันธะขาดอยู่ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะแบบ sp^3 ของเพชรไปเป็นแบบ sp^2 หรือ sp^1 ได้

1.2.5.1.2 ในระบบต้องมีก๊าซที่มีอนุมูลคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณที่มีการกระตุ้น (Activation) ก๊าซทั้งสองชนิด สำหรับวิธี CVD แบบ hot-filament จะอาศัยความร้อนจากอุณหภูมิประมาณ 2000 องศาเซลเซียส ของขดลวดความร้อนทั้งสแตน เป็นผลให้โมเลกุลของก๊าซทั้งสองเกิดการแตกตัวเป็นคาร์บอนอะตอม และไฮโดรเจนอะตอม ปฏิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งผ่านจากบริเวณกระตุ้นไปยังฐานรอง โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิและแรงเป่าก๊าซเฟส

1.2.5.1.3 ในระบบต้องมีอุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนี้ อุณหภูมิมีความสำคัญอย่างมากต่อการก่อตัวและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนให้อยู่ในโครงสร้างเพชร รวมทั้งระนาบของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นด้วย Spitsyn et al. เสนอผลการทดลองไว้ว่า อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสมทำให้เกิดเป็นเพชรได้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 500 - 1200 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับวิธีการใช้ และนอกจากนี้อุณหภูมิของฐานรองยังมีผลต่อการเกิดระนาบของฟิล์มเพชรด้วย

1.2.5.1.4 ในระบบต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

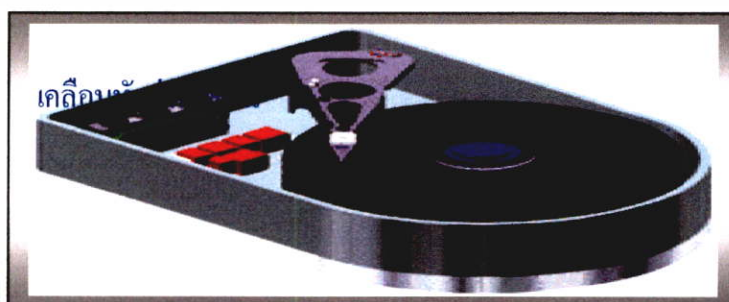
การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแต่ละครั้งพบว่า การเลือกใช้ฐานรองที่จะนำมาสร้างมีส่วนสำคัญมากเช่นกัน เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวของฐานรองมีผลต่อลักษณะการก่อตัวของเพชรได้แก่ ความหนาแน่นและอัตราการนิวเคลียส เป็นต้น กระบวนการเตรียมพื้นผิวมีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะให้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังรวมไปถึงฐานรองที่ใช้

1.2.6 Alternating Current Assisted Chemical Vapor Deposition Technology

เป็นวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ

1.3 การประยุกต์ใช้งาน

ปัจจุบันฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อป้องกันหัวอ่าน - เขียน และแพลงเตอร์ของฮาร์ดดิสไดรฟ์



รูปที่ 1.7 การประยุกต์ใช้งานเคลือบหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสไดรฟ์

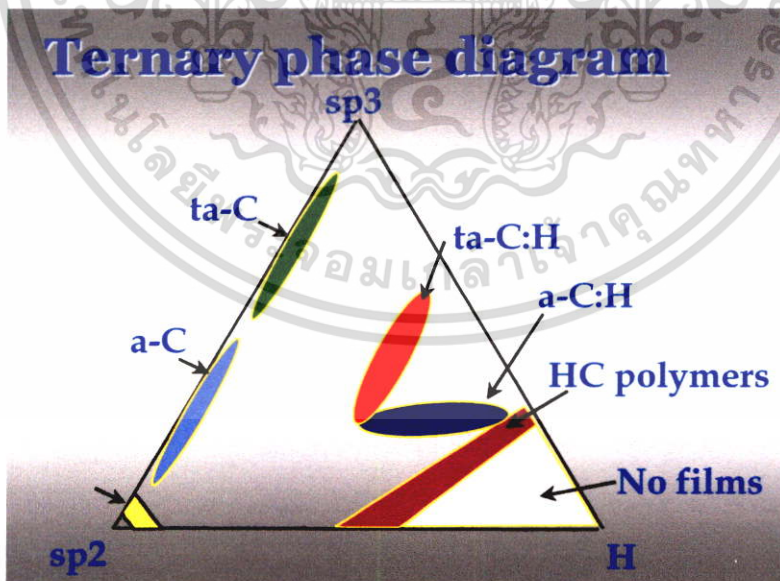
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

ทฤษฎีของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) และ หลักการควบคุมการเกิดฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) คาร์บอนเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 4 โดยทั่วไปแล้วเมื่อก้าวถึงคาร์บอนเรามักจะนึกถึงถ่านอันเป็นรูปหนึ่ง ของมันที่พบได้ง่ายแต่แท้จริงแล้วคาร์บอนยังสามารถอยู่ในรูปอื่นได้อีก อาทิ เช่น กราไฟต์ หรือ เพชร เป็นต้น ตลอดจนปัจจุบันมีผู้สนใจศึกษาถึงการสร้าง และ นำฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) มาใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะ เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) นั้น จำเป็นต้องมีอะตอมคาร์บอนในระบบเพื่อที่จะทำให้เกิดฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ขึ้นมา แต่ในบางครั้งพบว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่มีคุณสมบัติเป็นคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) หรือมีคุณสมบัติของสารชนิดอื่นอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น กราไฟต์, อะมอร์ฟัสคาร์บอน (Amorphous carbon), Microcrystalline carbon และ Lonsdaleite ซึ่งสารที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ก็คือรูปต่างๆ ของคาร์บอนนั่นเอง โดยสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันไปแล้วแต่ลักษณะโครงสร้างภายใน ดังนั้นหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึง รูปต่างๆ ของคาร์บอนที่มักพบในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)



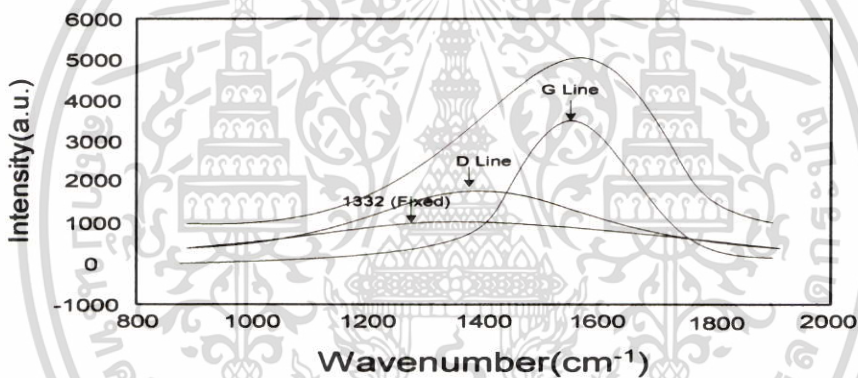
รูปที่ 2.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

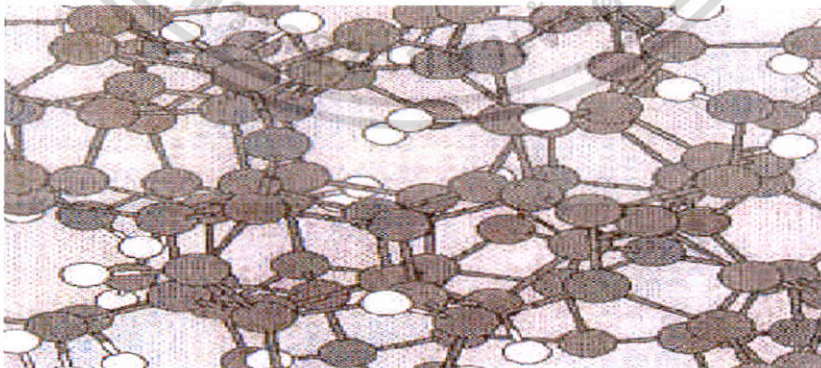
2.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ,เพชร และ รูปต่างๆของคาร์บอน

2.2.1 ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร “DLC” (Diamond Like Carbon Film)

เป็นอะมอร์ฟิสม์คาร์บอนฟิล์ม มีส่วนประกอบทั้งส่วนที่เป็น กราไฟต์และเพชร คาร์บอนอะตอมใน DLC ปกติแล้วสมมุติว่าเกิดจากโครงสร้างการไฮบริไดเซชัน 2 แบบ คือ sp^2 และ sp^3 รูปแบบการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบแรกเป็นคุณลักษณะของโครงสร้างของแกรไฟต์ ให้ Raman band มีพีคสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1580 cm^{-1} รู้จักกันในชื่อ G-Band สำหรับโครงสร้างเพชร สเปกตรัมของ Raman เป็นพีคแคบที่ 1332 cm^{-1} ส่วนโครงสร้างของแกรไฟต์แบบผลึกหลายรูปจะมีพีคสูงสุดอยู่ที่ 1360 cm^{-1} ซึ่งเป็นดิสทอร์เตอร์จากโหมดการสั่นที่ขอบเขตเกรนของแกรไฟต์ให้เข้าสู่โครงสร้าง sp^3 ถูกเรียกว่า D-Band

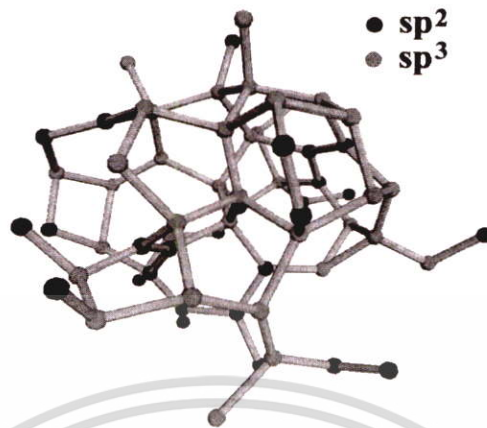


รูปที่ 2.2 Raman Spectrum ของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



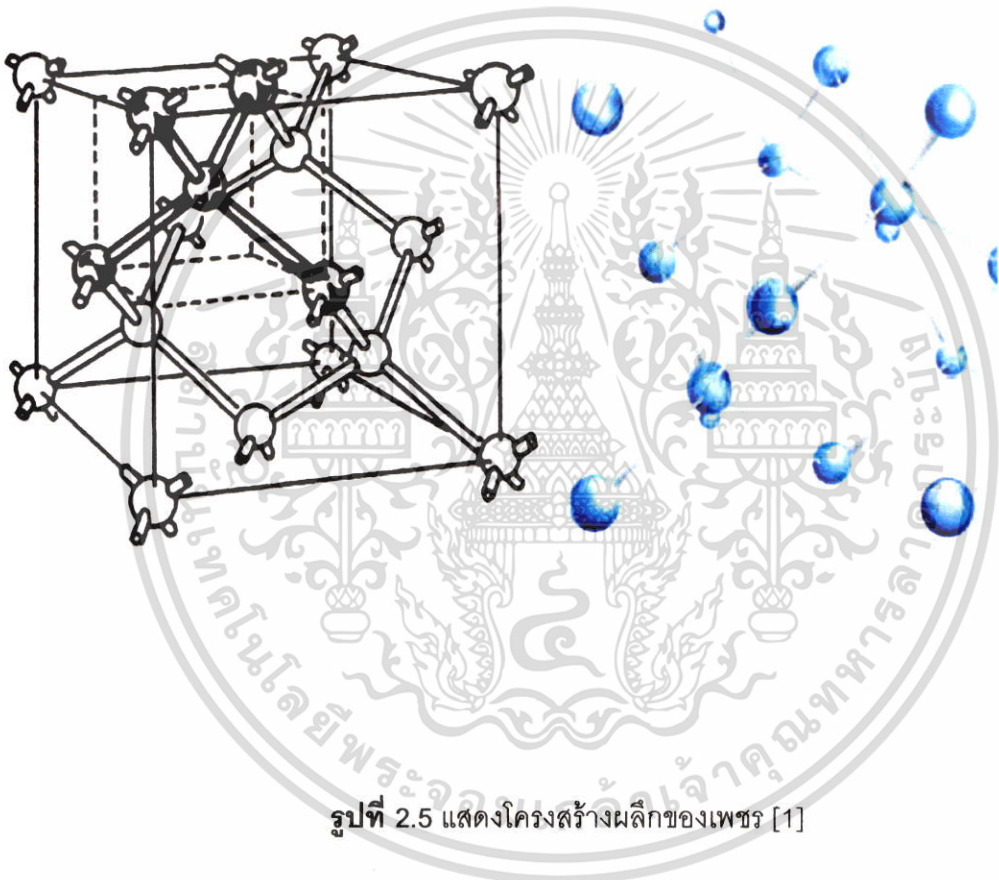
รูปที่ 2.4 คาร์บอนอะตอมใน DLC เกิดจากการโครงสร้างการไฮบริไดเซชัน 2 แบบ คือ sp^2 และ sp^3

จากรูปที่ 2.2 รูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของฟิล์มบางคล้ายเพชรซึ่งประกอบไปด้วยแกรไฟต์มีโครงสร้างการไฮบริไดเซชันแบบ sp^2 และ เพชรมีโครงสร้างการไฮบริไดเซชันแบบ sp^3

2.2.2 เพชร (Diamond)

ในกรณีของเพชรธรรมชาติ อะตอมคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า "Diamond Structure" ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 จากรูปพบว่าภายในยูนิตเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง $1/4$ เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิตเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้ อะตอมของคาร์บอนจะจับกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมองอีกอย่างหนึ่งว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ {111} 2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกันรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นระนาบ {111} ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุดและระนาบ {111} ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายขวางวางซ้อนกันอยู่เป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆของวงแหวนหกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกันในทิศทางของระนาบ {111} การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.567 Å และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.54 Å ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First order peak) ของ

เพชรมีค่า 1332 cm^{-1} และยอดลำดับที่สอง (Second order peak) ของเพชรเท่ากับ 2458 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดลำดับที่หนึ่งอยู่ที่ 1284 cm^{-1}

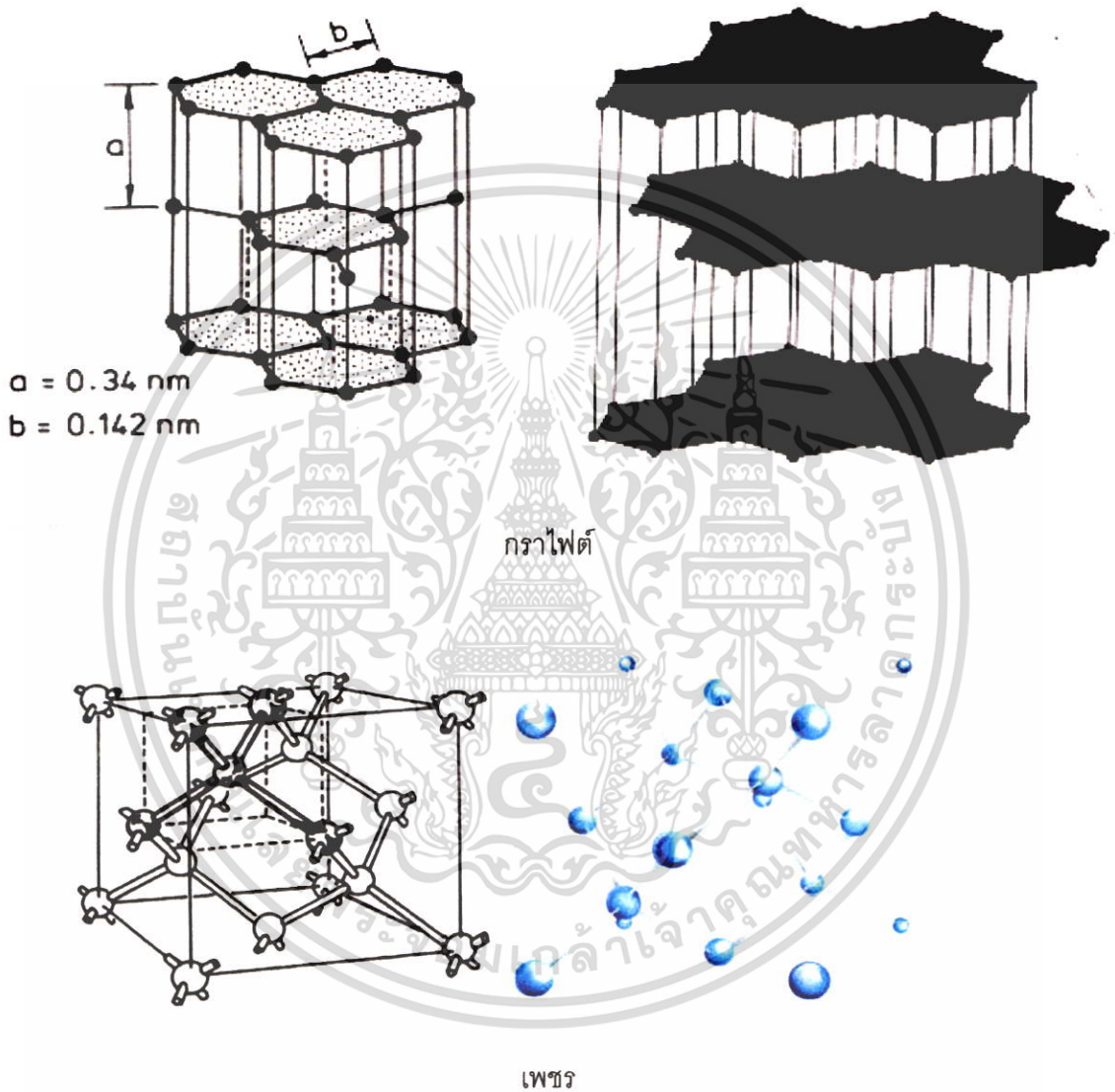


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร [1]

กราไฟต์เป็นรูปพื้นฐานของคาร์บอนที่พบได้มากที่สุด ลักษณะโครงสร้างภายในของมันแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 อะตอมคาร์บอนจะจับตัวที่ลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมเช่นเดียวกับเพชร แต่ข้อแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัดคืออะตอมคาร์บอนที่จับตัวเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมของกราไฟต์นั้นจะไม่มี การเชื่อมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้กันเหมือนวงแหวนหกเหลี่ยมของเพชร แต่จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบเสมอกัน อีกทั้งคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ Trigonal กับอะตอมทั้งสามตัวที่อยู่ใกล้เคียงด้วยพันธะแบบ sp^2 การเรียงลำดับชั้นของวงแหวนหกเหลี่ยมกราไฟต์จะเป็นแบบ AB AB AB... ตามลำดับ โดยมีระยะห่างอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงเท่ากับ 1.42 Å ในขณะที่ค่าคงที่แลตทิซคือ 6.707 Å สำหรับกราไฟต์ ผลการวัดด้วย Raman spectroscopy จะแสดงตำแหน่งยอดลำดับที่หนึ่งที่มีค่า 1580 cm^{-1} และยอดลำดับที่สองอยู่ที่ 3240 cm^{-1} ตามลำดับ



ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) [2]

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราไฟต์

2.2.3 Microcrystalline carbon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของผลึกเพชรจะมีเพียงพันธะของคาร์บอนอะตอมแบบ sp^3 เท่านั้น แต่บางครั้งในการสังเคราะห์เพชรอาจจะมีพันธะแบบ sp^2 ใกล้กับ Crystallite grain boundaries สารที่มีคุณลักษณะเช่นนี้ จะถูกเรียกว่า "Microcrystalline carbon" หรือ Microcrystalline graphite กราฟจาก Raman จะแสดงยอดคลื่นที่ตำแหน่ง 1355 cm^{-1} เมื่อเนื้อสารมีขนาดของเกรนเล็กมากๆ และยอดคลื่นอันดับสองมีค่า 2710 cm^{-1}

2.2.4 Amorphous carbon

Amorphous carbon ที่มีพันธะเป็นแบบ sp^3 จะแสดงยอดคลื่นของ Raman มีลักษณะเป็นแถบระหว่างตำแหน่งยอดที่ 1345 cm^{-1} ถึง ตำแหน่งที่ 1550 cm^{-1} โดยยอดคลื่นจะเปลี่ยนจากค่า 1345 cm^{-1} เป็นค่า 1550 cm^{-1} เมื่อเนื้อสารเกิดการ Hydrogenated ซึ่งที่ตำแหน่งยอดคลื่น 1550 cm^{-1} นี้สารจะถูกเรียกว่า เป็น "Diamond-like carbon" (DLC) ส่วน Amorphous carbon ชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งคือ "Small size cubic diamond" (ขนาดของผลึก $< 0.1\mu\text{m}$)

2.2.5 Lonsdaleite

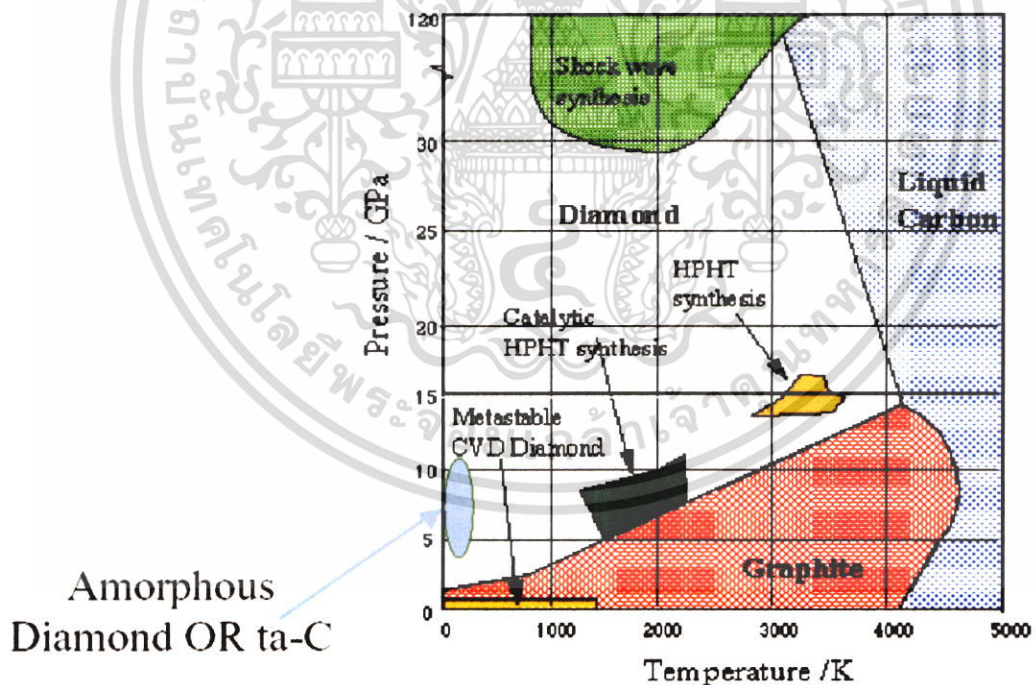
ถ้าในยูนิตเซลล์มีการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นแบบ Hexagonal และวงแหวนหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอนมีการเรียงตัวเป็นชั้นแบบ AB AB AB... อะตอมคาร์บอนที่มีการจัดตัวเป็นโครงเช่นนี้จะถูกเรียกว่า "Lonsdaleite" หรือ "Hexagonal diamond" ค่าคงที่แลตทิซในทิศทาง a และ c จะเท่ากับ 2.52 \AA และ 4.12 \AA ตามลำดับ โดยที่ระยะห่างระหว่างอะตอมที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.52 \AA และแสดงค่ายอดคลื่นของ Raman ที่ตำแหน่งตั้งแต่ $1315\text{-}1326\text{ cm}^{-1}$ ส่วนมากแล้วเรามักพบการเรียงตัวของคาร์บอนแบบนี้ได้ในเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์แบบ Shock wave จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นรูปต่างๆ ของคาร์บอนที่พบได้ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร อย่างไรก็ตามฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดๆ ค่ายอดคลื่นจาก Raman อาจจะไม่แสดงตำแหน่งตรงค่า 1333 cm^{-1} พอดี แต่จะแสดงตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับค่าดังกล่าวตัวอย่างเช่นอาจจะมียอดคลื่นเป็น 1332 cm^{-1} เนื่องจากในการเกิดเพชรขึ้นตามธรรมชาติ กระบวนการเกิดตลอด จนปัจจัยรอบข้างต่างๆ มีผลทำให้เพชรธรรมชาติยังมีความแตกต่างกับเพชรที่สังเคราะห์อยู่บ้าง แต่จากผลของการวิเคราะห์หาคุณสมบัติอื่นๆ ของฟิล์มเพชรพบว่ามีความใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่ได้จากเพชรธรรมชาติมาก จนยอมรับได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติเหมือนกับเพชรธรรมชาติ

สำหรับฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Ion Beam CVD นั้นโครงสร้างของเพชรมียอดคลื่นเป็น 1360 cm^{-1} และ โครงสร้างของกราฟไฟต์มียอดคลื่นเป็น 1580 cm^{-1} และค่ายอดคลื่นนี้

เปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการสังเคราะห์ด้วย

2.3 สมดุลยภาพของคาร์บอน

พิจารณารูปที่ 2.7 ที่ความดันปกติจนถึงแนวเส้นโค้งปกติ จนถึงแนวเส้นโค้งของบริเวณ Liquid carbon (meit) ใกล้เคียงกับ 4000 องศาเซลเซียส คาร์บอนจะอยู่ในรูปของกราไฟต์ (บริเวณสีแดง) และสาเหตุที่เพชรสามารถพบที่พื้นผิวโลก เพราะว่าอุณหภูมิต่ำเกินไปที่จะทำลายพันธะ และเปลี่ยนรูปเป็นกราไฟต์ถึงอย่างไร ก็ตามถ้าเพชรถูกทำให้ร้อนเกิน 1500 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศในภาวะที่เพชรจะเปลี่ยนเป็นกราไฟต์ ในส่วนบริเวณสีขาวคาร์บอนจะอยู่ในรูปของเพชรทั้งนี้สามารถพบกราไฟต์ที่บริเวณสีขาวได้เช่นเดียว กัน ถ้าหากว่าสภาวะไม่เหมาะสมที่จะทำให้กราไฟต์เปลี่ยนไปเป็นเพชร ในบริเวณสีขาวแสดงสภาวะที่เกิดเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการของ General electric ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้โลหะหลอมละลาย เช่น นิเกิล มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกการสังเคราะห์เพชรชนิดนี้ว่า catalytic HPHT synthesis

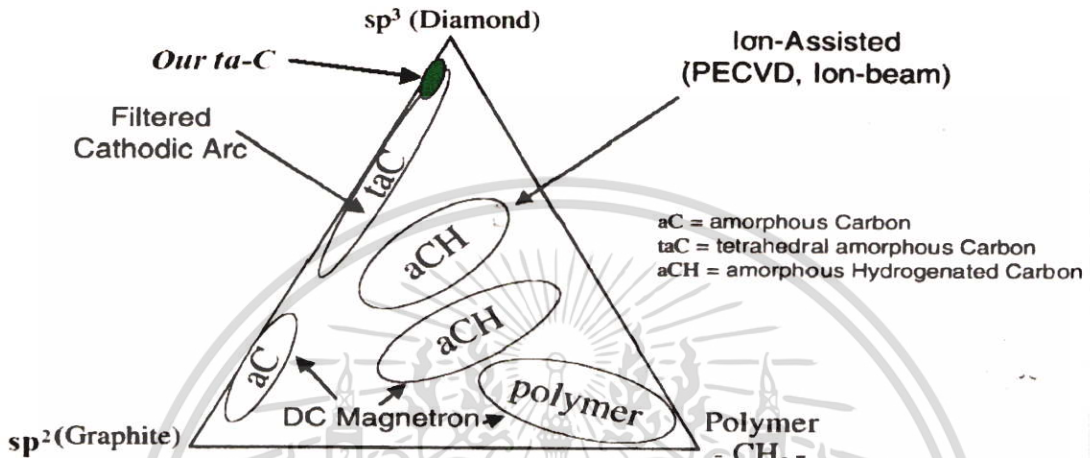


รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพสมดุลยภาพของคาร์บอน

ส่วนที่บริเวณอุณหภูมิและความดันสูง เช่น บริเวณสีส้ม เพชรสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีที่ปราศจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะหลอม เป็นวิธีที่เสนอโดย นาย Bundy เรียกวิธีนี้ว่า HPHT synthesis โดยตรง ในส่วนสี่เหลี่ยมอ่อน เป็นวิธีที่ใช้ความดันสูงแต่ใช้อุณหภูมิต่ำที่รู้จักกันวิธีการสังเคราะห์เพชรที่ชื่อ shock wave technique



รูปที่ 2.8 ชนิดของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

จากรูปที่ 2.8 แสดงชนิดของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการต่างๆ ดังนี้ ถ้าสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรจากจากวิธี DC Magnetron จะได้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ชนิด amorphous carbon (aC) และ amorphous Hydrogenated carbon (aCH),สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) จากจากวิธี Filtered Cathodic Arc จะได้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) ชนิด tetrahedral amorphous Carbon (taC) และในกรณีที่สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) จากจากวิธี Ion Assisted (PECVD, Ion Beam CVD)จะได้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ชนิด amorphous Hydrogenated carbon (aCH)

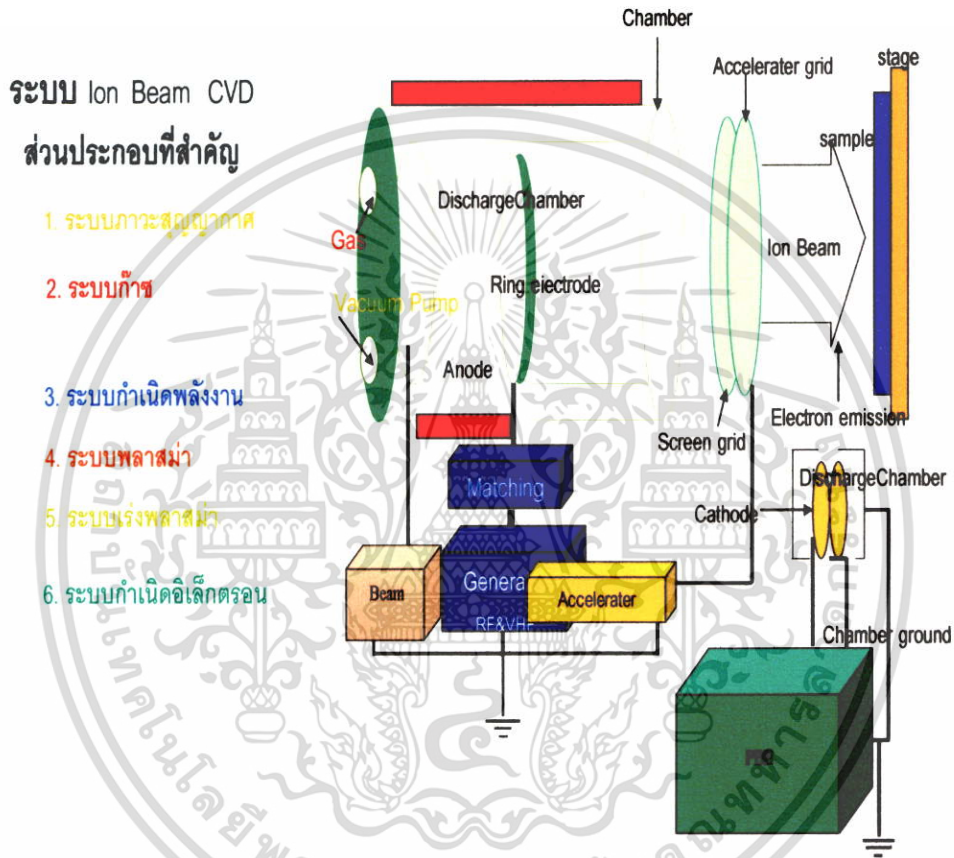
2.4 หลักการพื้นฐานของวิธี Ion Beam CVD

จากรูปเป็นไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ Ion Beam CVD ซึ่งระบบ Ion Beam CVD มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

2.4.1 ระบบสถานะสุญญากาศ ประกอบไปด้วยปั๊มสุญญากาศ ทำหน้าที่ดูดอากาศภายใน chamber ซึ่งภายใน chamber จะมีค่าความดัน 3×10^{-4} torr ให้มีค่าความดัน 7×10^{-6} torr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ระบบสภาวะก๊าซ ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ก๊าซที่ป้อนให้กับระบบมี 2 ชนิดคือ ก๊าซ CH_4 อัตราการไหลของก๊าซ 40 ลบ.ซม./วินาที และก๊าซ C_2H_2 อัตราการไหลของก๊าซ 10 ลบ.ซม./วินาที



รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ Ion Beam CVD

จากรูปเป็นไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ Ion Beam CVD ซึ่งระบบ Ion Beam CVD มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

2.4.3 แหล่งกำเนิดพลังงานโดยมี RF Power 350 Watts

2.4.4 ระบบพลาสมาโดยมี Beam Voltage 120 Vote และ มี Beam Current 100 milliamps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 ระบบเร่งพลาสมาโดยมี Accelerator Voltage 320 Volts

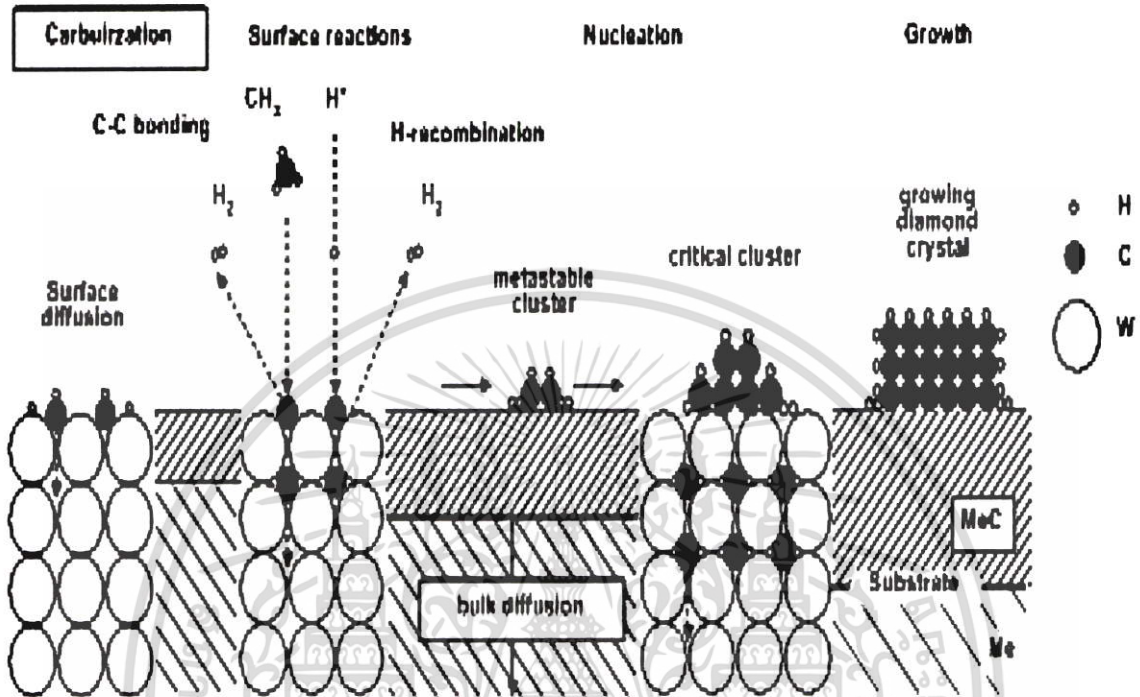
2.4.6 ระบบกำเนิดอิเล็กตรอนโดยมี PBN Emission 0.5 Amps และ PBN Gas Ar 8 SCCM

2.5 หลักการทำงานของระบบ Ion Beam CVD

ปั๊มสุญญากาศ ทำหน้าที่ดูดอากาศภายใน chamber ซึ่งภายใน chamber จะมีค่าความดัน 3×10^{-4} torr ให้มีค่าความดัน 7×10^{-6} torr หลังจากนั้นจะป้อนก๊าซให้กับระบบมี 2 ชนิดคือ ก๊าซ CH_4 อัตราการไหลของก๊าซ 40 ลบ.ซม./วินาที และก๊าซ C_2H_2 อัตราการไหลของก๊าซ 10 ลบ.ซม./วินาที ก๊าซ CH_4 และ ก๊าซ C_2H_2 แยกตัวเป็นพลาสมาโดยป้อนแหล่งกำเนิดพลังงาน RF Power 350 Watt ระบบพลาสมามี Beam Voltage 120 Volt และมี Beam Current 100 mA ระบบเร่งพลาสมามี Accelerator Voltage 320 Volt และ ระบบกำเนิดอิเล็กตรอนมี PBN Emission 0.5 Amp และ PBN Gas Ar 8 SCCM ให้กับระบบ หลังจากนั้น ก็จะเกิดฟิล์มบางคล้ายเพชรก่อตัวขึ้นที่พื้นผิวฐานรอง

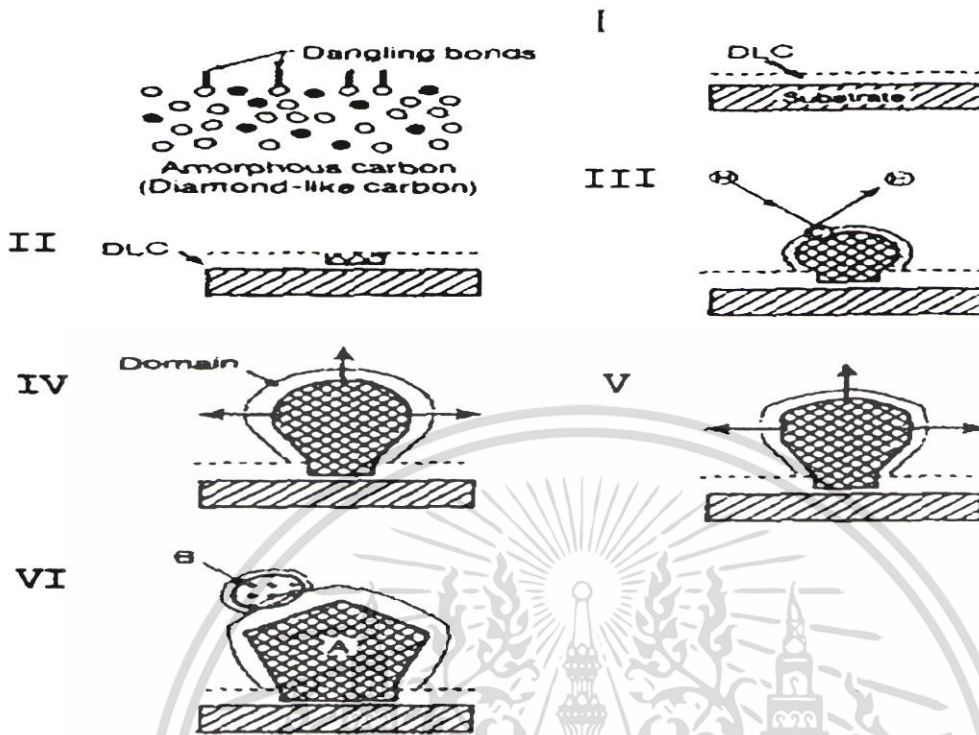
2.5.1 ปรากฏการณ์นิวคลีเอชัน [3,4]

ปรากฏการณ์นิวคลีเอชัน ของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ปรากฏการณ์การก่อตัวเริ่มต้นของพลาสมาเป็นคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ตามด้วยการเกิดไฮโมอิทิแทกเซียล การเกาะตัวของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวเพื่อเพิ่มขนาดของก้อนเนื้อสาร เป็นปรากฏการณ์การสร้างนิวเคลียสเริ่มต้น โดยขนาดของนิวเคลียสต้องมีขนาดมากกว่าขนาดวิกฤต สามารถคงอยู่และเสถียรได้นานพอที่จะทำให้ เกิดเป็นโครงสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของอนุภาคที่ประกอบกันขึ้นจนมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของระบบเป็นลบเพื่อให้สามารถเกิดกระบวนการขึ้นได้ ซึ่งระบบนี้หมายรวมถึงฐานรองอนุภาคที่เกิดขึ้น และ พลาสมา เมื่ออนุภาคอิสระของพลาสมาแพร่เข้าไปบนพื้นผิวฐานรอง จะก่อตัวกันด้วยพันธะ sp^2 เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบวงแหวน Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่ฐานรองจนค่าถึงค่าหนึ่งซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบางๆ ที่เรียกว่า Intermediate layer เมื่ออะตอมคาร์บอนเกาะตัวกันมากพอ จะเกิดขึ้นตอนการเกิดคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) พันธะ sp^2 และอีกส่วนจะเกิด พันธะ sp^2 เปลี่ยนรูปเป็นพันธะ sp^3 โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวช่วย กลไกการนิวคลีเอชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer เป็นดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกการนิวเคลียชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง [5]

ระหว่างการนิวเคลียชันของคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ซึ่งเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของนิวเคลียสของกราฟไฟต์ ความเสถียรของนิวเคลียสไฮโดรเจนเพชรเป็นการจำกัดคาร์บอนพันธะ sp^2 ออก จะต้องใช้โมเลกุลไฮโดรเจนจำนวนมาก ซึ่งมีความอิมพัลส์อย่างยิ่งยวดของไฮโดรเจนอะตอมจากการกระตุ้นของพลาสมาด้วย Generator RF โมเลกุลของไฮโดรเจนจะไปช่วยลดความดันของพลาสมาที่จะเกิดการนิวเคลียชันกราฟไฟต์ และอะตอมไฮโดรเจนอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮโดรเจนที่ล้อมรอบโมเลกุลของพลาสมาและพื้นผิวของแข็ง เพื่อจัดตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรเจน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้หลังจากที่เกิด คาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) แล้วพื้นผิวฐานรองจะถูกปกคลุมด้วยคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) และฟอร์มตัวเป็นฟิล์มหลายรูปต่อไป จากการศึกษาด้วยเทคนิค HRTEM พบว่า Diamond nanocrystallines ถูกเปลี่ยนโดยตรงจาก a-C ไปเป็นเพชร ตามรูปที่ 2.11 พบว่าการนิวเคลียชันจะเริ่มจากชั้นที่ 1 Carbon clusters เกิดขึ้นที่พื้นผิวฐานรองและเปลี่ยนโครงสร้างพันธะจาก sp^1 นิวไปเป็น sp^2

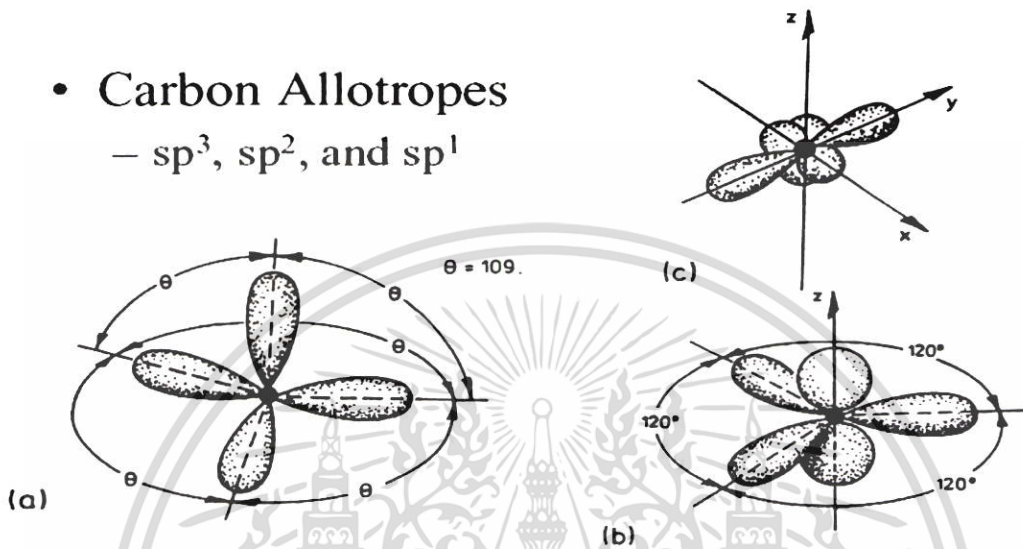


รูปที่ 2.11 การนิวคลิเอชันบนชั้นอินเตอร์มิเดียท [6]

ขั้นที่ 2 อะตอมคาร์บอนจะจับพันธะกันเป็นโครงข่ายที่เสถียรของคาร์บอนพันธะ sp^1 คือ Molecular rain ของ ไฮโดรคาร์บอนอย่างต่อเนื่องถูกกระตุ้นบนผิวฐานรอง เพื่อทำให้มีพลังงานเพียงพอในการเปลี่ยนจาก $sp^1 \longrightarrow sp^2 \longrightarrow sp^3$ เกิดการโปรโมชันของพลังงานและการไฮบริดไดเซชันเกิดเป็นรูปร่างดังในรูปที่ 2.11 ตามลำดับ ในขณะเดียวกันเฟสที่ไม่เสถียร (sp^1 และ sp^3) ถูกกัดได้เร็วกว่าเฟสที่เสถียร (sp^2) ถึง 10 เท่า ขั้นที่ 3 Transition ของสภาวะการยึดเหนี่ยวในโครงข่ายคาร์บอนเริ่มเกิดขึ้นจาก Disordered domain ที่เป็นคาร์บอนพันธะ sp^2 กลายเป็นเพชรที่เป็นเพชรที่เป็นคาร์บอน sp^3 เช่นเดียวกัน การเกิดผลึกในชั้นเชิงซ้อน การรวมตัวของอะตอมจะจัดตัวใหม่เพื่อให้อยู่ในระนาบ {111} เพื่อให้มีพลังงานพื้นผิวน้อยที่สุด บริเวณที่เป็นผลึกจะกระทำตัวเป็นนิวคลีไอต์เพื่อเกิดเป็นเพชร ขั้นที่ 4 - 5 เกิดการเกิดเพชรขึ้น อะตอมคาร์บอนถูกเพิ่มเข้าสู่พื้นผิว (ขั้นที่ 4) โดยกระบวนการแพร่ รูปร่างของเพชรจะเริ่มตันขึ้นเป็นครึ่งทรงกลม (ขั้นที่ 4) Microcrystal ของเพชรที่เกิดขึ้นในชั้นแรกจะมีขนาดถึงขนาดวิกฤติ (ขั้นที่ 5) ขั้นที่ 6 ทำให้เกิดรูปร่างหน้าของผลึก ขั้นที่ 7 เกิดการนิวคลิเอชันลำดับที่สองเป็นเหตุให้เกิดการแกว่งของความเข้มชั้นบนพื้นผิวของผลึกเพชร เมื่อความหนาของโดเมนเปลี่ยนจนเกิด 15 nm ซึ่งเป็น

พลังงานความร้อนหรือเวลาที่เพียงพอสำหรับอะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าสู่ผลึกเพชร ทำให้เกิดการนิวคลีเอชันลำดับที่สองบนพื้นผิว

- Carbon Allotropes
 - sp^3 , sp^2 , and sp^1



รูปที่ 2.12 รูปร่างของไฮบริดออร์บิทัลของคาร์บอน [4,7,9]

เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์การนิวคลีเอชันโดยคำนึงถึงอิทธิพลของฐานรองจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของคาร์บอนจากแก๊สเฟสตกกระทบบนฐานรองและเกิดการแพร่เข้าไปในเนื้อสารจะค่อยๆ ลดลง เมื่อมีการฟอร์มตัวของชั้นคาร์ไบด์ชั้นจนกระทั่งการแพร่ของคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และมีความเข้มข้นของคาร์บอนมากพอบริเวณของฐานรอง ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่ทำให้เกิดขึ้นขั้นตอนที่สองนั้น โดยที่ภาวะนี้นิวเคลียสเริ่มที่จะมีความเสถียร การนิวคลีเอชันในขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นหลายทิศทางขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวที่เตรียมและเม็ดเพชร ฐานรองที่ไม่มีรอยขีดข่วนนิวคลีเอชันจะเกิดขึ้นเมื่อมีการอิมิตัวของคาร์บอนที่พื้นผิว แต่ฐานรองที่ขีดข่วนด้วยเพชร คาร์บอนจะแพร่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของบริเวณนิวคลีเอชัน การนิวคลีเอชันขั้นที่ 1 เป็นขั้นตอนที่คำนึงถึงเงื่อนไขของฐานรองเนื่องจากเป็นช่วงของการเริ่มก่อตัวบนพื้นผิว การฟอร์มตัวของคาร์ไบด์เริ่มต้นไม่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดบนฐานรองไม่มีรอยขีดข่วนแต่เกิดขึ้นหลังจากช่วงเวลาหนึ่งที่มีการอิมิตัวของคาร์บอนที่พื้นผิว และ การนิวคลีเอชันมีความหนาแน่นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับฐานรองที่มีรอยขีดข่วนซึ่งจะมีนิวคลีโอดโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลึกที่สังเกตบนฐานรองเหล่านี้ภายหลังเกิดกระบวนการโตแล้วจะมีขนาดที่สม่ำเสมอเพราะการนิวคลีเอชันจะหยุดลงหลังจากการเกิดเริ่มต้นขึ้น สันนิฐานได้ว่าเป็นเพราะคาร์บอนที่ผิวได้แพร่เพิ่มเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของผลึกเพชร

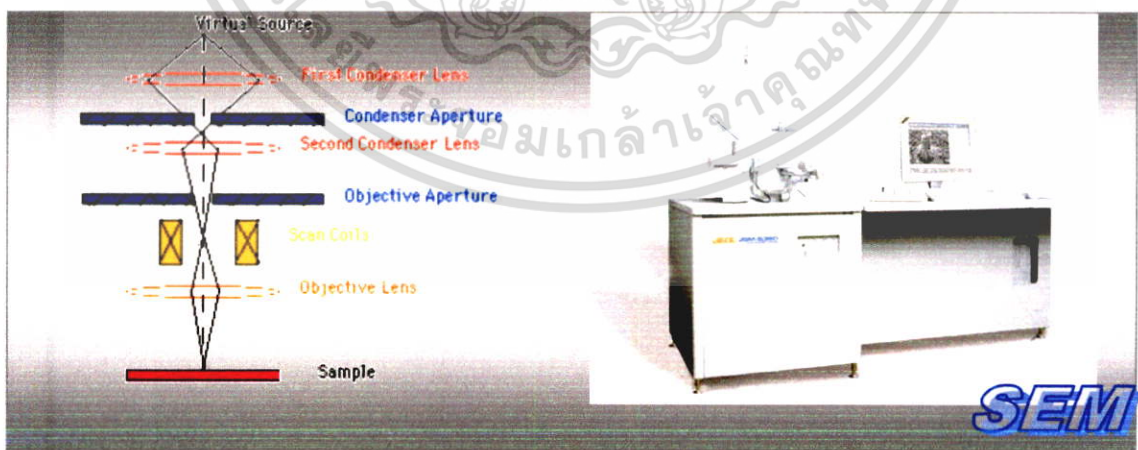
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การวิเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์

การวิเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่ได้จากการสังเคราะห์จะทำการศึกษาชั้นพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 – 400 เพื่อดูลักษณะการเกิดของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) พื้นที่การเกิด รวมทั้งความหนาแน่นของการเกิดเป็นฟิล์มหรือไม่ ซึ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์สามารถประมาณผลการสังเคราะห์ได้เท่านั้น ส่วนการวิเคราะห์อย่างละเอียดจะต้องใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งเครื่อง SEM นี้ สามารถตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) ความหนาของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ได้แม่นยำ ส่วนการศึกษาความเป็นระเบียบของฟิล์มเพชรนั้นจะใช้ Atomic Force Microscope (AFM) โดยสามารถวิเคราะห์ความสูงต่ำของผิวฟิล์มบางคล้ายเพชร (DLC) ได้ในระดับนาโนเมตร จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ เครื่อง SEM และเครื่อง AFM เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างภายนอกเท่านั้น การวิเคราะห์จะใช้ Raman spectroscopy ศึกษาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรว่ามีรูปของคาร์บอนใดบ้างเช่น เพชร แกรไฟต์ อนุภาคคาร์บอน เป็นต้น

การวิเคราะห์นั้นยังมีอีกหลายเทคนิคแต่สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร 4 วิธี การใช้เทคนิคทั้ง 4 เทคนิคนี้เพื่อเป็นการเสนอว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธี Ion Beam CVD นี้สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) และ แสดงคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่สังเคราะห์ได้ โดยรายละเอียดของแต่ละเทคนิคมีดังต่อไปนี้

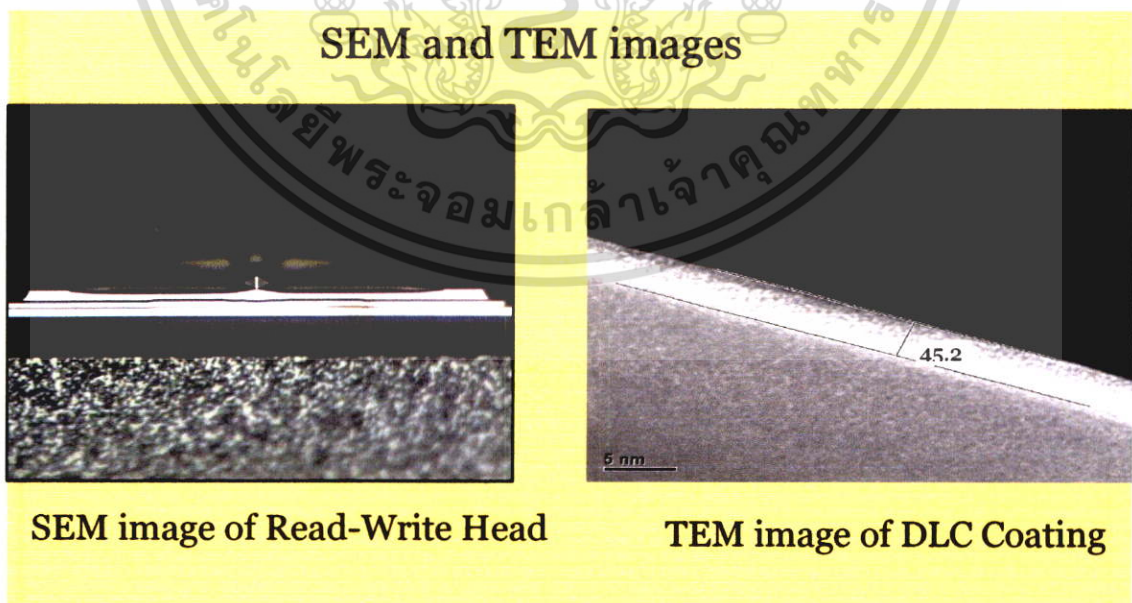
2.6.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 2.13 เครื่องมือวัด SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการศึกษาลักษณะของผิวชิ้นงานโดยมีกำลังขยาย 50 – 40,000 เท่า สามารถแสดงผลเป็นภาพมิติ มีความคมชัดสูงถึง 2.5 – 10 nm โดยหลักการการทำงานของ SEM ทำให้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน(μm) หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิวขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10 – 20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-Ray Tube) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่นๆ คือ SEM มีกำลังขยายสูง ความคมชัดของภาพสูง ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเปรียบเทียบกับ TEM (Transmission Electron Microscopy) ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ต้องมีความบางมากๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับชิ้นงานตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้าก่อนการวิเคราะห์ต้องนำไปเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าก่อนทั่วไปนิยมใช้ทองคำหรือคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่สร้างบนฐานรอง Si สามารถที่จะวิเคราะห์วัดด้วย SEM ได้โดยต้องนำไปเคลือบชั้นบางทองคำหรือคาร์บอน ข้อควรระวังในการวิเคราะห์คือควรใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำๆ จะช่วยลดการสะสมประจุบนฟิล์มส่วนมากแล้วในการ



รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างที่ได้จากภาพถ่าย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น SEM และ Raman spectroscopy จะช่วยให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพมากขึ้น มีเทคนิคหลายวิธีที่ใช้แสดงถึงรายละเอียดของพื้นผิว เริ่มตั้งแต่การใช้เลนส์ขยายและการใช้กล้องจุลทรรศน์ในปลายศตวรรษที่ 18 จนกระทั่งศตวรรษที่ 20 มีการพัฒนาใช้เทคนิคของอิเล็กตรอนและลำไอออน (Ion beam) จากตารางที่ 2.1 เป็นการเปรียบเทียบเทคนิคการขยายโดยพิจารณาจากสิ่งแวดล้อมขณะใช้งาน ชนิดของภาพและผลเสียหายต่อชิ้นงาน ซึ่งเทคนิคแรกในตารางขึ้นอยู่กับอนุภาคที่ใช้ในการโฟกัสเช่น โฟตอน อิเล็กตรอน และไอออนที่จะแสดงภาพออกมา และเป็นเทคนิคที่มีข้อจำกัดของความยาวคลื่นช่วงที่สามารถมองเห็นได้ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) จะทำงานเมื่ออยู่ในสุญญากาศเท่านั้น ส่วนเทคนิคสุดท้ายคือ Scanning Probe Microscope เป็นเทคนิคที่สามารถทำงานได้ในหลายสภาวะตัวกลางด้วยกำลังขยายที่สูงกว่า สามารถแสดงข้อมูลด้านความลึกได้ และทำลายผิวนำชิ้นงานน้อยมาก

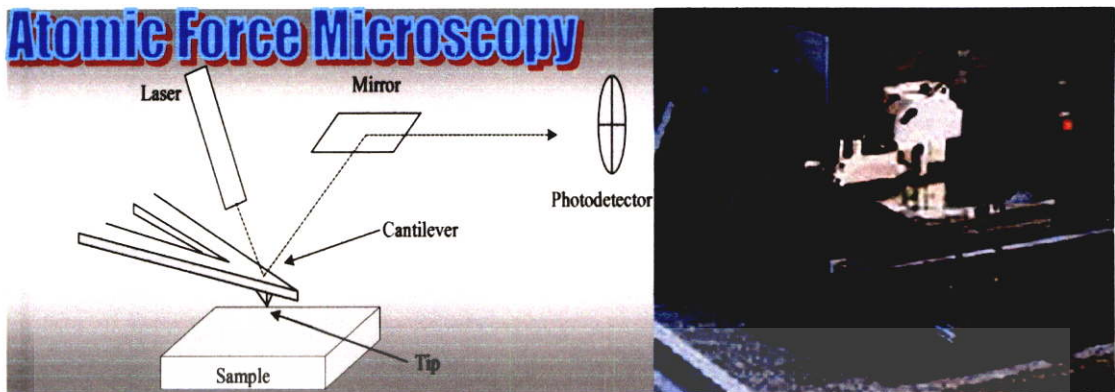
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการใช้เทคนิคในการวิเคราะห์พื้นผิวนำชิ้นงานต่างๆ

	กำลังขยาย	ตัวกลาง	ภาพ	ผลเสียหาย
ทางแสง	10	อากาศ , ของเหลว	2 มิติ	ไม่มี
เลเซอร์	10	อากาศ	2 มิติ	น้อย
ลำไอออน	10	สุญญากาศ	2 มิติ	มาก
SEM	10	สุญญากาศ	2 มิติ	มีบ้าง
SPM	10	ของเหลว, สุญญากาศ,อากาศ	3 มิติ	น้อยมาก

2.6.2 การวิเคราะห์ด้วย Atomic Force Microscope (AFM)

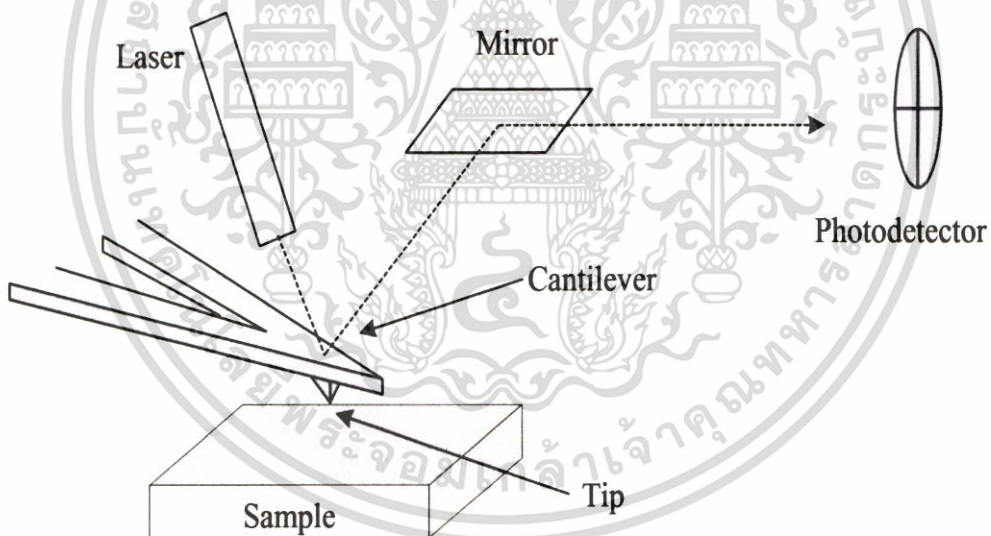
AFM เป็นชนิดหนึ่งของ Scanning Probe Microscope ซึ่งสามารถสร้างภาพได้ในสามมิติ และทำงานในตัวกลางที่เป็นอากาศมี Scanning Probe, เปียโซอิเล็กทริกเซรามิก (piezoelectric ceramics) วงจรไฟฟ้าป้อนกลับ และ คอมพิวเตอร์สำหรับสร้าง และ แสดงภาพเป็นส่วนประกอบ Force Sensor มีลักษณะดังรูปที่ 2.16 วัดการหักเหของคานกระเดื่อง (Cantilever) ซึ่งมีเข็ม (Tip) ติดอยู่ที่ปลาย เมื่อคานกระเดื่องเคลื่อนที่ลำแสงจากเลเซอร์จะเคลื่อนที่ตกคร่อมบริเวณทั้งสี่ส่วนของโฟโตดีเทคเตอร์ การเคลื่อนที่ของคานกระเดื่องนี้สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างของความเข้มแสงบนแต่ละส่วนของโฟโตดีเทคเตอร์ตามกฎของ Hooke ($F = -kx$) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของคานกระเดื่อง (X) และแรงที่ใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ (F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 เครื่องมือวัด AFM

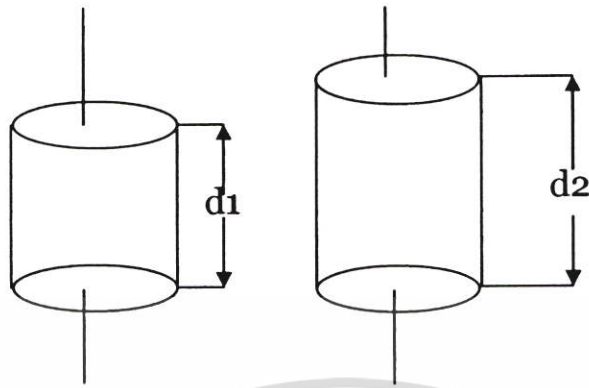
ของคานกระเดื่องนี้สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างของความเข้มแสงบนแต่ละส่วนของโฟโตดีเทคเตอร์ตามกฎของ Hooke ($F = -kx$) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของคานกระเดื่อง (X) และแรงที่ใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ (F)



รูปที่ 2.16 แผนภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วย AFM

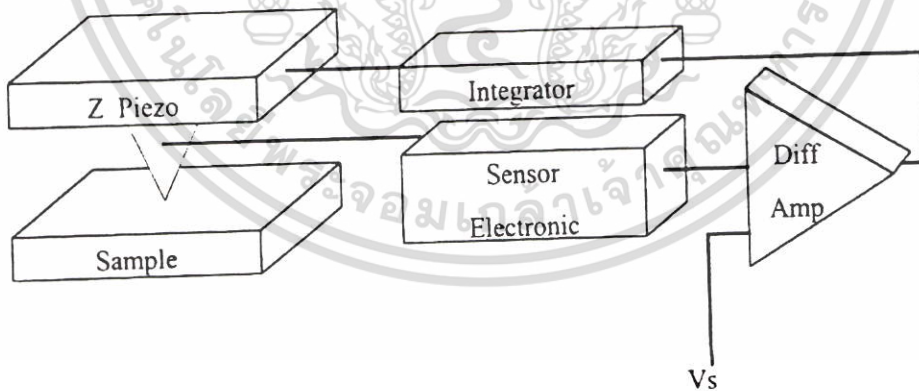
เป็นไปได้ที่จะให้คานกระเดื่องมีค่าคงที่ของแรง k เป็น 1 N/m สำหรับการเคลื่อนที่ที่น้อยกว่า 1 \AA ที่สามารถวัดได้จะใช้แรงน้อยกว่า $0.1 \times 10^{-9} \text{ N}$ เปียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics) ถูกสร้างขึ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดได้เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า ยกตัวอย่างทรงกระบอกเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกในรูปที่ 2.17 จะมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดเมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics)

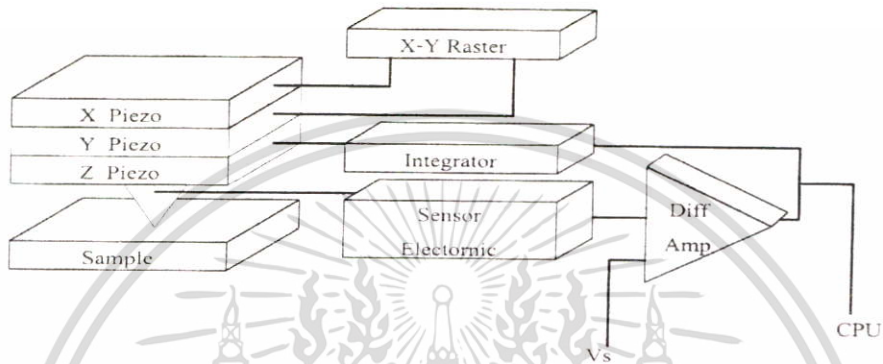
เซรามิกที่ใช้จะมีรูปร่างต่างๆโดยแต่ละชนิดจะมีสัมประสิทธิ์การขยาย (Expansion coefficient) เฉพาะ ตัวซึ่งจะยอมให้เกิดการผิดรูปร่างไปตามศักย์ที่ให้ สัมประสิทธิ์นี้จะอยู่ในช่วงจาก 1 ถึง 3,000 AV^{-1} ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้เซรามิกมีตำแหน่งเข็มที่แม่นยำ ยกตัวอย่างเซรามิกที่มีสัมประสิทธิ์การขยาย 1 A/V จะมีการเคลื่อนที่ 0.1 \AA เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดศักย์ 100 mV วงจรอิเล็กทรอนิกส์ป้อนกลับ ประกอบด้วยโฟรบ/เซนเซอร์ และเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเป็นวงจรถูกกำหนดตำแหน่งของเซนเซอร์ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรป้อนกลับ (Feedback circuit) ของ AFM

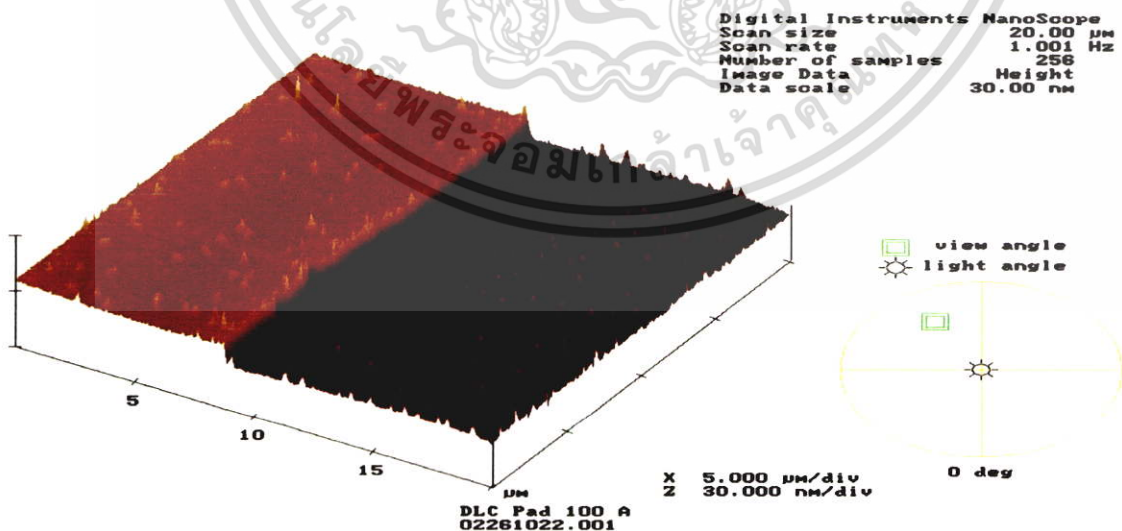
เมื่อเซนเซอร์เคลื่อนที่เข้าหาพื้นที่ผิวชิ้นงาน สัญญาณของเซนเซอร์จะเพิ่มขึ้น differential amplifier จะเปรียบเทียบค่าที่เพิ่มจากเซนเซอร์กับค่าอ้างอิง (V_s) และได้สัญญาณที่ต้องการแปรตามการ

เปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดหรือการเลื่อนเฟสจากการออสซิลเลทของโพรบใกล้ชิ้นงานซึ่งจะไปกระตุ้นเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก จนกระทั่งเซนเซอร์ถูกดึงออกจากพื้นผิวระบบของ AFM เป็นดังรูปที่ 2.19 มีการเพิ่มเซรามิกเข้าไปสองชิ้นเพื่อให้เซนเซอร์สแกนได้ในระนาบ x-y ภาพของพื้นผิวเกิดจากการจับสัญญาณผิดพลาดจากเซนเซอร์เหนือพื้นผิวและสัญญาณจาก piezodriver ที่รวบรวมจากคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.19 แผนภาพของ Scanning Probe Microscope (SPM)

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความเรียบและความหนาของฟิล์มได้แม่นยำ โดยเสนอภาพเป็นแบบสามมิติแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.20 ดังนี้ เป็นการวิเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)



รูปที่ 2.20 ภาพสามมิติจากการวิเคราะห์ด้วย AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

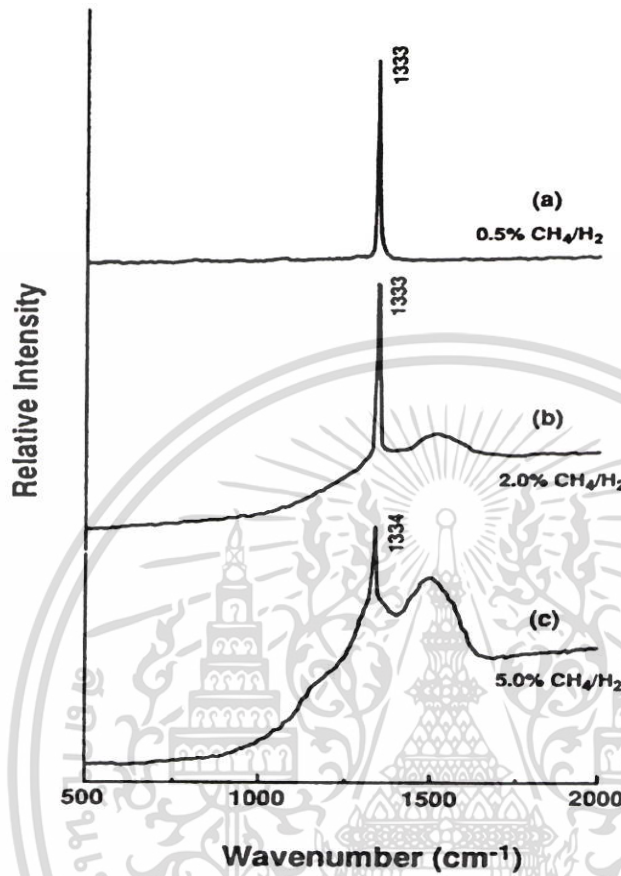
2.6.3 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy



รูปที่ 2.21 เครื่องมือวัด Raman

Raman Spectroscopy เป็นวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของวัสดุ โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสงโดยทำการวัดการลดลงของความเข้มลำแสงที่ผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน (non absorbing medium) ผลของ Raman นี้จะเป็นการกระเจิงในระดับโมเลกุล นั่นคือ การกระเจิงของแสงนี้เกิดขึ้นจากโฟตอนของลำแสงกับการสั่นภายในแลตทิซหรือโฟนอน ดังนั้น Raman Spectroscopy จึงเป็นวิธีที่นิยมนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร เนื่องจากพันธะของคาร์บอนมีความไวต่อการกระเจิงของ Raman สูง ดังนั้นจึงสามารถจำแนกประเภทต่างๆ ของโครงสร้างคาร์บอนได้ เช่น เพชร , กราไฟต์และคาร์บอนอะมอร์ฟัส เป็นต้น โดยที่ค่าสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติมียอดอยู่ที่ 1332 cm^{-1} ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเพชรที่ใกล้เคียงธรรมชาติและบริสุทธิ์มาก แต่ยังมีปริมาณกราฟไฟต์และคาร์บอนอะมอร์ฟัสปะปนอยู่บ้างข้อดีที่สำคัญที่สุดของการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy นี้ คือ เป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงาน หรือฟิล์มเพชรที่ตรวจสอบเสียหาย หรือทำลายโครงสร้างซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อได้

ในรูป 2.22a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมากนอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่นๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณภาพดีแสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 2.22b พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} เริ่มกว้างขึ้น และ เกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ



รูปที่ 2.22 แสดง Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างๆกัน (a) 0.5% CH₄/H₂ (b) 2% CH₄/H₂ (c) 5% CH₄/H₂

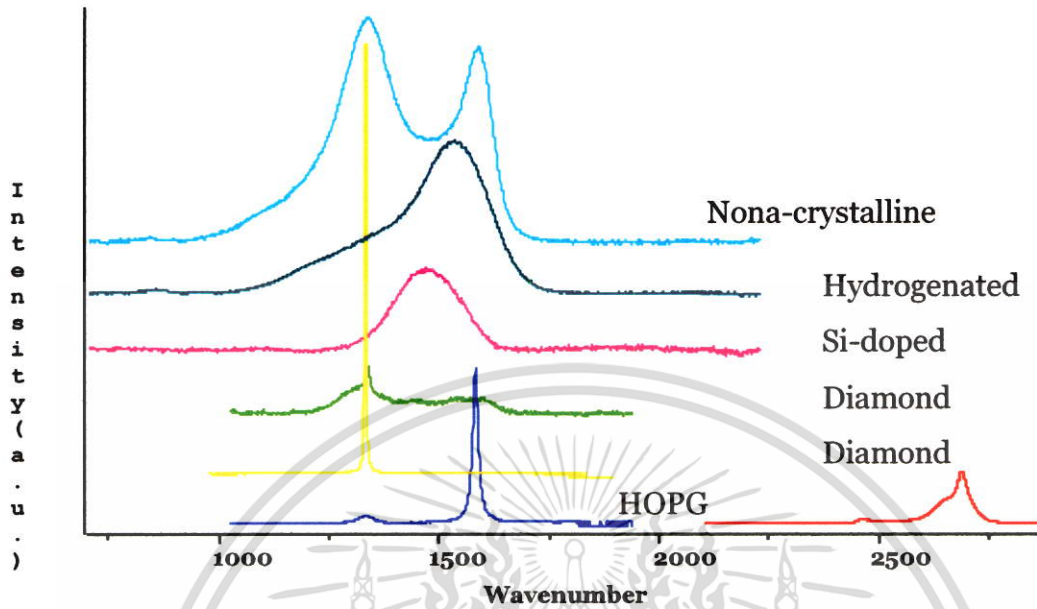
1332 cm⁻¹ เริ่มกว้างขึ้น และเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ 1500 cm⁻¹ อันเป็นตำแหน่งของ Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่สำหรับสเปกตรัมของรูป 2.22c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm⁻¹ ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm⁻¹ เริ่มมียอดชัดเจนกว่าภาพที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด

ตารางที่ 2.2 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 ($< 0.1 \mu\text{m}$)
$1315\text{-}1326 \text{ cm}^{-1}$	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 material is 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
PEAK POSITION	TYPE OF CARBON	DESCRIPTION
2710 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	second order peak
3240 cm^{-1}	Graphite	second order peak

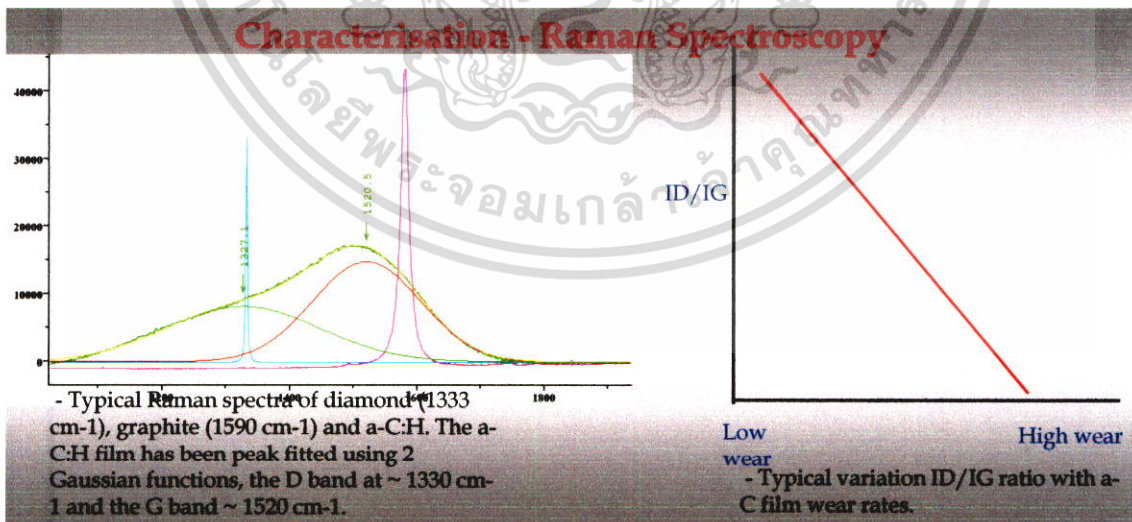
จากรูปที่ 2.23 แสดงค่า Raman Spectrum ของ Nona-crystalline , Hydrogenated Si-doped และเพชรที่ได้จากการวิเคราะห์ Raman Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 Raman Spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ Raman Spectroscopy

จากรูปที่ 2.24 แสดง Raman spectrum ของเพชรจะพบพีคสูงสุดที่ 1333 cm^{-1} และ Raman Spectrum พิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) ชนิด a-C:H ที่ได้จากการวิเคราะห์ Raman Spectroscopy



รูปที่ 2.24 Raman Spectrum ของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)

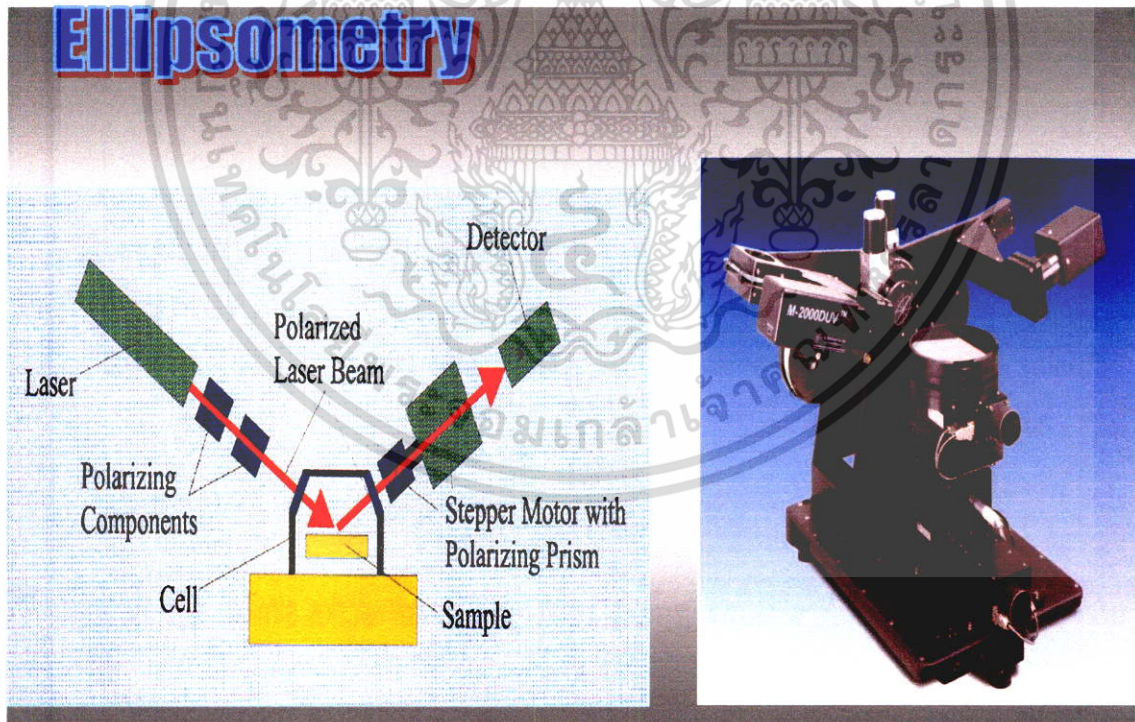
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรจะประกอบไปด้วย เพชร และ กราไฟต์ เพชรจะพบพีคสูงสุดที่ 1330 cm^{-1} และ กราไฟต์จะพบพีคสูงสุดที่ 1520 cm^{-1}

2.6.4 การวิเคราะห์ด้วย Ellipsometer

Ellipsometry เป็นเทคนิคการวัดที่มีความไวสูงโดยการใช้คุณลักษณะแสงโพลาไรซ์ ที่มีต่อพื้นผิวฟิล์มบาง และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ค่าที่วัดได้จากสภาวะการโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปคือซายน์ (psi ; Ψ) และ เดลต้า (delta ; Δ) ซึ่งเป็นข้อมูลเฟสที่ทำให้มีการตอบสนองต่อการวัดดียิ่งขึ้นยิ่งไปกว่านี้ Ellipsometry ยังใช้หาค่าต่าง ๆ เช่น ค่าคงที่ทางแสง (n, k หรือ ϵ_1, ϵ_2) ค่าความหนาของฟิล์มบาง (ชั้นเดียวหรือหลายชั้น) , ความเข้มข้นสารเจือ, ความขรุขระของพื้นผิว, สัดส่วนอัลลอยด์, อัตราการเกิดหรืออัตราการกัดกร่อน (in-situ)และอุณหภูมิ (in-situ)

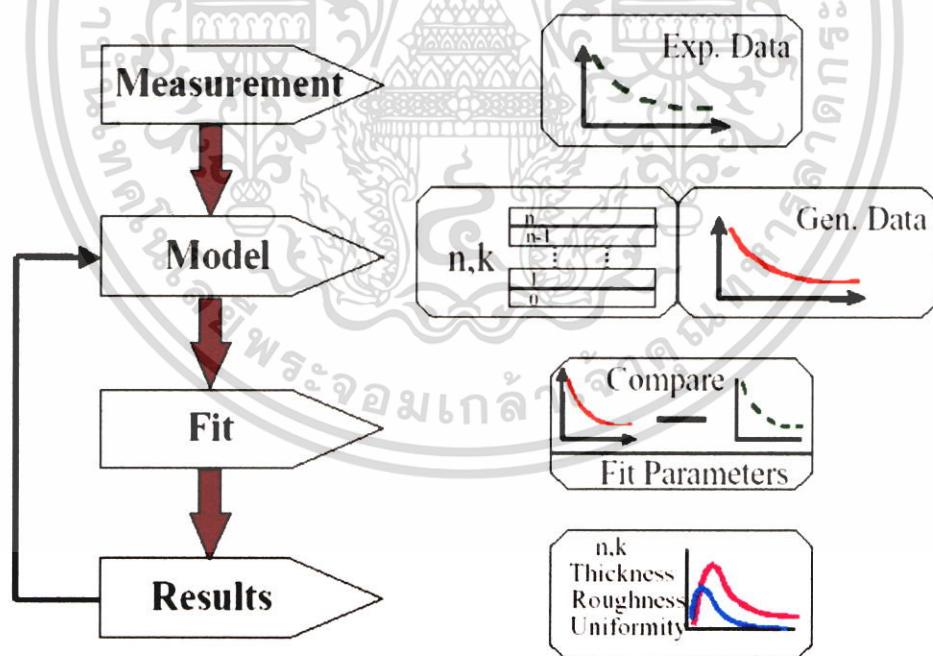
จากรูปที่ 2.25 แสดงเครื่องมือวัด Ellipsometer เพื่อใช้วัดความหนาของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) ตัวอย่างง่าย ๆ หลายตัวอย่างสามารถวัดได้โดยการใช้แสงความยาวคลื่นเดียวแต่ในบางกรณีเมื่อต้องวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนมากยิ่งขึ้นจำเป็นต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 2.25 เครื่องมือวัด Ellipsometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

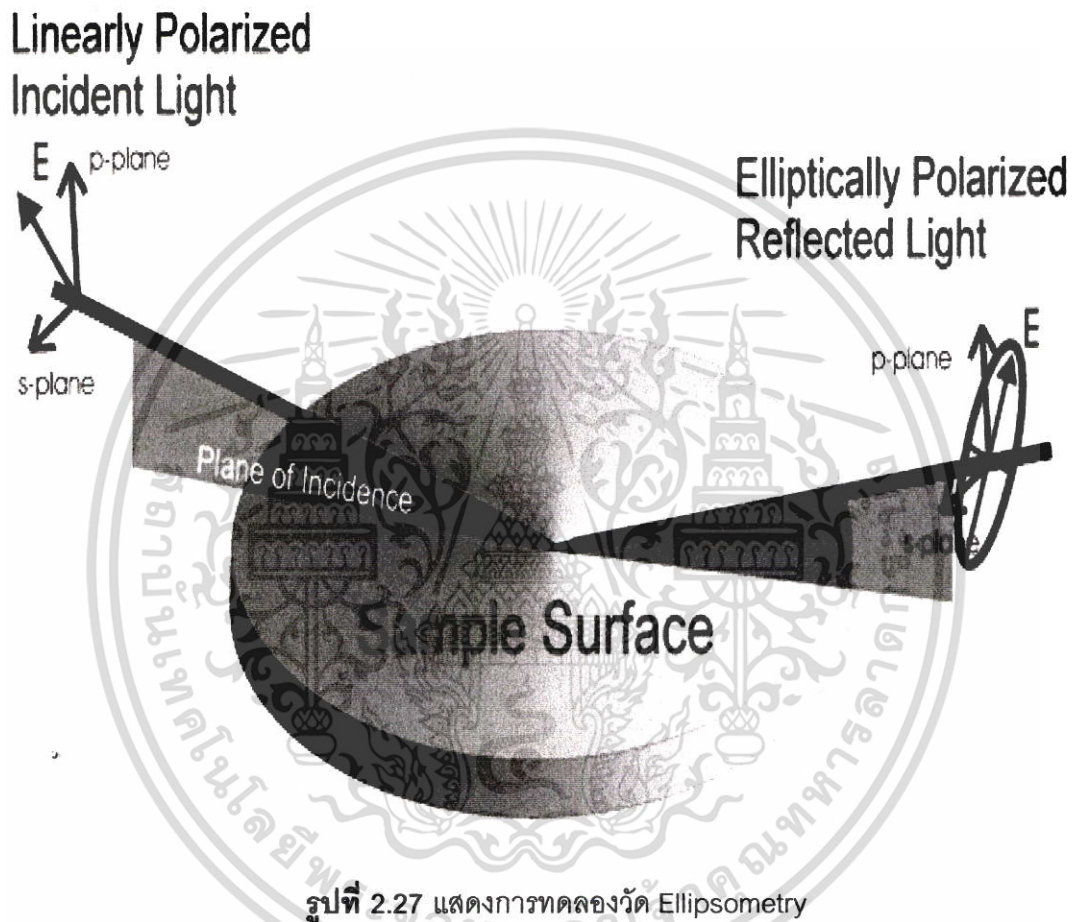
เพื่อช่วยสร้างโมเดล และ ใช้แสงที่มีความยาวคลื่นแบบเป็นช่วง (Spectroscopic) ในการวิเคราะห์หาก แต่อย่างไรก็ดี Ellipsometry จะสามารถทำงานได้ดีสำหรับฟิล์มที่มีความหนาไม่น้อยหรือมากเกินไป กว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการวัด เช่น แสงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ไม่สามารถวิเคราะห์ฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า 0.5 nm หรือสูงกว่า 10,000 นาโนเมตร ได้ ขณะคลื่นแสงความยาวคลื่นนี้ สามารถวัดความหนาของฟิล์ม 5 ถึง 1,000 นาโนเมตรได้ โดยทั่วไปแล้ว Ellipsometer ชนิดที่ใช้แสงอินฟราเรด ใช้ได้ดีกว่ากับฟิล์มบาง 1 อังสตรอม ถึง 1 ไมครอน ได้เป็นอย่างดี คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งซึ่งสำคัญต่อการวัด Ellipsometry คือความขรุขระของพื้นผิว หรือรอยต่อของฟิล์มต้องน้อยกว่า ~10% ของความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการวัด ความสม่ำเสมอของฟิล์ม ที่ศึกษาไม่ควรมากกว่า 10% ของความกว้างของขนาดของจุดแสงที่ตกลงพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างแม้ว่า Ellipsometer จะเป็นเครื่องมือวัดที่มีความไวสูงและเชื่อมั่นได้มากแต่ก็ยังมีข้อเสียเรื่องความแม่นยำ เนื่องจากความแม่นยำนั้นขึ้นอยู่กับ การโมเดล ดังนั้นการวัด Ellipsometry จึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์จากผลของ Ellipsometer จาก การทดลองแบบอื่นๆ ประกอบไปด้วยเช่น การกระเจิงกลับแบบ Rutherford กล้องจุลทรรศน์ แบบ อิเล็กตรอนส่องผ่าน (Transmission electron microscope) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope)



รูปที่ 2.26 แสดงไดอะแกรมการหามวลล์พรีด้วยวิธี Ellipsometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการวัดเชิงแสงแบบ Ellipsometry มีหลักการตามไดอะแกรมข้างล่าง โดยเริ่มจากการวัดค่า ซายน์ และ คอสของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากแสงตกกระทบชิ้นงานนำค่าที่ได้ไปใส่ในโมเดล แล้วทำการหาค่าตำแหน่งชิ้นงานจะเกิดการสะท้อนทำให้แอมพลิจูดและเฟสของแสงโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงเกิดเป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงรีดังรูป



รูปที่ 2.27 แสดงการทดลองวัด Ellipsometry

2.7 คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

มีความแข็งแกร่งเป็นฉนวนไฟฟ้าเป็นสื่อความร้อน มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ มีความเค้น (stress) ในเนื้อฟิล์มสูง ใช้ในการเคลือบป้องกันได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี

2.7.1 คุณสมบัติของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรเมื่อเปรียบเทียบกับเพชร (DLC)

ตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่สังเคราะห์จากวิธีการต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) ที่สังเคราะห์จากวิธีการต่าง ๆ

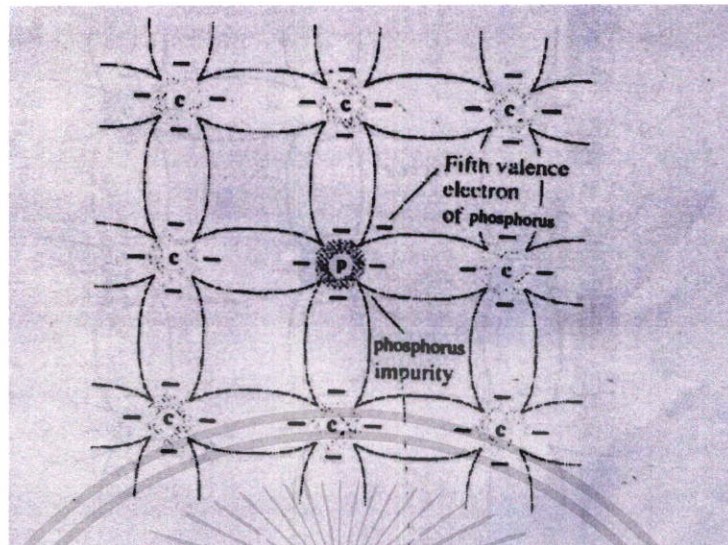
	Sputtered a-C:H	ECR	FCVA	Ion Beam
Hardness (GPa)	5 - 20	20 - 34	65 - 75	10 - 22
Youngs Modulus (GPa)	~ 170	~ 250	650 - 720	~ 170
SP3 bond (%)	0 - 30	25 - 40	80 - 88	—
Density (g/cm ³)	1.7 - 2.2	2.1 - 2.5	3.3 - 3.5	1.7 - 2.5
Friction coefficient	~0.12	~0.12	0.08 - 0.11	~0.12
Resistivity (Ω cm)	—	~ 10E12	~ 10E8 - 10E10	~ 10E8 - 10E12
Breakdown field (V/nm)	—	0.4 - 0.5	> 0.5	—
Compressive Stress (GPa)	~ 2	~ 4 - 10	2 - 3	~ 5
Hydrogen (%)	0 - 40	22 - 30	~ 0	22 - 45
Corrosion resistance	poor	good	excellent	good
Raman G peak (cm ⁻¹)	1540 - 1575	1530 - 1540	1565 - 1574	1530 - 1540
Optical band gap (eV)	0 - 2.0	2.5 - 3.6	~ 2.4	~ 2.5
Dep. Rate for 95mm (Å/sec)	~ 10	~ 10	~ 10	~ 20
Uniformity (95mm disk) \pm %	3	—	~ 2	3
Uniformity disk to disk \pm %	—	—	< 4%	—
Gas	H ₂ , Ar	CH ₄ , H ₂ , Ar	no gas	CH ₄ , H ₂ , Ar
Sensitivity to sub temp (°C)	~ 200	~ 200	~ 250 - 300	~ 200

2.8 สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และ พี

คุณลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเติมอะตอมสารเจือปน (impurity atoms) เข้าไปในสารกึ่งตัวนำเรียกว่ากระบวนการเติมสารเจือ (doping process) ถึงแม้ว่าจะเติมอะตอมสารเจือปนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำเพียงเล็กน้อยก็สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของแถบพลังงานและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้

2.8.1 สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น

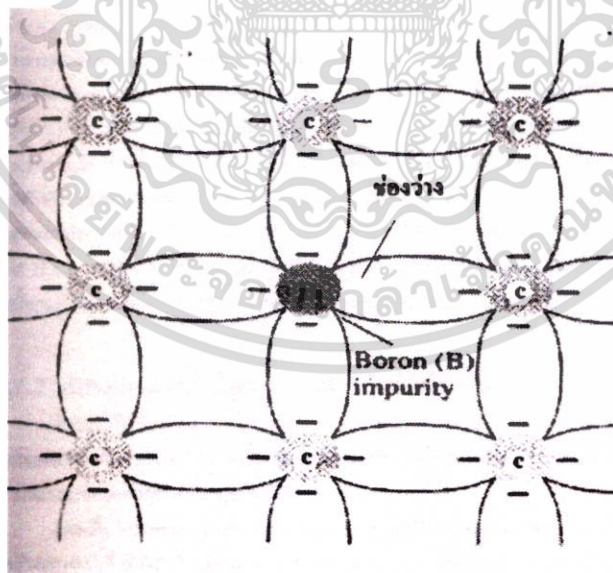
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเกิดจากการเติมอะตอมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวเช่น ฟอสฟอรัส แอนติโมนี อาร์เซนิก เป็นต้น ลงในซิลิกอนหรือ เพชรบริสุทธิ์



รูปที่ 2.28 แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่าง อะตอมสารเจือชนิด เอ็น และอะตอมสารกึ่งตัวนำ

2.8.2 สารกึ่งตัวนำชนิด พี

สารกึ่งตัวนำชนิด พี เกิดจากการเติมอะตอมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน (boron) แกลเลียม (gallium) และอินเดียม (indium) ลงใน ซิลิกอน หรือ เพชรบริสุทธิ์



รูปที่ 2.29 แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่าง อะตอมสารเจือชนิด พี และอะตอมสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

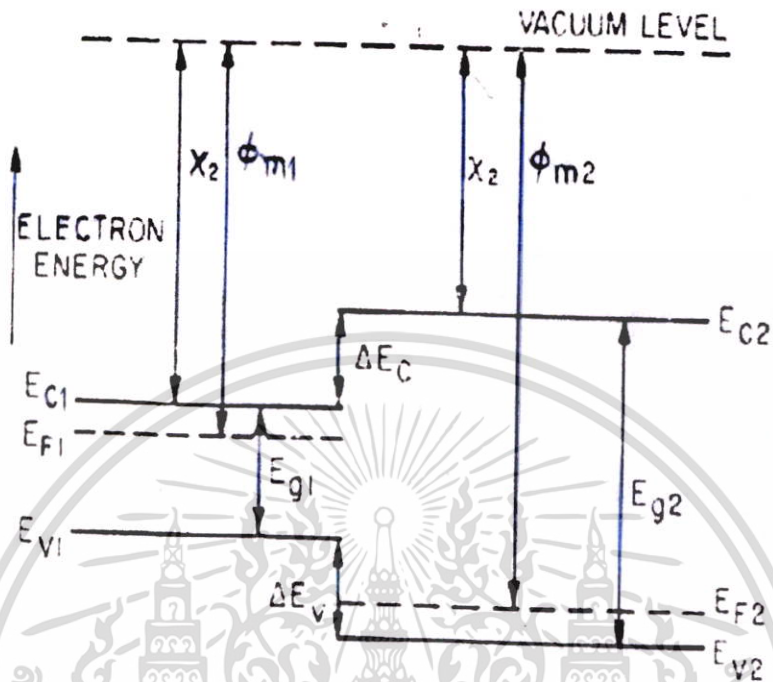
จากรูปที่ 2.29 เป็นตัวอย่างการเติมอะตอมสารเจือปนโบรอน (boron impurity ; B) ลงในคาร์บอนวาเลนซ์ อิเล็กตรอนทั้ง 3 ตัว ของโบรอน จะรวมตัวแบบโควาเลนซ์กับวาเลนซ์อิเล็กตรอนของคาร์บอน การรวมตัวกันระหว่างวาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้งสอง ขาดไป 1 ตัว ทำให้เกิดที่ว่าง หรือ โฮล (hole) และสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก ที่บริเวณดังกล่าว จะเห็นได้ว่าโฮลจะแสดงอำนาจของไฟฟ้าเป็นประจุบวก

2.9 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

จากรอยต่อของไดโอดจำเป็นที่จะต้องสร้างรอยสัมผัสขึ้น เพื่อสะดวกแก่การนำรอยต่อ พี - เอ็น ไปประกอบใช้งานร่วมกับสิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่นโดยที่ไม่ทำให้คุณสมบัติของรอยต่อ พี - เอ็น มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เลย ดังนั้นรอยสัมผัสนี้ จะต้องมีค่าความนำสูง ซึ่งไม่มีผลหรือเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแสและรอยสัมผัส ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้ เรียกกันว่า รอยสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact) โดยปกติทั่วไปที่ปลายทั้งสองด้านของไดโอด จะถูกสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกเพื่อการต่อเส้นลวดความนำออกมา รอยสัมผัสโอห์มมิกนี้สร้างขึ้นได้โดยการสัมผัสกันระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำ และโลหะ เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ อาจจะไม่ใช้รอยสัมผัสโอห์มมิกก็ได้ เช่นบางครั้งอาจแสดงคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ (rectifier) ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ที่สัมผัสกัน นอกจากนี้จะเห็นว่าไม่ว่ารอยสัมผัสหรือรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จะมีคุณสมบัติเป็น รอยสัมผัสโอห์มมิก หรือรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ ก็ตาม ต่างก็ถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี ทั้งที่แบบเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และ ชนิด พี

2.10 รอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกัน

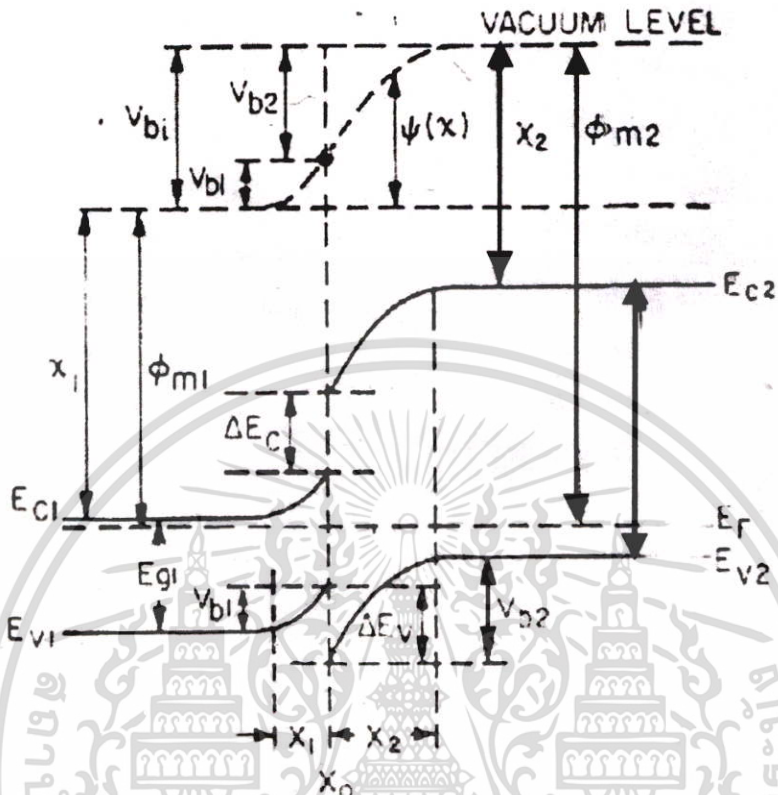
รอยต่อแบบสารต่างชนิดกัน (Heterojunction) เป็นรอยต่อ ระหว่างสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่มีระดับพลังงานแตกต่างกัน โดยมีความเข้ากันได้ดี ของ ค่าคงที่ของแลตทิส (lattice constant) และ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน แต่อย่างไรก็ตาม อาจจะไม่เสมอไปและอาจจะมีจุดบกพร่อง เช่น เกิดสภาวะ อินเตอร์เฟส ที่พื้นผิวของรอยต่อที่มีเนื้อสารต่างชนิดกันสภาวะนี้สามารถแสดงเป็นศูนย์กลางการทราปปิง (trapping center) และ จำกัดศักยภาพของอุปกรณ์ แบบจำลองแถบพลังงานของรอยต่อที่มีเนื้อสารต่างชนิดกัน แบบอุดมคติ โดยปราศจากสภาวะอินเตอร์เฟส ถูกเสนอโดย Anderson โดยมีพื้นฐานของ Shockley เราจะพิจารณาแบบจำลองนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 แสดง ไดอะแกรมแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน สารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดสมมุติว่ามีแถบพลังงาน (E) ค่า permittivity (ϵ) ค่าฟังก์ชันงาน (ϕ) และค่าอิเล็กตรอนแอฟฟิเนติ (χ) ที่แตกต่างกันซึ่งค่าฟังก์ชันงานและค่าอิเล็กตรอนแอฟฟิเนติ นิยามได้ว่า เป็นพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากระดับชั้น เฟอร์มิ (E_f) และ หลุดจากด้าน



รูปที่ 2.30 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่แยกกันอยู่

ล่างของระดับชั้นนำไฟฟ้า (conduction band ; E) ไปยังตำแหน่งที่อยู่นอกเนื้อสาร (ระดับสุญญากาศ) ตามลำดับ ความแตกต่างของพลังงานที่ขอบชั้นคอนดักชัน ในสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด แสดงได้ว่า ΔE_C และ ในชั้น วาเลนซ์ แสดงได้เป็น ΔE_V เมื่อรอยต่อที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำเหล่านี้ แถบพลังงานจะแสดงที่ สภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 2.30 เรียกรอยต่อแบบนี้ว่า รอยต่อ ชนิดเอ็น และ ชนิดพี ที่มีเนื้อสารต่างกัน (N - P Heterojunction) เป็นรอยต่อที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น ที่มีช่องว่างแถบพลังงานแคบ กับสาร กึ่งตัวนำ ชนิดพี ที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างต่อมาชั้นระดับพลังงานเฟอร์มิต้องอยู่ในแนวเดียวกันทั้ง 2 ด้าน ในสภาวะสมดุล และ ระดับสุญญากาศ จะขนานกับขอบของ แถบพลังงานไปตลอด ส่วนความไม่ ต่อเนื่องกันที่ขอบชั้นคอนดักชัน (ΔE_C) และขอบชั้นวาเลนซ์ (ΔE_V) เป็นค่าที่ขึ้นกับการเติมสารเจือใน สารเหล่านี้ ที่ซึ่ง E_g และ X ไม่เป็นฟังก์ชันของการเติมอะตอมสารเจือ ค่า built - in potential รวม (V_{bi}) จะเท่ากับ การรวมของ partial built - in voltages ($V_{b1} + V_{b2}$) ที่ซึ่ง V_{b1} และ V_{b2} เป็นค่าศักย์ อิเล็กโตร สตาติก (electrostatic potential) ที่สภาวะสมดุล โดยสารกึ่งตัวนำ ชนิด 1 และ 2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



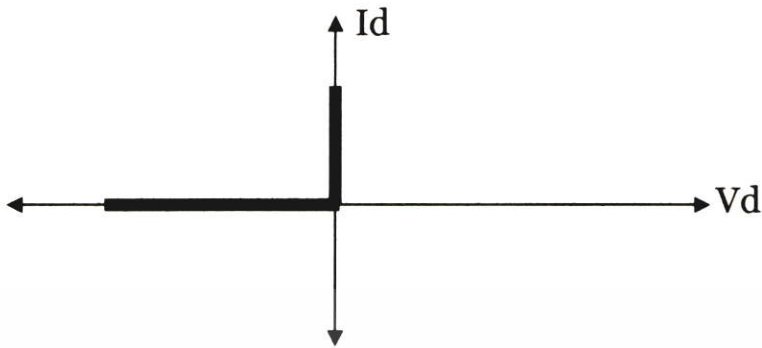
รูปที่ 2.31 แสดงแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน แบบชนิดเอ็น และ ชนิดพีที่สภาวะสมดุลย์

2.11 สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำไดโอด

2.11.1. ไดโอดในอุดมคติ

ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี และ ชนิดเอ็น สามารถควบคุมให้กระแสไฟฟ้จากภายนอกไหลผ่านตัวมันได้ทิศทางเดียว ไดโอดในอุดมคติมีลักษณะเหมือนสวิตช์นำกระแสไปได้ในทิศทางเดียว ถ้ากำหนดให้ V_0 เป็นแรงดันคร่อมไดโอดและ I_0 เป็นกระแสที่ไหลผ่านไดโอด ถ้าขั้วต่อแบตเตอรี่ให้เป็นแบบไบแอสตรง ไดโอดจะเปรียบเสมือนกับสวิตช์ที่ปิด (close switch) หรือ ไดโอดลัดวงจร (short circuit) I_0 ไหลผ่านไดโอดได้ ในทางตรงข้าม ถ้าขั้วต่อแบตเตอรี่แบบไบแอสกลับ ไดโอดจะเปรียบเสมือนสวิตช์เปิด (open switch) หรือไดโอดเปิดวงจร (open circuit) ทำให้ I_0 เท่ากับศูนย์ และถ้านำค่า V_0 กับ I_0 ขณะต่อแบบไบแอสตรงและไบแอสกลับ มาเขียนเป็นกราฟแสดงคุณลักษณะของไดโอด จะได้ดังรูปที่ 2.32

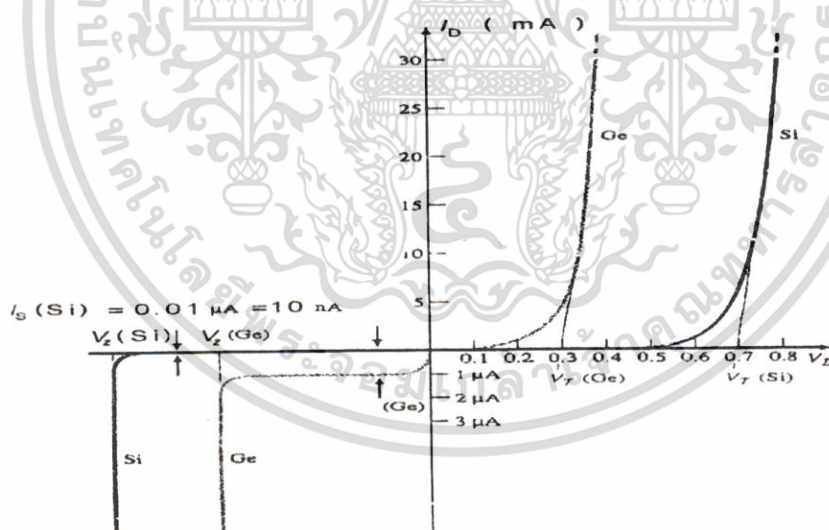
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 แสดงไดโอดในอุดมคติ

2.11.2 ไดโอดในทางปฏิบัติ

ไดโอดในทางปฏิบัติมีการแพร่กระจายของพาหะส่วนน้อยอยู่บริเวณรอยต่อจำนวนหนึ่ง ดังนั้น ถ้าต่อไบแอสตรงให้กับไดโอดในทางปฏิบัติก็จะเกิด แรงดันเสมือน ที่คอยต้านแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเพื่อการไบแอสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดัน ของไดโอดในทางปฏิบัติ

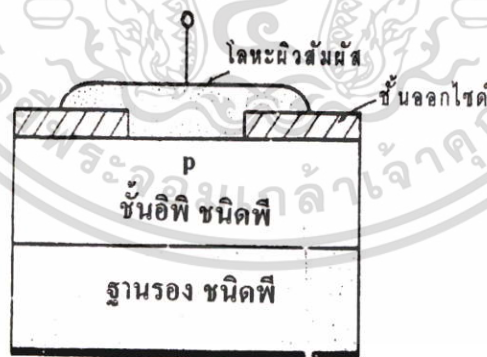
กล่าวคือ ถ้าต้องการให้ไดโอดในทางปฏิบัติ นำกระแสได้ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งให้มีค่ามากกว่า แรงดันเสมือน หรือ ขนาดของแรงดันเสมือนเป็นตัวบ่งบอกจุดทำงานของไดโอดนั่นเอง ดังนั้นจึงเรียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเสมือน อีกอย่างหนึ่งคือ แรงดันในการเปิด (turn on voltage ; V_T) กรณีไบแอสกลับ บริเวณชั้นปลดพาหนะจะขยายกว้างขึ้นแต่ยังมีพาหะข้างน้อยแพร่กระจายที่รอยต่ออยู่จำนวนหนึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้เล็กน้อย กระแสดังกล่าว เรียกว่า กระแสรั่วไหล (leakage current) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรื่อย ๆ กระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ไดโอดนำกระแสเพิ่มขึ้น อย่างมาก ระดับกระแสที่จุดนี้เรียกว่า กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse saturation current; I_S) แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่าแรงดันพังทลาย (breakdown voltage) และถ้าแรงดันไบแอสกลับสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ไดโอดทนได้ เรียกว่าแรงดันพังทลายซีเนอร์ (zener breakdown voltage ; V_Z) ถ้าแรงดันไบแอสกลับสูงกว่า V_Z จะเกิดความร้อนอย่างมากที่รอยต่อของไดโอด ส่งผลให้ไดโอดเสียหายหรือพังได้ แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้ เรียกว่า แรงดันพังทลายอวาแลนซ์ (avalanche breakdown voltage) ดังนั้นการนำไดโอดไปใช้งานจึงใช้งานกับไบแอสตรงเท่านั้น

2.11.3 ขอตติ์กี ไดโอด

ไดโอดชนิดนี้แตกต่างจาก ไดโอดแบบโครงสร้างที่มีรอยต่อ พี - เอ็น ทัว ๆ ไป เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของไดโอดชนิดนี้ ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่าง โลหะและสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำ อาจจะเป็นชนิด เอ็นหรือชนิด พี ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.34 กระแสซึ่งไหลผ่านไดโอดนี้จะเป็นกระแสของพาหะส่วนมากเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากไดโอดโดยทั่ว ๆ ไป และจากสาเหตุดังกล่าว ทำให้ไดโอดชนิดนี้มีความรวดเร็วในการทำงานสูงมาก



รูปที่ 2.34 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของขอตติ์กีไดโอด

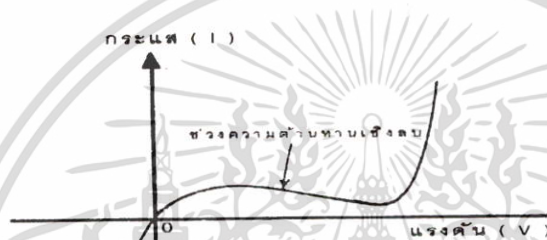
ดังนั้นจึงทำให้ไดโอดชนิดนี้ เหมาะที่จะนำไปใช้กับ งานย่านความถี่สูง ๆ เช่นในวงจรการผสมสัญญาณไมโครเวฟ หรือ ในวงจรรับสัญญาณไมโครเวฟได้ดี นอกจากนี้ไดโอดชนิดนี้ยังนำไปใช้วงจร ตรรกแบบ TTL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

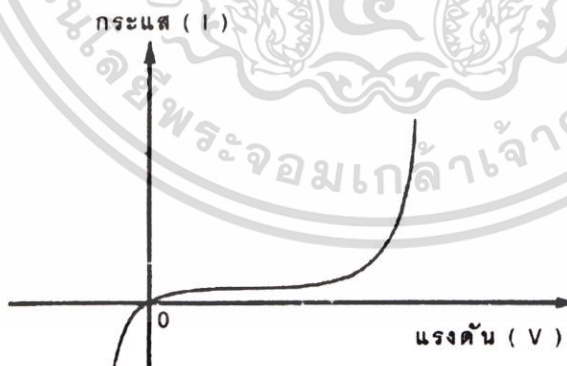
โดยการต่อคร่อมระหว่างขั้วของเบส และ ขั้วของคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์นั้น มีความรวดเร็วในการทำงานเพิ่มขึ้นมาก จึงนับได้ว่าไดโอดชนิดนี้เป็น switching diode แบบพิเศษชนิดหนึ่ง

2.11.4 แบคเวิร์ทไดโอด

แบคเวิร์ทไดโอดเป็นไดโอดซึ่งทั้งสองด้านของรอยต่อ พี - เอ็น มีปริมาณความหนาแน่นของสารเจือสูงกว่าซีเนอร์ไดโอด คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส และแรงดันของไดโอด ชนิดนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.35 และรูปที่ 2.36 ตามลำดับ



รูปที่ 2.35 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบคเวิร์ทไดโอดชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ

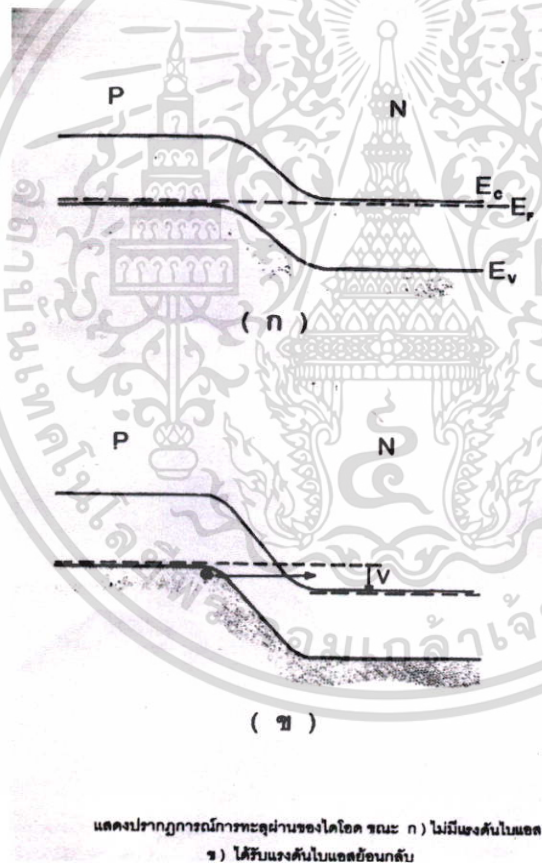


รูปที่ 2.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบคเวิร์ทไดโอดชนิดที่ไม่มี ความต้านทานเชิงลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม จะมีกระแสไหลผ่านเป็นจำนวนมาก ซึ่งอธิบายได้ด้วยโครงสร้างแถบพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.37

โดยกล่าวสรุปว่าประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณปลอดพาหะ ที่แคบ ๆ ของรอยต่อ พี - เอ็น ได้ โดยไม่มีการชนกัน และขณะที่ได้รับไบอัสกระแสตรงจะมีค่าน้อย ดังนั้นจึงมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตรงกันข้ามกับไดโอดทั่ว ๆ ไป จึงเรียกไดโอดชนิดนี้ว่า แบคเวิร์ดไดโอด แต่อย่างไรก็ดี ถ้าหากความหนาแน่นสารเจือมีค่าสูง ๆ อาจปรากฏคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบทางด้านแรงดันไบอัสตรงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.37 ไดโอดชนิดนี้สามารถที่จะใช้ในการ ตรวจจับสัญญาณได้ โดยเฉพาะในย่านความถี่สูง เช่น ไมโครเวฟ แต่คุณสมบัติ กระแส - แรงดัน ของไดโอดชนิดนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับอุณหภูมิซึ่งเปลี่ยนแปลงไป

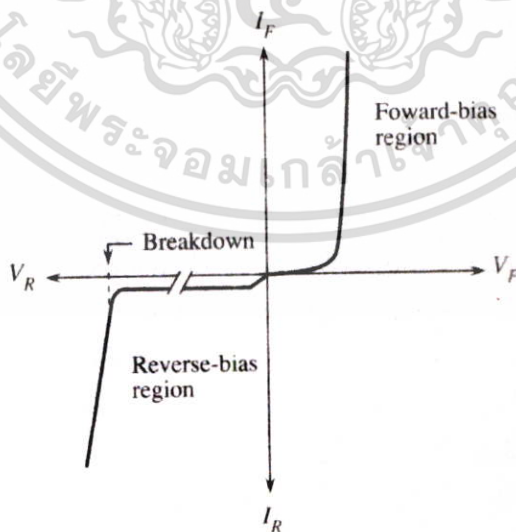
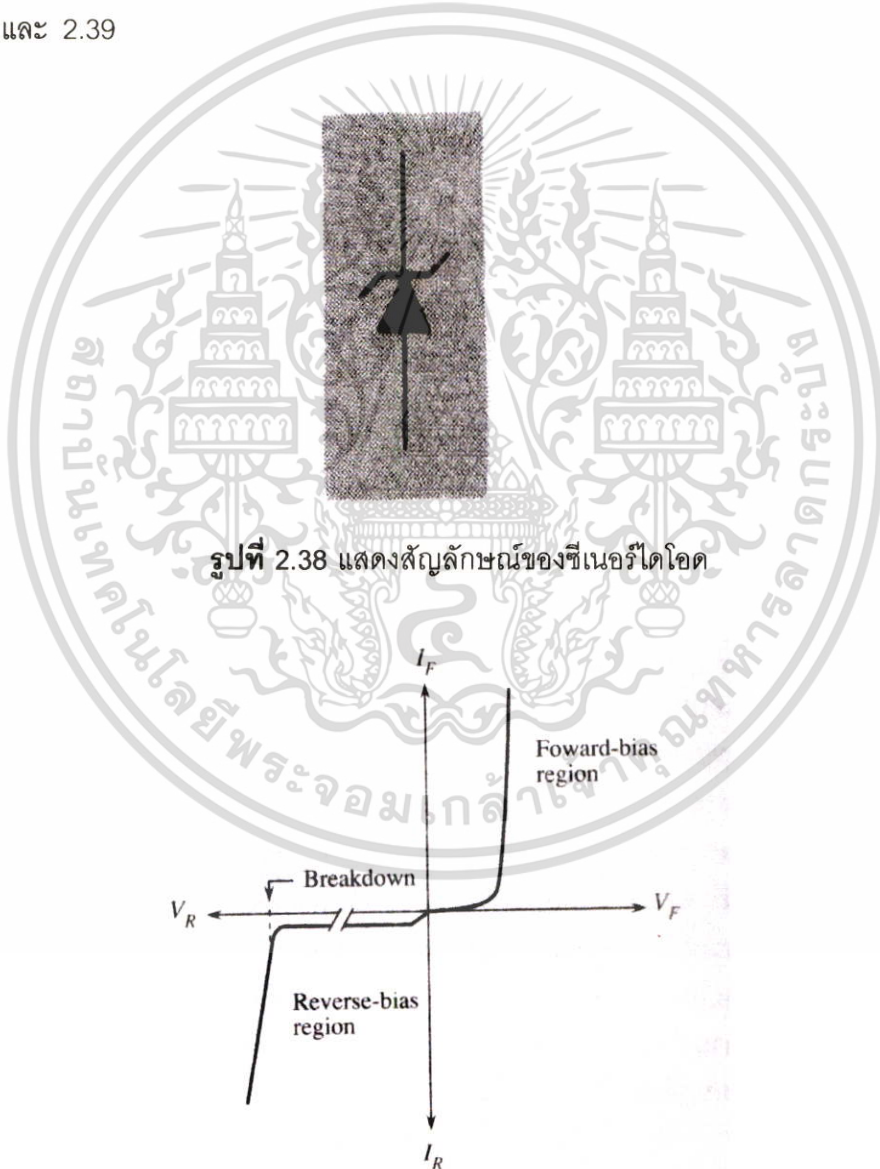


รูปที่ 2.37 แสดงปรากฏการณ์การทะลุผ่านของไดโอดขณะ ก) ไม่มีแรงดันไบอัส ข) ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 ความรู้เกี่ยวกับซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode)

ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) เป็นไดโอดชนิดพิเศษที่สร้างให้มีการทำงานแตกต่างจากไดโอดเรียงกระแสทั่ว ๆ ไป กล่าวคือ เมื่อให้ไบอัสตรงกับซีเนอร์ไดโอดการทำงานจะเหมือนกับไดโอดเรียงกระแสคือ นำกระแสได้ และมีแรงดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอดขณะได้รับไบอัสตรงเท่ากับ V_B แต่เมื่อซีเนอร์ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับถึงค่าแรงดันที่กำหนด (กำหนดค่าแรงดันขึ้นในกระบวนการสร้างซีเนอร์ไดโอดเช่น 2.2 V , 5.1 V , 6 V , 10 V , 12 V ฯลฯ) ซีเนอร์ไดโอดจะนำกระแสได้และจะเกิดแรงดันตกคร่อมตัวเองที่เท่ากับค่าแรงดันที่กำหนดจากบริษัทผู้ผลิต สัญลักษณ์และกราฟลักษณะสมบัติของซีเนอร์ไดโอดแสดงในรูปที่ 2.38 และ 2.39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.1 การพังทลายของซีเนอร์ (Zener Breakdown)

การพังทลายของไดโอดแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือการพังทลายแบบอะวาลันช์ (Avalanche) เมื่อไดโอดได้รับไบอัสกลับแรงดันสูงทำให้มีกระแสไหลย้อนกลับผ่านไดโอดจำนวนมากทำให้รอยต่อของไดโอดทะลุและใช้งานไม่ได้ การพังทลายอีกหลายแบบ คือการพังทลายแบบซีเนอร์ เป็นการพังทลายที่เกิดขึ้นกับแรงดันไบอัสกลับค่าต่ำ ๆ ซึ่งกำหนดได้จากการโพลีสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเป็นซีเนอร์ไดโอด การพังทลายแบบซีเนอร์นี้จะมีกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดจำนวนหนึ่งซึ่งต้องรักษาไม่ให้เกินค่าพิคสูงสุดและจะเกิดสภาวะที่แรงกดดันตกคร่อมซีเนอร์ไดโอดมีค่าคงที่ เรียกว่าแรงดันซีเนอร์ (Zener Voltage , V_Z) คุณสมบัติข้อนี้สามารถนำซีเนอร์ไดโอดไปสร้างเป็นวงจรควบคุมแรงดันไฟตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าแรงดันคงที่ได้ (Zener Regulated Power Supply) ซีเนอร์ไดโอดที่มีใช้อยู่ในท้องตลาดมีขนาดแรงดันซีเนอร์ ตั้งแต่ 1.8 V ถึง 200 V

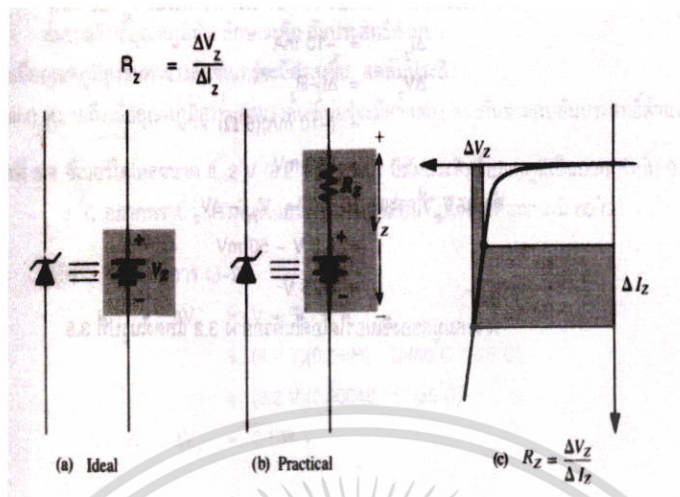
2.12.2 คุณลักษณะของการพังทลาย (Breakdown Characteristics)

พิจารณาจากกราฟลักษณะสมบัติโดยเฉพาะการพังทลายของซีเนอร์ไดโอดเมื่อได้รับไบอัสกลับดังรูปที่ 2.39 เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับจนถึงค่าแรงดันซีเนอร์ (V_Z) จะเกิดกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดมากขึ้น ที่จุดเอียงของกราฟ (Knee Point) จะมีกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดเท่ากับ I_{ZK} และถ้าซีเนอร์ไดโอดได้รับแรงดันสูงขึ้นอีกกระแสจะเพิ่มขึ้นแต่แรงดันซีเนอร์ (V_Z) จะคงที่แต่ถ้าเพิ่มกระแสเกินกว่าค่ากระแสซีเนอร์สูงสุด (I_{ZM}) แรงดันซีเนอร์ (V_Z) จะไม่คงที่

ดังนั้นการนำซีเนอร์ไดโอดไปใช้ในการควบคุมให้แรงดันไฟตรงคงที่โดยใช้ค่าแรงดันซีเนอร์นั้นจึงต้องออกแบบวงจรควบคุมให้มีกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอดย่านระหว่างค่ากระแส I_{ZK} ถึงค่า I_{ZM} สำหรับกระแส I_{ZT} หมายถึงค่ากระแสทดสอบค่าแรงดันซีเนอร์ (Zener Test Current) ซึ่งเป็นค่ากระแสที่พิคคของแรงดันซีเนอร์ตามค่าที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ใน Data Sheet

2.12.3 วงจรสมมูลของซีเนอร์ไดโอด

เนื่องจากซีเนอร์ไดโอดมีคุณสมบัติจ่ายแรงดันคงที่เมื่อได้รับไบอัสกลับดังนั้นในทางอุดมคติ (Ideal) ซีเนอร์ไดโอดจึงมีวงจรเทียบเท่าหรือวงจรมูลเป็นแบบเตอร์มีขนาดแรงดันไฟตรงเท่ากับ V_Z โดยมีขั้วบวกของ V_Z อยู่ที่แคโทดและขั้วลบของ V_Z อยู่ที่แอนโนด ดังรูปที่ 2.40 (a) แต่ในทางปฏิบัติจะมีความต้านทานภายในรอยต่อของซีเนอร์ไดโอดอยู่ด้วย ดังนั้นวงจรมูลของซีเนอร์ไดโอดในทางปฏิบัติจึงเป็นดังรูปที่ 2.40(b) ซึ่งค่าความต้านทานของซีเนอร์ไดโอด นี้มีค่าเท่ากับสมการในรูป 2.40

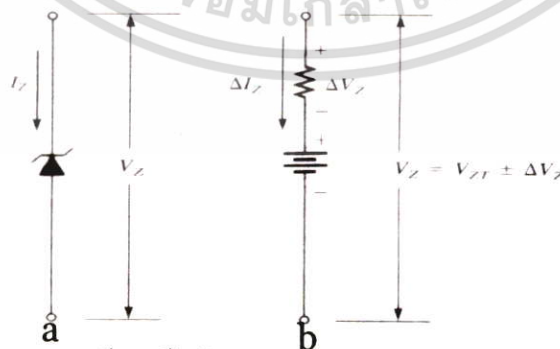


รูปที่ 2.40 แสดงวงจรมูลของซีเนอร์ไดโอดและการหาค่าความต้านทานภายในของซีเนอร์ไดโอด

2.13 การประยุกต์ใช้งานซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode)

2.13.1 การควบคุมแรงดันขาออกให้คงที่เมื่อแรงดันขาเข้าเปลี่ยนแปลง (Output Voltage Regulation With a Varying Input Voltage)

เมื่อนำซีเนอร์ไดโอดต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าปรับค่าได้ (DC Power Supply) ดังรูปที่ 2.41 (a) และปรับค่าแรงดันป้อนเข้าซีเนอร์ไดโอด V_{in} ให้มีค่ามากกว่าแรงดันซีเนอร์ V_z จะเกิดกระแสซีเนอร์ I_z ไหลผ่าน R และซีเนอร์ไดโอดจะเห็นว่าแรงดันขาออกของวงจร V_{out} มีค่าคงที่ (สังเกตจากมิเตอร์) แต่ถ้าลดแรงดันลง V_{in} แต่ต้องไม่น้อยกว่าค่า V_z ดังรูปที่ 2.41 (b) จะทำให้กระแส I_z ลดลง ซึ่งถ้ากระแส I_z มีค่าอยู่ระหว่าง I_{zk} ถึง I_{zm} แล้วค่าแรงดัน V_{out} จะยังคงที่อยู่เสมอ

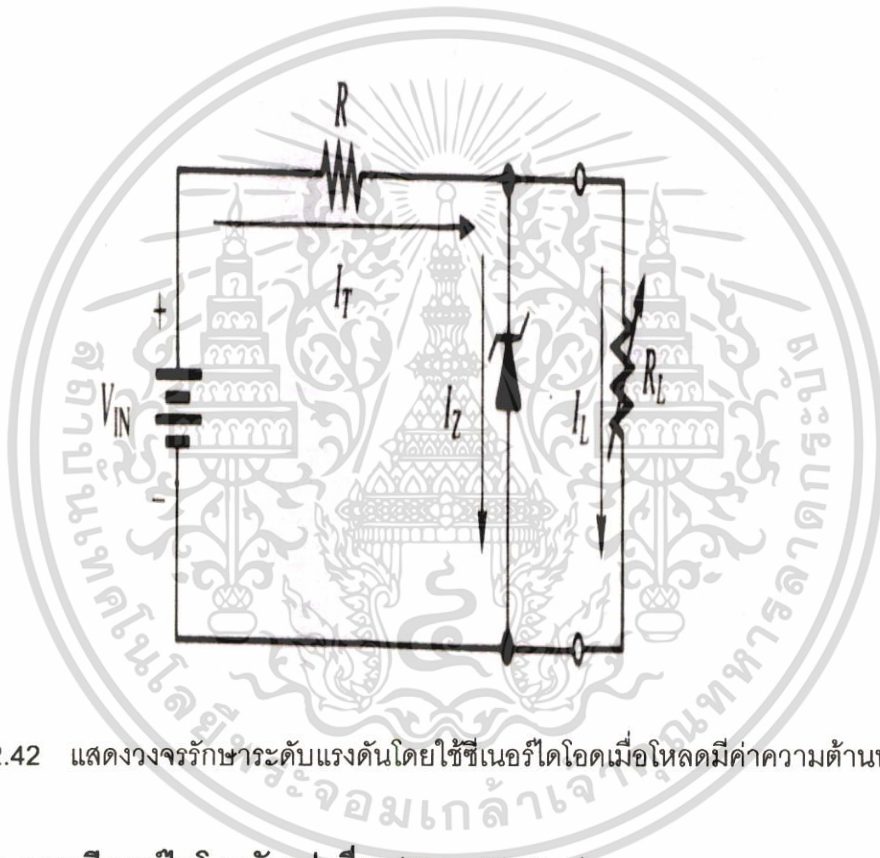


รูปที่ 2.41 แสดงวงจรมูลของซีเนอร์ไดโอดและการควบคุมแรงดันขาออกให้คงที่เมื่อแรงดันขาเข้าเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.2 การควบคุมแรงดันเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง (Voltage Regulation With a Varying Load)

เมื่อนำโหลด R_L มาต่อเข้ากับเอาต์พุตของวงจรควบคุมแรงดันคงที่ที่ใช้ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode Voltage) ดังรูปที่ 2.42 ซึ่งซีเนอร์ไดโอดจะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันตกคร่อมโหลด R_L ให้มีค่าแรงดันคงที่ค่าแรงดันซีเนอร์ V_Z ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ผ่านซีเนอร์ไดโอดนั่นเอง การเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสโหลด I_L เนื่องจากค่าความต้านทานโหลดเปลี่ยนแปลงนั้นจะเป็นผลให้ค่าของกระแสซีเนอร์ I_Z เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การที่ซีเนอร์ไดโอดจะรักษาระดับแรงดันซีเนอร์ V_Z และย่านของกระแสโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปแต่ระดับแรงดันตกคร่อมโหลดยังคงที่อยู่ได้ เรียกว่า Regulation

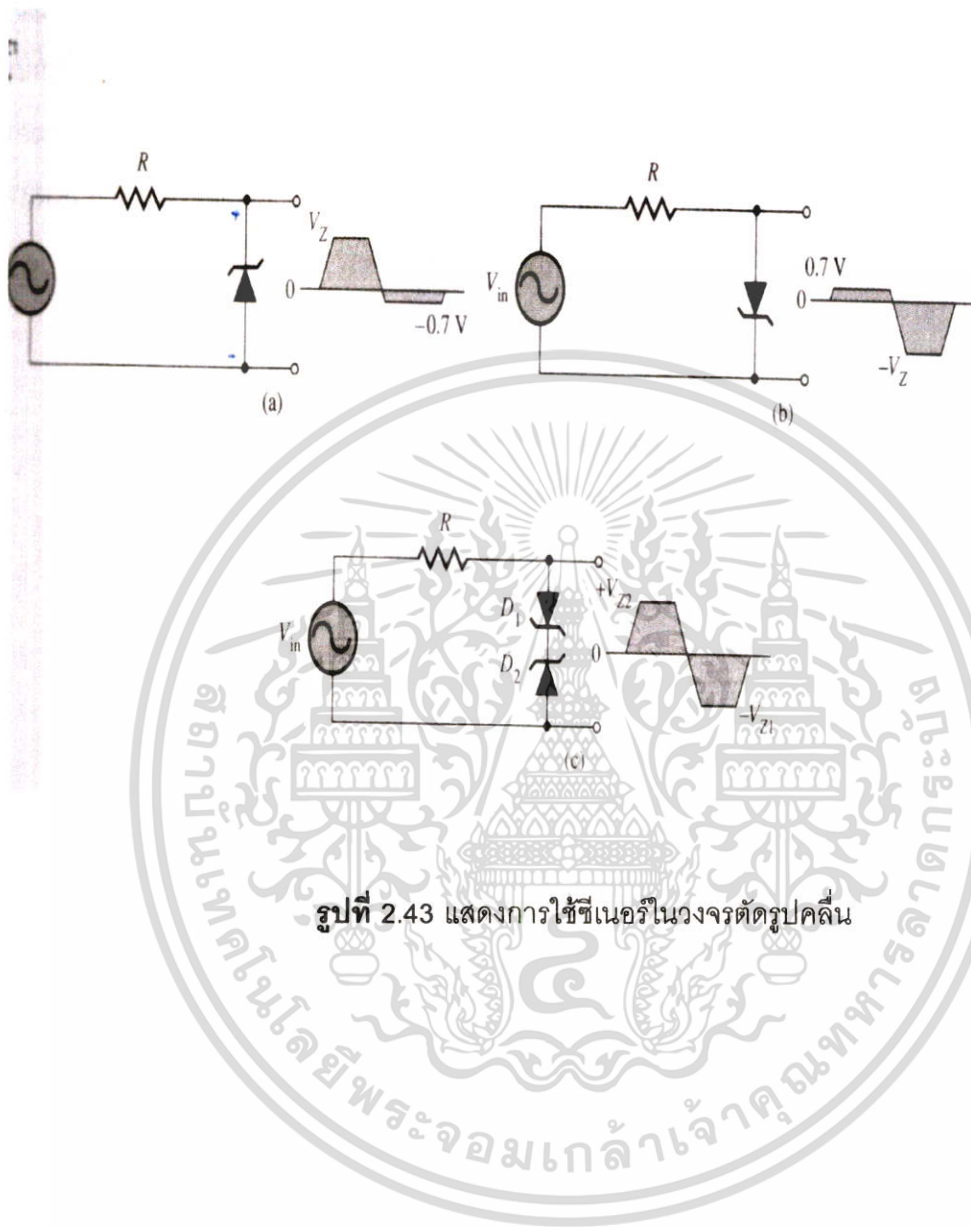


รูปที่ 2.42 แสดงวงจรรักษาระดับแรงดันโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดเมื่อโหลดมีค่าความต้านทานไม่คงที่

2.13.3 วงจรซีเนอร์ไดโอดตัดรูปคลื่น (Zener Limiting)

การนำซีเนอร์ไดโอดไปใช้งานอีกรูปแบบหนึ่ง คือ ในวงจรตัดรูปคลื่นที่ต้องการกำหนดระดับแรงดันขาออกสูงสุดของรูปคลื่น ให้มีค่าเท่ากับค่าแรงดันซีเนอร์ เช่น วงจรตัดรูปคลื่นด้านลบในรูปที่ 2.43(a) จะมีรูปคลื่นด้านบวกเพียงด้านเดียวและขนาดสูงสุดของรูปคลื่นครึ่งบวกจะมีค่าเท่ากับ $+V_Z$ ในทำนองเดียวกัน ในรูปที่ 2.43(b) เป็นวงจรตัดรูปคลื่นด้านบวกแรงดันขาออกจะมีเฉพาะรูปคลื่นด้านลบซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ $-V_Z$ สำหรับวงจรในรูปที่ 2.43(c) เป็นวงจรตัดรูปคลื่นที่ด้านบวกและลบให้มีค่าแรงดันสูงสุดของด้านบวกเท่ากับ $+V_{Z2}$ และแรงดันสูงสุดของรูปคลื่นทางด้านลบเท่ากับ $-V_{Z1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.43 แสดงการใช้ซีเนอร์ในวงจรตัวคูณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรหลักการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีรอยต่อ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำไดโอด กระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้างโลหะกับฟิล์มเพชร กระบวนการสร้างขอตักไดโอด กระบวนการสร้างไดโอดแบบ รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันระหว่างฟิล์มเพชรชนิด n กับซิลิคอนชนิด p ความรู้เกี่ยวกับ zener diodeและการประยุกต์ใช้งาน zener diode สำหรับในบทนี้จะเป็นการศึกษาถึงกระบวนการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรบนฐานรองซิลิคอน การเตรียมฐานรอง กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร กระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง DLC/n-Si และ DLC/p-Si ผลของฐานรองต่างชนิดกันและการวัดคุณสมบัติต่างๆของ DLC/n-Si และ DLC/p-Si

3.1 กระบวนการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรบนฐานรองซิลิคอน

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

การเลือกชนิดของฐานรองเพื่อใช้สำหรับการสังเคราะห์ ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร มี 3 ชนิดคือ

3.1.1.1 แก้ว

3.1.1.2 ซิลิคอนชนิด n มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $5.5\Omega \cdot \text{cm}$ หนา (111)

3.1.1.3 ซิลิคอนชนิด p มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $5.5\Omega \cdot \text{cm}$ หนา (111)

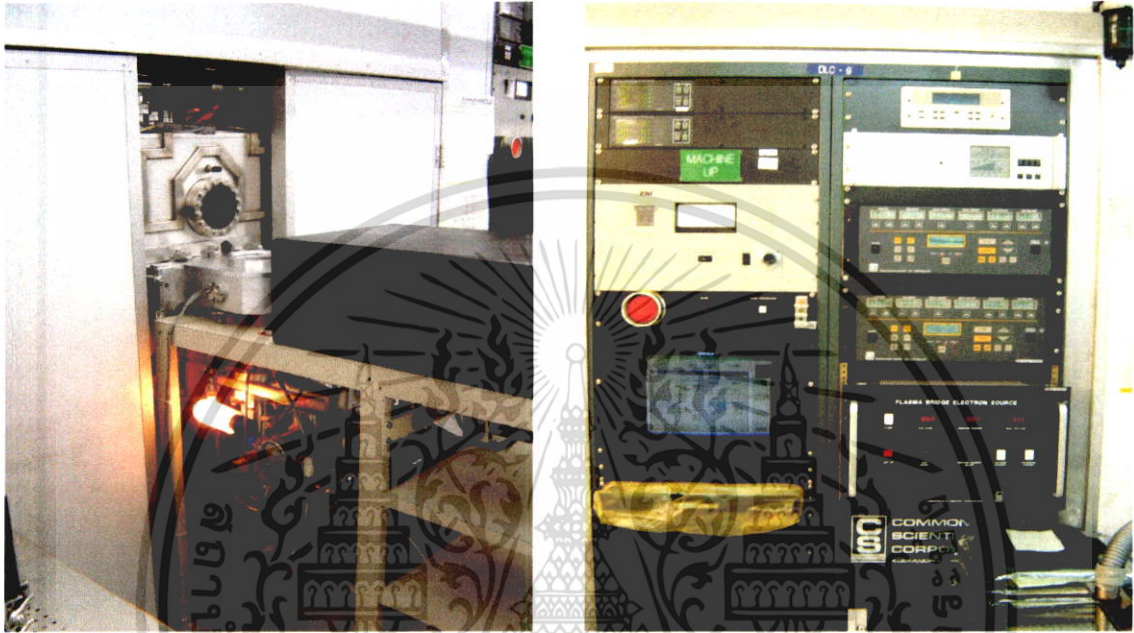
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ Ion Beam CVD

การสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธี Ion Beam CVD ด้วยชุดเครื่องมือดังรูป 3.1 โดยมีไดอะแกรมของระบบ CVD ที่ใช้งานอย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3.1.3 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constance current source) ซึ่งมี 2 ชุด คือ ชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-100 mA และชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-10 A รวมถึงนาโนโวลต์ มิเตอร์ (Nanovolt meter) ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำถึง 10 nV



เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร Ion Beam CVD



รูปที่ 3.2 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ชุดอุปกรณ์วัดคุณสมบัติฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) โดยใช้

3.1.2.1 เทคนิค Raman

3.1.2.2 วัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรโดยใช้ AFM

3.1.2.3 วัดความเค้นของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรโดยใช้ Tencor



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์วัดคุณสมบัติฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร

3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร

การสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธี Ion Beam CVD ด้วยชุดเครื่องมือดังรูป 3.1 โดยมีไดอะแกรมของระบบ CVD ที่ใช้งานอย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3.2.1 นำแผ่นฐานรองมาวางในช่องวางชิ้นงาน

3.2.2 เลือกโปรแกรมการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)

3.2.3 ระบบจะดึงแผ่นฐานรองเข้าสู่ chamber แล้วทำการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)

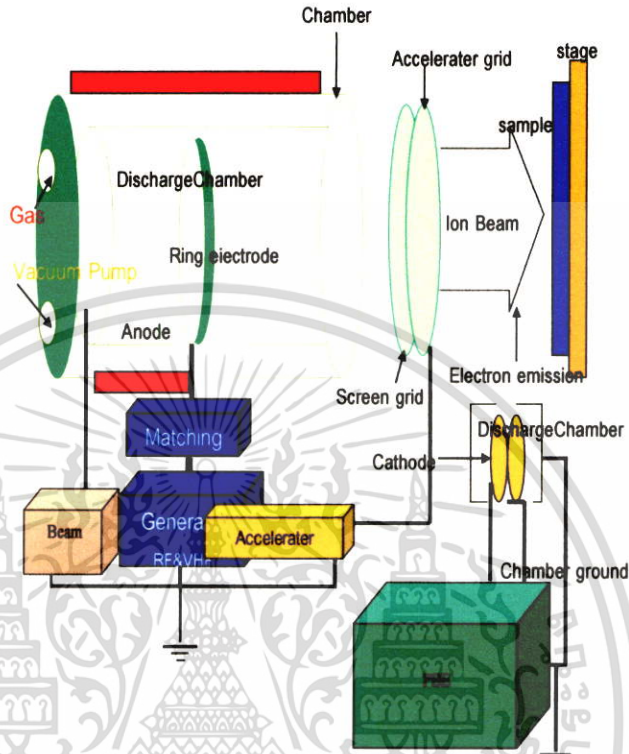
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ระบบ Ion Beam CVD

ส่วนประกอบที่สำคัญ

1. ระบบภาวะสุญญากาศ
2. ระบบก๊าซ
3. ระบบกำเนิดพลังงาน
4. ระบบพลาสมา
5. ระบบเร่งพลาสมา
6. ระบบกำเนิดอิเล็กตรอน



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมระบบ Ion Beam CVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

3.3 กระบวนการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) บนฐานรองซิลิคอนและแก้ว

เป็นกระบวนการทดลองเพื่อศึกษาการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)เพื่อศึกษาอัตราการเกิดฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)เพื่อให้รู้ค่าความหนาที่เหมาะสม,อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ มีเทนต่อก๊าซอะเซทีลีน,อุณหภูมิของฐานรอง ,ระยะห่างระหว่างปืนกับฐานรองและ ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) ที่ความหนาต่างๆ กัน ได้แก่ 25 Å , 50 Å ,75 Å ,100 Å ,125 Å , 200 Å , 300 Å , 400 Å และ 500 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดลองเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร

การทดลองตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) โดยทดลองศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่องมือต่อไปนี้

3.4.1 ทำการทดลองเพื่อวัดคุณสมบัติฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรโดยใช้เทคนิค Raman โดยทำการวัดตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) จากตัวอย่างชิ้นงาน 5 ชิ้นที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Ion Beam CVD มีความหนาต่าง ๆ กัน ได้แก่ 25 Å , 50 Å , 75 Å , 100 Å และ 125 Å

3.4.2 ทำการทดลองวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรโดยใช้ AFM โดยทำการวัดความหนาของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) จากตัวอย่างชิ้นงาน 9 ชิ้นที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Ion Beam CVD ที่เวลา 1นาทื , 2นาทื , 3นาทื , 4นาทื , 5นาทื , 8นาทื , 12นาทื , 16นาทื และ 20นาทืดังนี้

3.4.3 ทำการทดลองวัดความเค้นของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรโดยใช้ Tencor โดยทำการวัดตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) จากตัวอย่างชิ้นงาน 5 ชิ้นที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Ion Beam CVD มีความหนาต่าง ๆ กัน ได้แก่ 25 Å , 50 Å , 75 Å , 100 Å และ 125 Å

3.5 การเตรียมฐานรอง

เป็นกระบวนการเตรียมฐานรองของวิธี Ion Beam CVD เป็นขั้นตอนของการทำความสะอาดฐานรองโดยการใช้ก๊าซออกซิเจนเข้าไปใน chamber ด้วยอัตราการไหล 25 ลบ.ซม.วินาที RF Power 300 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาทีกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวของฐานรองมีขั้นตอนการทำงาน 3 ขั้นตอนดังนี้

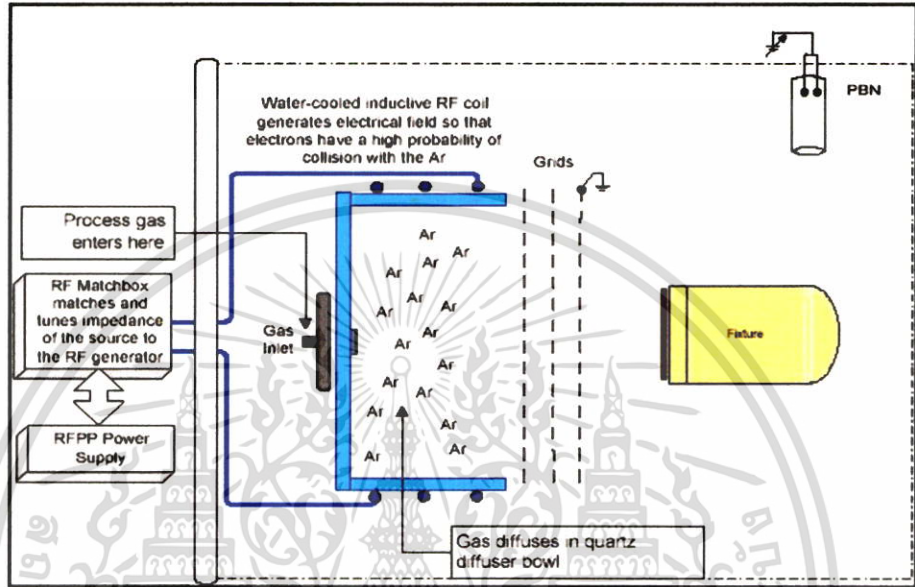
3.5.1 ขั้นตอนแรกปั๊มสุญญากาศจะดูดอากาศภายใน chamber ซึ่งภายใน chamber จะมีค่าความดัน 3×10^{-4} torr ให้มีค่าความดันมีค่าเท่ากับ 7×10^{-6} torr ขั้นตอนที่สองก๊าซออกซิเจนจะไหลเข้าสู่ chamber ด้วยอัตราความเร็ว 25 sccm ดังรูปที่ 3.5

3.5.2 ก๊าซออกซิเจนจะแตกตัวเป็น Ar+ โดยมี Plasma Bridge Neutralizer (PBN) เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และมีค่า RF Power 300 Watts ดังรูปที่ 3.6

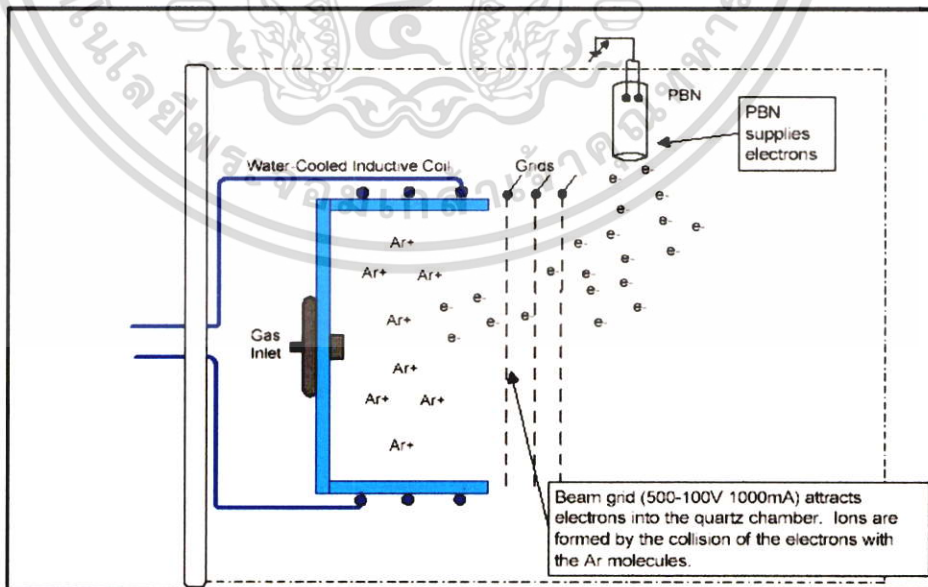
3.5.3 ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองเป็นเวลา 10 นาที ดังรูปที่ 3.7

3.6 การทดลองวัดค่าความเค้นโดยอ้อมโดยไม่ทำลายชิ้นงาน

ทำการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรด้วยวิธี IBCVD (Ion Beam Chemical Vapor Deposition) โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นก๊าซอาร์แกน แล้วกระตุ้นให้เกิดเป็นพลาสมาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่ ได้มีความหนาต่าง ๆ ตามเวลาการสร้างแสดงในตาราง 3.1

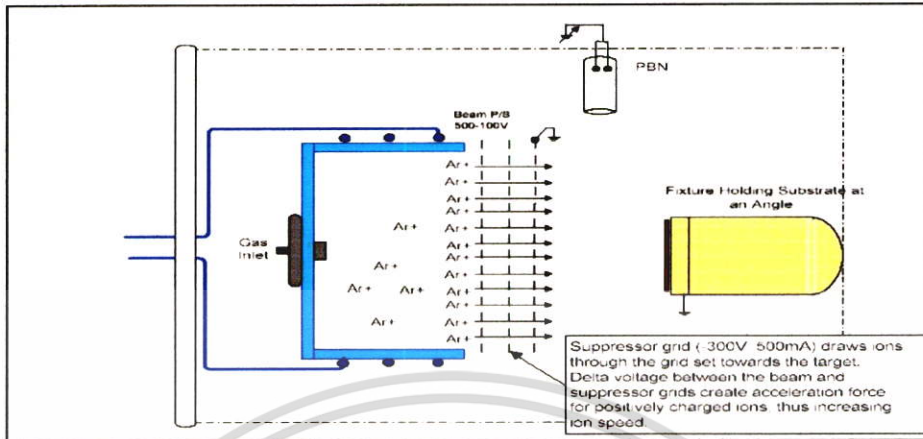


รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 1



รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 3

ตารางที่ 3.1 แสดงเวลาในการสร้างฟิล์ม DLC เพื่อใช้ในการทดสอบความเค้น และค่า Raman

Sample ID.	Deposition Time (Minute)	Thickness (Å)
1	1	25
2	2	50
3	3	75
4	4	100
5	5	125

ขั้นตอนแรกในการทดสอบฟิล์ม DLC ที่สังเคราะห์ได้นั้น จะนำซิลิกอนเวเฟอร์ที่เคลือบ ด้วย DLC แล้วมาวัดค่าความเค้นด้วยเครื่อง Tencor ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับหาค่าความเค้นโดยการคำนวณจากความโค้งโค้งของแผ่นเวเฟอร์ ต่อจากนั้นจะใช้ Raman spectroscope วิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้เลเซอร์สีเขียวของอาร์กอนไอออนที่มีความยาวคลื่น 514 nm ได้กลังจลทรรศน์กำลังขยาย 50 เท่าที่เลนส์วัตถุและควมคุมกำลังงานของเลเซอร์ให้คงที่ ที่ 20 mW

3.7 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) การสร้างรอยสัมผัสแบบโหนดด้วยโลหะเงิน

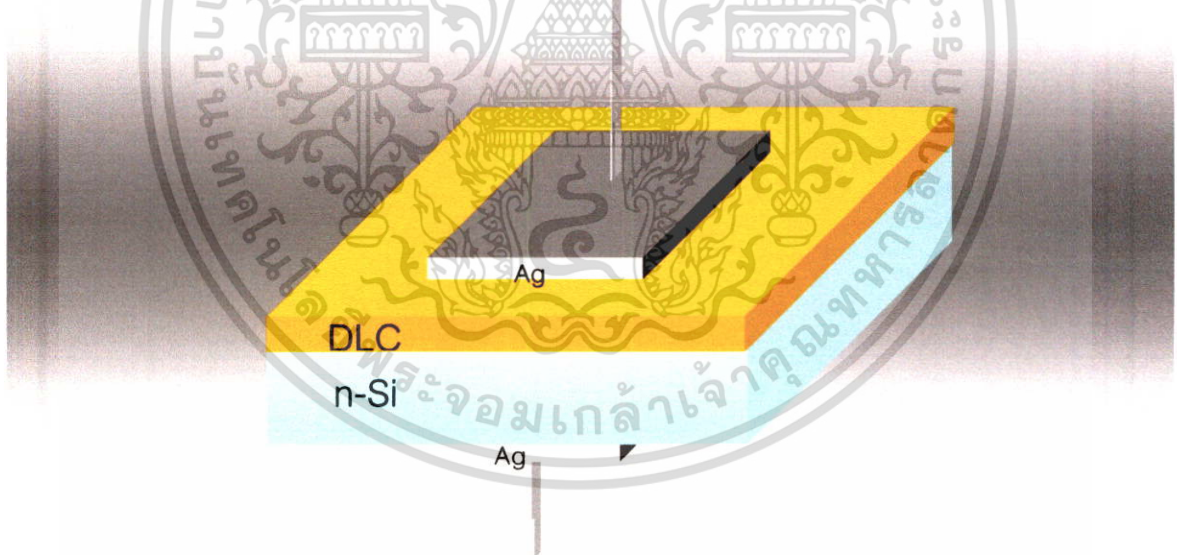
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะใช้โลหะกาวเงินเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกกับฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) เพื่อเป็นขั้วโลหะที่จะใช้ในการนำอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าในแนวเนื้อสาร (Bulk) วิธีการสร้างรอยสัมผัสนี้สามารถทำได้โดยง่าย ๆ ด้วยการทาโลหะกาวเงินลงบนฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) แล้วปล่อยให้แห้ง

3.8 กระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง DLC/n-Si และ DLC/p-Si

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง DLC/n-Si และ DLC/p-Si เมื่อมีความหนาของชั้นฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ต่าง ๆ กันคือ 100 Å , 200 Å , 300 Å , 400 Å และ 500 Å โดยจะใช้โลหะกาวเงินเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกกับ ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) เพื่อเป็นขั้วโลหะ และ จะใช้โลหะกาวเงินเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกกับซิลิกอนเพื่อเป็นขั้ว

โครงสร้างไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/Si สร้างจาก n-Si มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $5.5 \Omega \cdot \text{cm}$ ระบาย (111) โดย สังเคราะห์ DLC หนา 100, 200, 300, 400, 500 Å



รูปที่ 3.8 ไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/n-Si

โลหะดังรูปที่ 3.8 นำไดโอดโครงสร้าง DLC/n-Si และ DLC/p-Si ที่สร้างเสร็จไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าในแนวเนื้อสาร (Bulk)

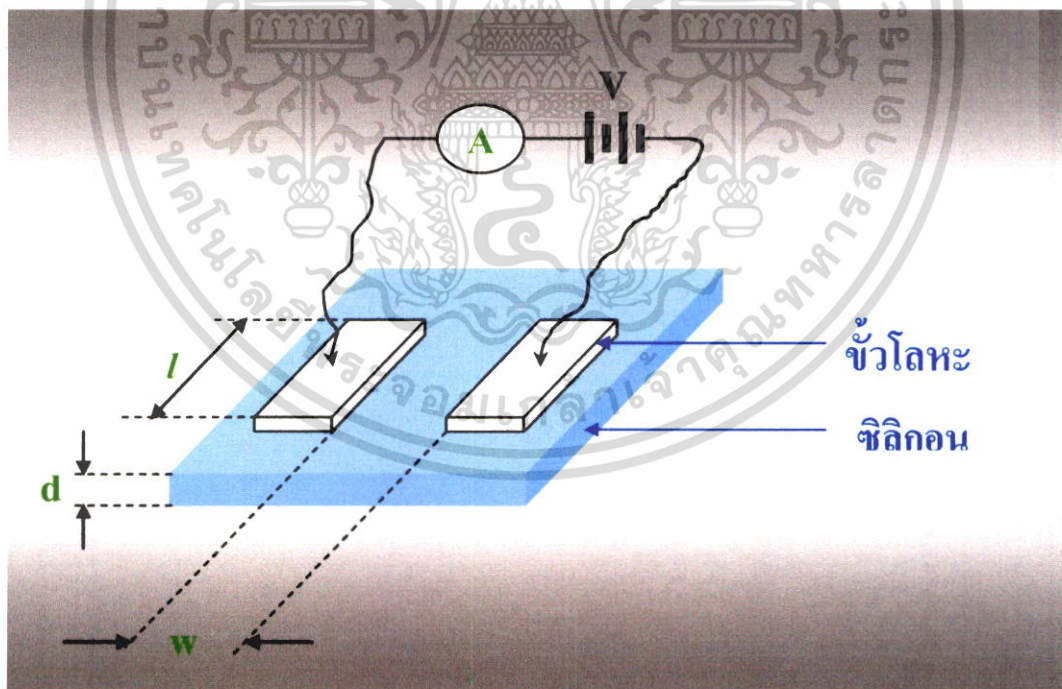
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงเวลาในการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

Thickness (\AA)	Time (Minute)
100	4
200	8
300	12
400	16
500	20

3.9 การทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆ ของ DLC และ ซิลิกอน

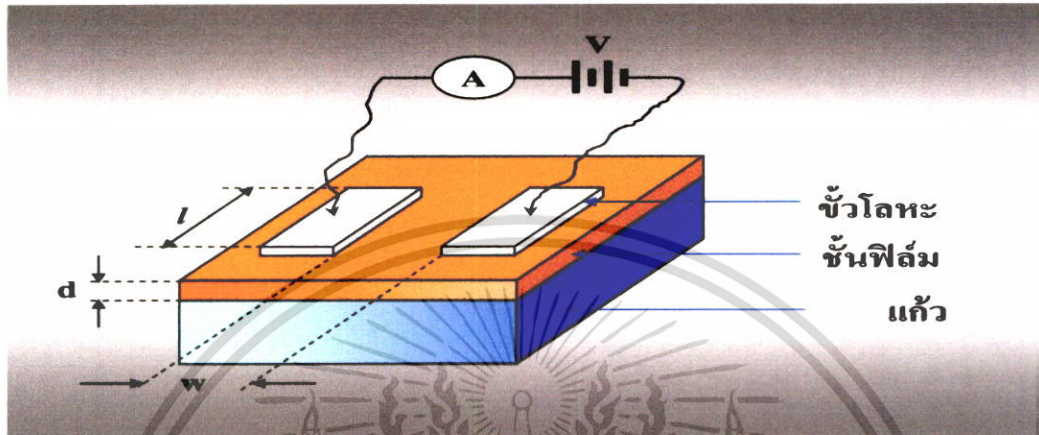
3.9.1 การวัดความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอน



รูปที่ 3.9 การวัดความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

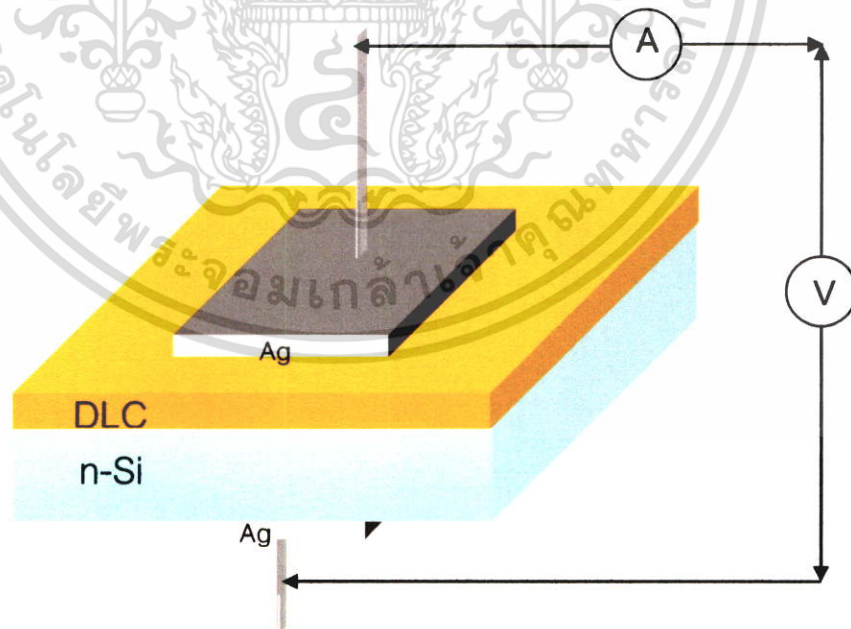
3.9.2 การวัดความต้านทานไฟฟ้าฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่ทำการสังเคราะห์บนแก้ว



รูปที่ 3.10 การวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

3.10 การทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆของ DLC/n-Si และ DLC/p-Si

เป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/n-Si และ DLC/p-Si

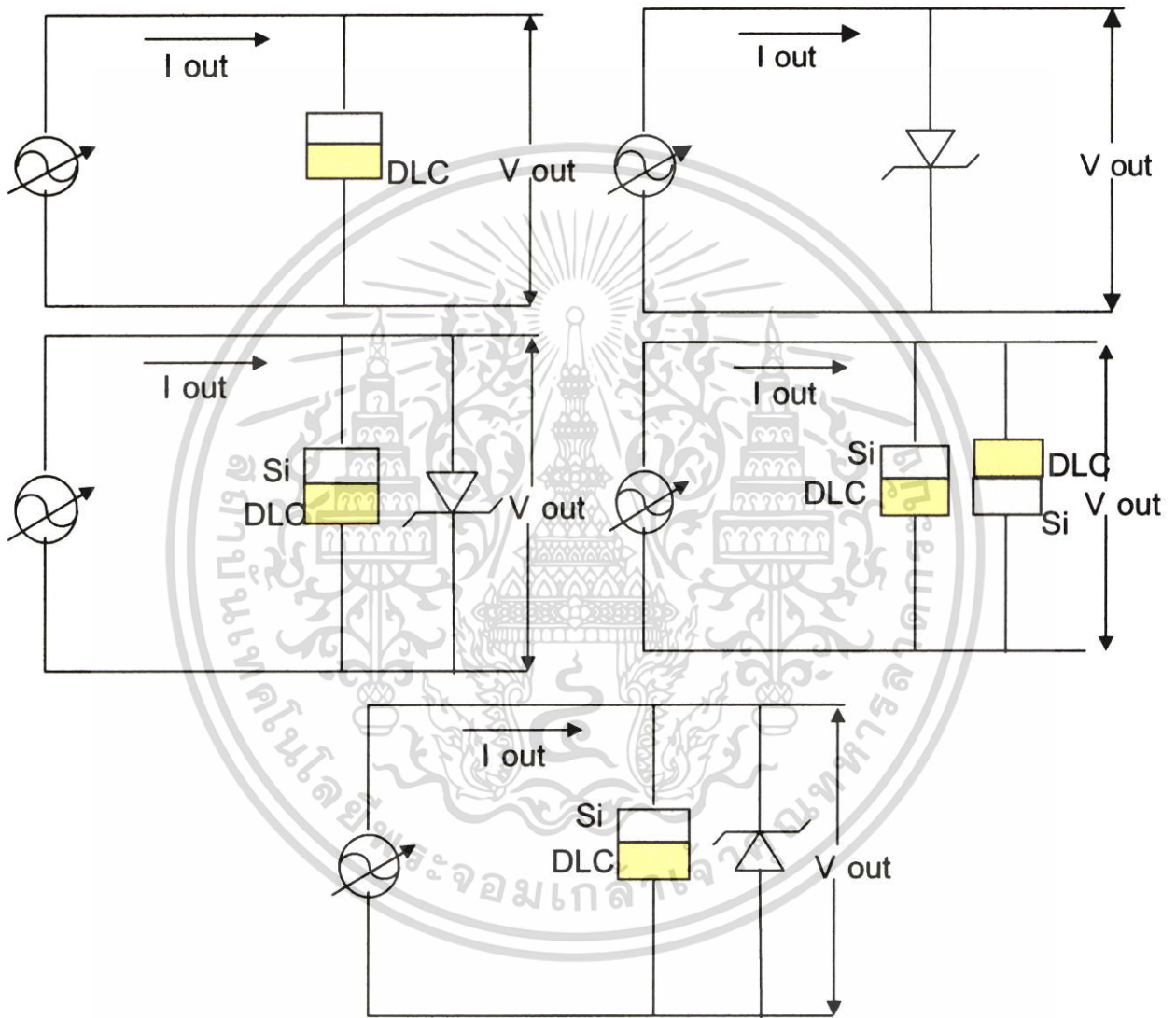


รูปที่ 3.11 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 นำไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/Si มาประยุกต์ใช้งานในวงจร

การทดลองนำไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/Si มาประยุกต์ใช้งานในวงจรโดยนำไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/Si มาต่อขนานกับ Zener diode ที่มีแรงดันพังทลายขนาด 16 V ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/n-Si ประยุกต์ใช้งานในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างตามลำดับขั้นตอน และเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดไว้เพื่อทดลองและตรวจสอบในวิทยานิพนธ์นี้ไว้แล้วในบทที่ 3 ในบทนี้จะเสนอถึงผลการทดลองพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

ผลที่ได้จากการศึกษาการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Ion Beam CVD เพื่อศึกษาอัตราการเกิดฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)เพื่อให้รู้ค่าความหนาที่เหมาะสมและค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการทั้งความหนาและคุณภาพมีเงื่อนไขของตัวแปรต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.1 ดังนี้

4.1.1 อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_2$ 4:1

4.1.2 อุณหภูมิของฐานรอง 40-50 ซี

4.1.3 ระยะระหว่างปืนกับฐานรอง 15ซม.

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ด้วยวิธี IBCVD

Beam Voltage	120	Volts
Beam Current	100	MilliAmps
Accelerator Voltage	320	Volts
RF Forward Power	200	Watts
CH_4	40	SCCM
C_2H_2	10	SCCM
PBN Gas Ar	8	SCCM
PBN Emission	0.5	Amps

4.2 ผลการทดลองหาเงื่อนไขเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ด้วยวิธี Ion Beam CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) โดยทำการสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ที่ความหนาต่างๆ กัน ได้แก่ 25 Å , 50 Å , 75 Å , 100 Å , 125 Å , 200 Å , 300 Å , 400 Å และ 500 Å

ตารางที่ 4.2 เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)

Thickness	Time
(Å)	(Minute)
1	25
2	50
3	75
4	100
8	200
12	300
16	400
20	500

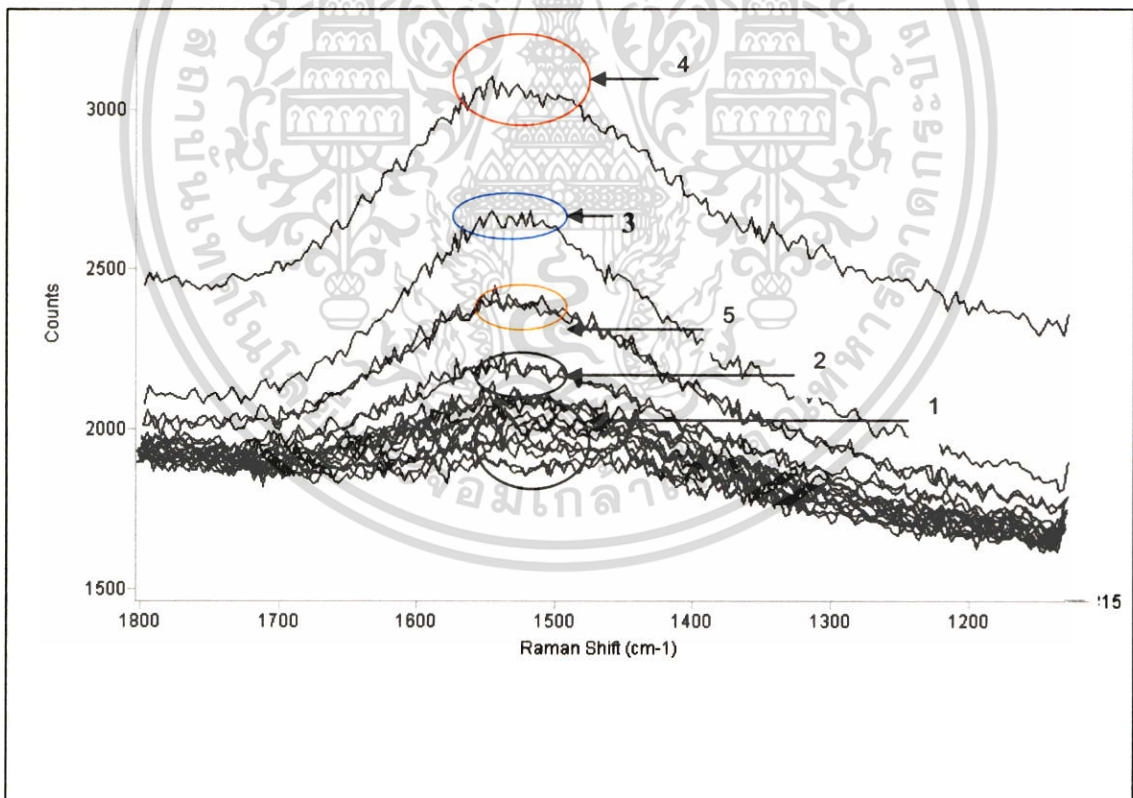
4.3 ผลการทดลองตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงผลการทดลองตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)โดยผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ที่สังเคราะห์ได้ จากการวัดโดยใช้เครื่องมือต่อไปนี้ การศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) โดยใช้เทคนิค Raman, การศึกษาความเค้นของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) โดยใช้ Tencor โดยทำการวัดตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) จากตัวอย่างชิ้นงาน 5 ชิ้นที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Ion Beam CVD มีความหนาต่าง ๆ กัน ได้แก่ 25 Å , 50 Å , 75 Å 100 Å , 125 Å และ การวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)โดยใช้ AFM โดยทำการวัดความหนาของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) จากตัวอย่างชิ้นงาน 9 ชิ้นที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Ion Beam CVD ที่เวลา 1นาที่ , 2นาที่ , 3นาที่ , 4นาที่ , 5นาที่ , 8นาที่ , 12นาที่ , 16นาที่ และ 20นาที่ ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างชิ้นงาน 5 ชั้นดั่งนี้ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Ion Beam CVD มีความหนาต่าง ๆ กัน

Sample ID.	Deposition Time	Thickness
	(Minute)	(Å)
1	1	25
2	2	50
3	3	75
4	4	100
5	5	125

4.3.1 ผลวัดคุณสมบัติฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)โดยใช้ เทคนิค Raman



รูปที่ 4.1 ค่า Raman spectrum ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ D ในชั้นงานฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่วัดได้จากเทคนิค Raman

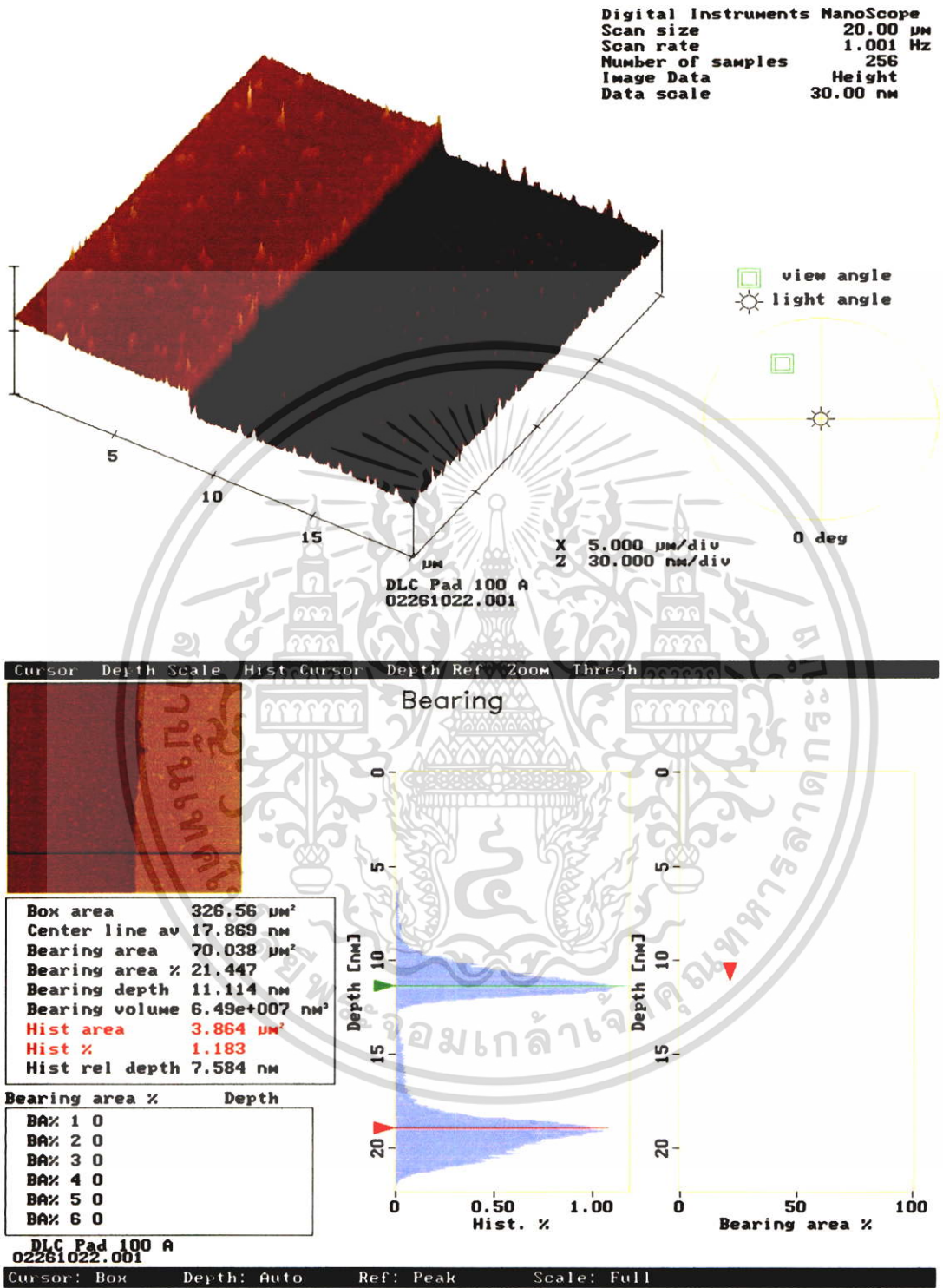
Sample ID.	Raman			
	D Position (cm-1)	D Intensity (a.u)	D Width (cm-1)	D Area (a.u/cm)
1	1431	89	206	19505
2	1439	140	248	37027
3	1394	172	299	54748
4	1387	255	302	82191
5	1447	84	105	8450

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ G ในชั้นงานฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่วัดได้ จากเทคนิค Raman

Sample ID.	Raman			
	G Intensity (a.u)	G Width (cm-1)	G Area (a.u/cm)	Id/Ig
1	51	168	9196	1.734
2	165	184	32285	0.849
3	400	196	83217	0.430
4	574	193	117816	0.445
5	246	140	15722	0.749

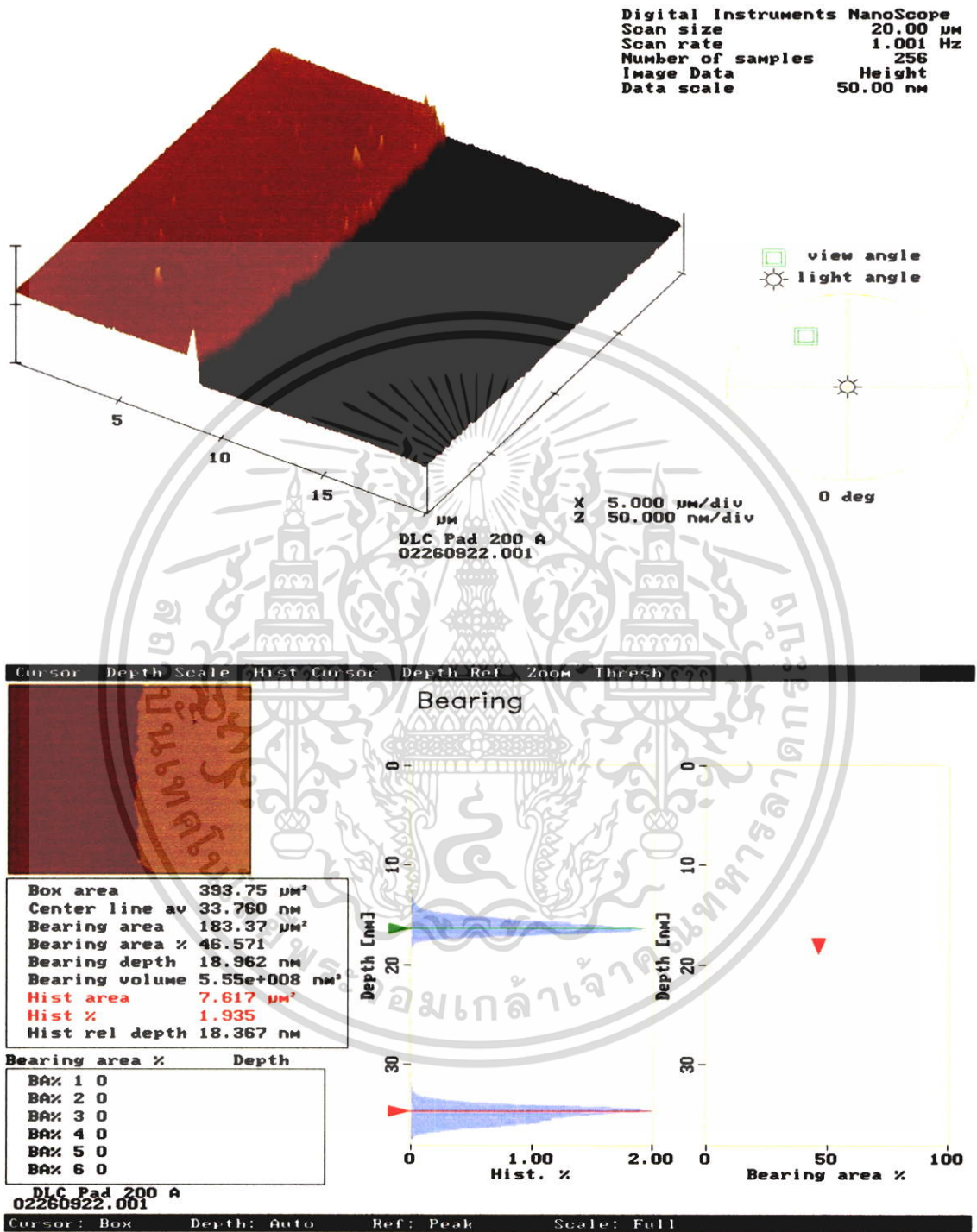
4.3.2 ผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) โดยใช้ AFM

ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 นาที , 8 นาที , 12 นาที , 16 นาที และ 20 นาที วัดความหนาด้วยโดยวิธี AFM ดังนี้



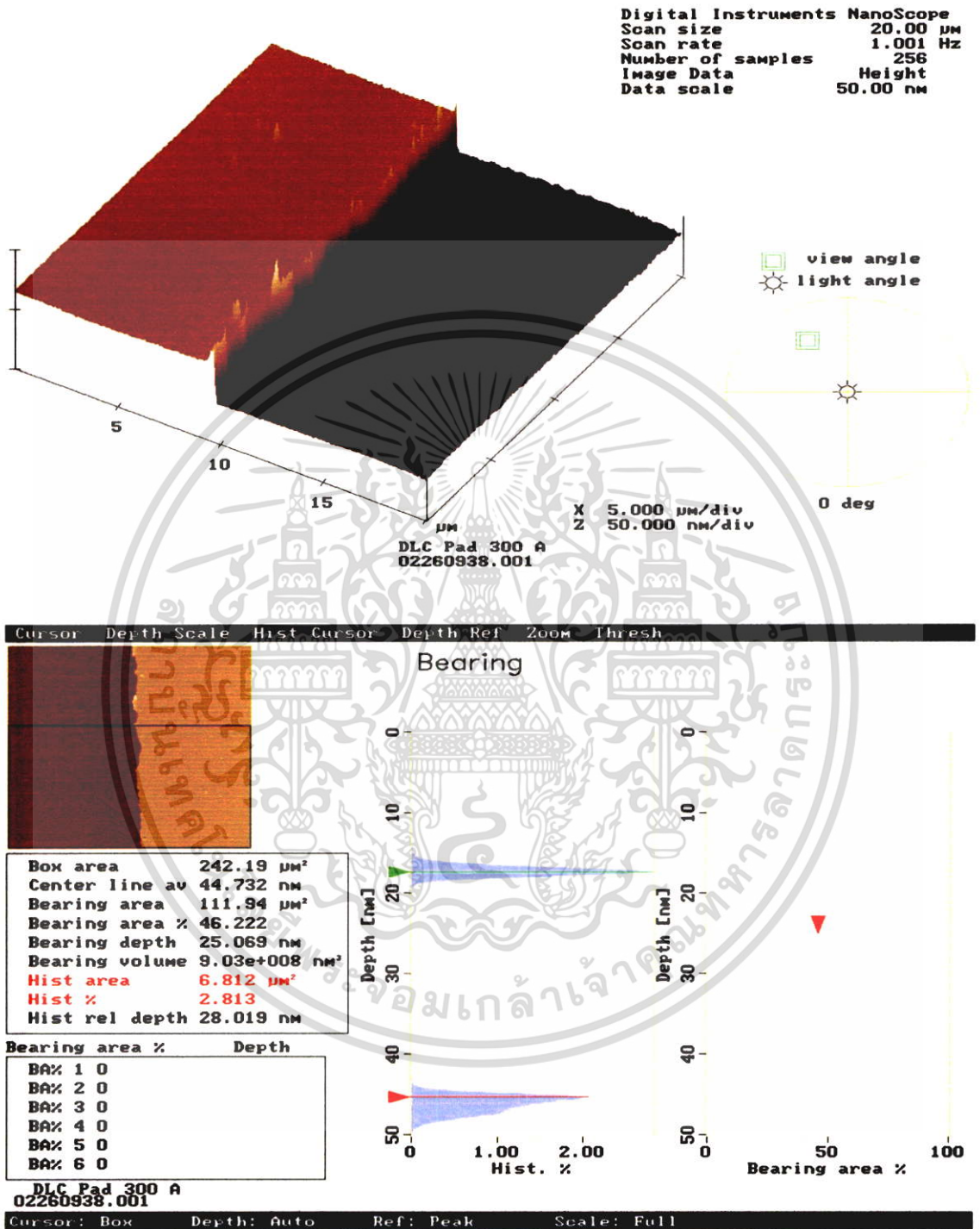
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 นาที วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



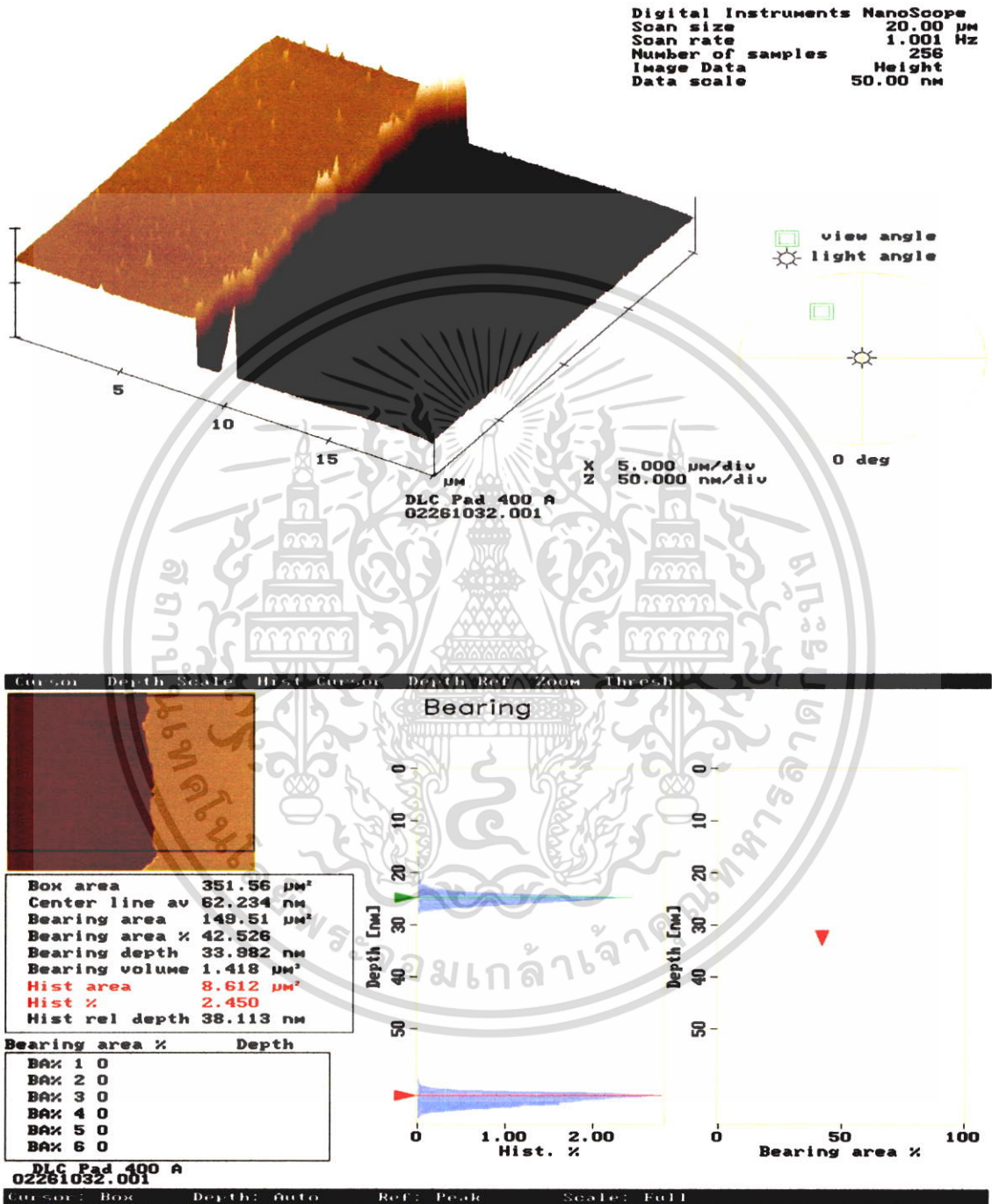
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 8 นาที วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



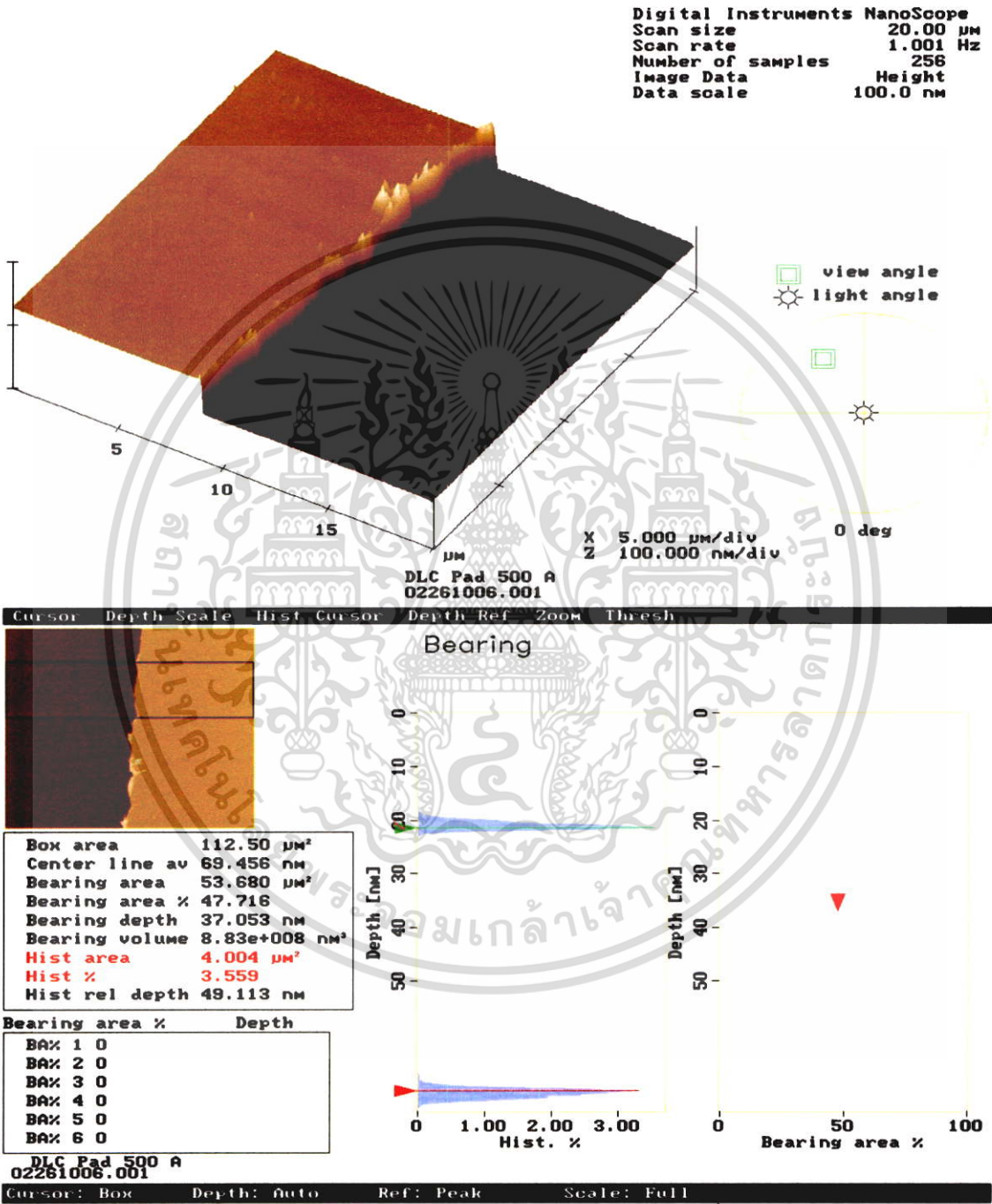
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 12 นาที วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 16 นาที วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที วัดความหนาด้วยวิธีโดย AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดความหนาฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)ด้วยวิธีโดย AFM

Sample ID.	Deposition Time	Thickness
	(Minute)	(Å)
1	1	25
2	2	50
3	3	75
4	4	100
5	5	125
6	8	200
7	12	300
8	16	400
9	20	500

4.3.3 ผลการวัดความเค้นของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)โดยใช้ Tencor

ตารางที่ 4.7 ค่าความเค้นในชั้นงานฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่วัดได้ จาก Tencor

Sample ID.	Thickness	Tencor
	(Å)	Stress(Mpa)
1	25	3032.4
2	50	3737.3
3	75	4041.4
4	100	4971.0
5	125	5983.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองวัดค่าความเค้นโดยอ้อมโดยไม่ทำลายชิ้นงาน

จากผลการทดลอง 4.3.1 และ 4.3.3 มาหาค่าความสัมพันธ์กับค่าความเค้นของฟิล์มและค่า Raman band ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่ความหนาต่างๆ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความเค้นของฟิล์มและค่า Raman band

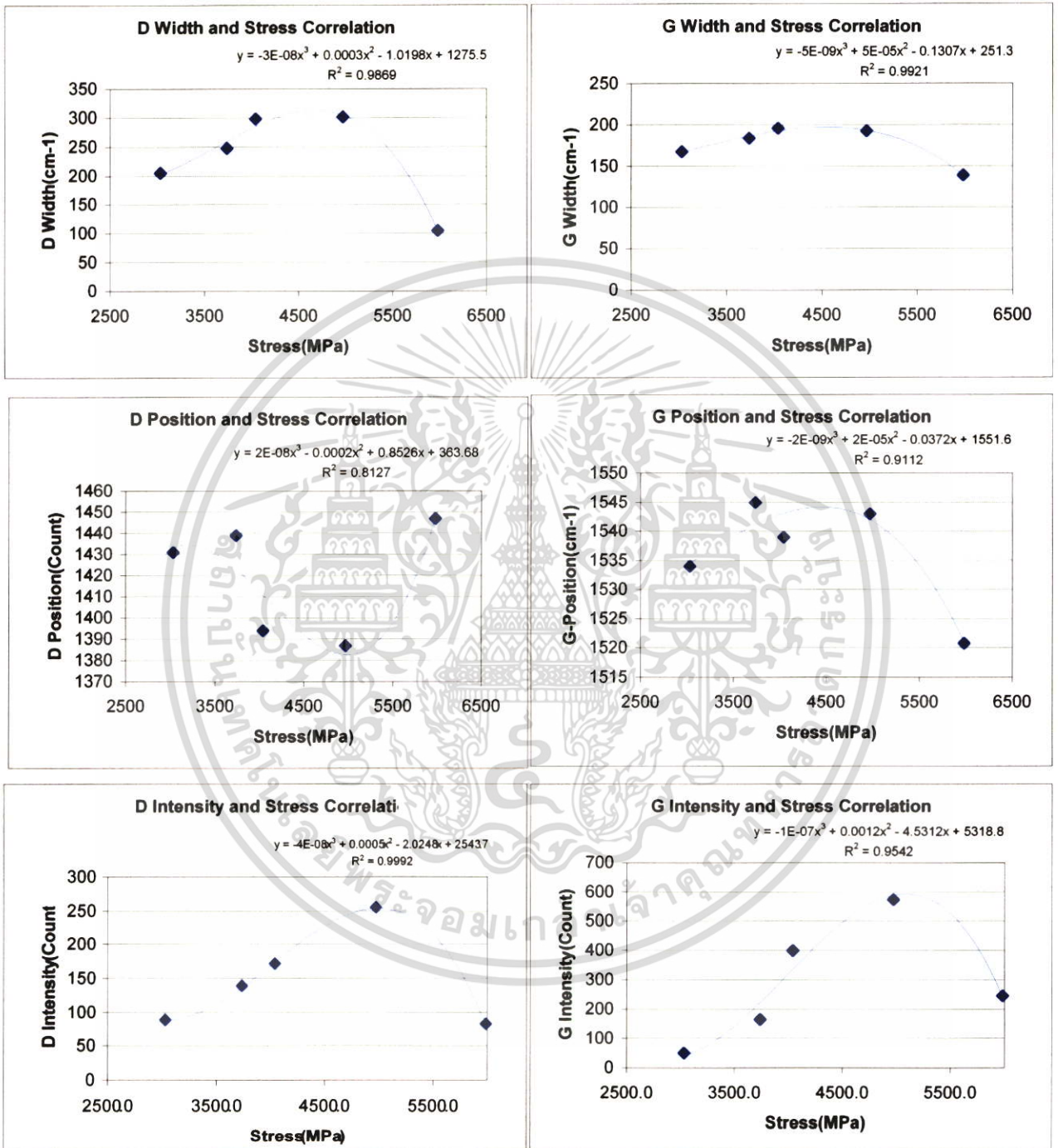
ตารางที่ 4.8 ค่าความเค้น และ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่วัดได้จากเครื่อง Tencor และ Raman จากผลกาทดลอง 4.3.1 และ 4.3.3

Sample ID	Tencor	Raman			
	Stress(Mpa)	D Position(cm^{-1})	D Intensity (a.u)	D Width(cm^{-1})	D Area(a.u/cm)
1	3032.4	1431	89	206	19505
2	3737.3	1439	140	248	37027
3	4041.4	1394	172	299	54748
4	4971.0	1387	255	302	82191
5	5983.2	1447	84	105	8450

Sample ID	Tencor	Raman				
	Stress(Mpa)	G Position(cm^{-1})	G Intensity (a.u)	G Width(cm^{-1})	G Area (a.u/cm)	Id/Ig
1	3032.4	51	168	168	9196	1.734
2	3737.3	165	184	184	32285	0.849
3	4041.4	400	196	196	83217	0.430
4	4971.0	574	193	193	117816	0.445
5	5983.2	246	140	140	15722	0.749

จากข้อมูลข้างต้นเมื่อนำมาพลอตกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ที่ตีมีค่า R-square เิงสถิติเข้าใกล้ 1 โดยเฉพาะเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ D Intensity และความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงสมการความสัมพันธ์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆของชั้นงาน DLC ที่วัดได้จากเทคนิค Raman เพื่อหาค่าความเค้นโดยอ้อม

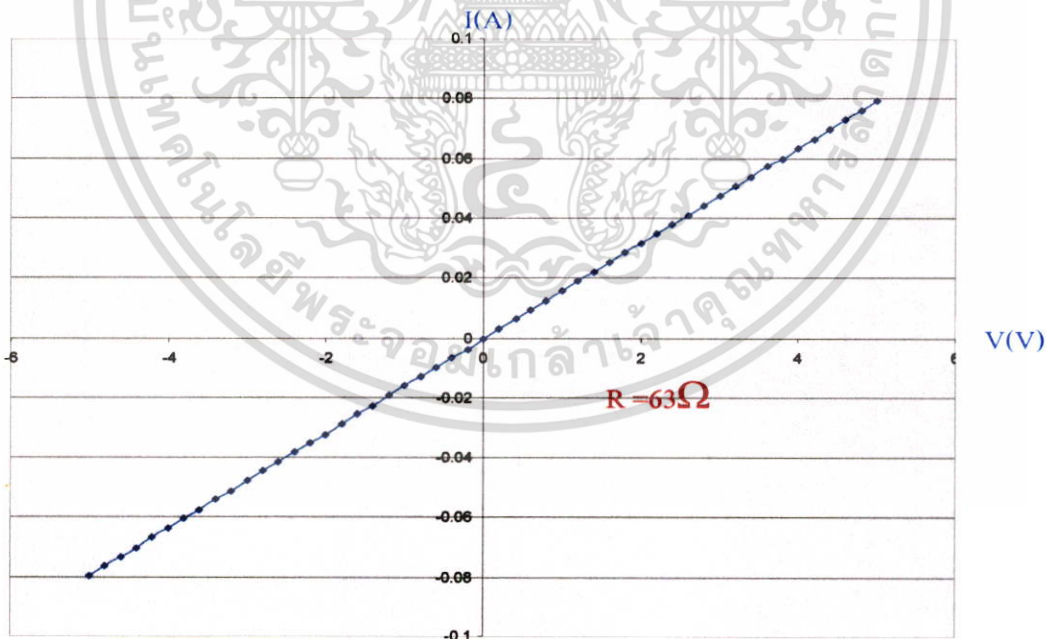
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า R-square มีค่าเกือบเท่ากับ 1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ดิสคอร์เดอร์ของ sp^3 หรือ D Band นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความเค้นของ DLC มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายว่า D Band หรือ ดิสคอร์เดอร์ของแกรไฟต์เมื่อมีปริมาณมากแสดงว่ามีโครงสร้างที่พยายามจัดตัวให้ความยาวพันธะเข้าใกล้กันมากขึ้น เพื่อนำไปสู่โครงสร้าง sp^3 หรือ Cubic Diamond มากขึ้น ทำให้ค่าความเค้นมากขึ้น ตามความสัมพันธ์ $y = -4E-08 x^3 + 0.0005 x^2 - 2.0248x + 2543.7$ ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้จึงนำมาใช้ในการคำนวณกลับหาค่าความเค้นได้เมื่อรู้ค่า Raman

จากความรู้ที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเมื่อพบว่าค่า Intensity มีค่ามากจะมีความสัมพันธ์ต่อปริมาณของสาร ณ ตำแหน่งพิกัดนั้นมากด้วย จากตาราง 2 เราจึงอาจสรุปได้ว่า ความหนาของ DLC มีค่ามากขึ้นตามเวลาการเคลือบที่สูงขึ้น สังเกตได้จากค่า G Intensity สูงขึ้นแต่สำหรับ ตัวอย่างที่ 5 ค่า G และค่า D Intensity มีค่าลดลงอาจเป็นไปได้ว่าเกิดพฤติกรรมรวมการหลอมตัวกันเป็น bulk เกิดขึ้นซึ่งจะต้องทำการศึกษาด้วยเทคนิคอื่นๆ ต่อไป

4.5 ผลการทดลองวัดคุณสมบัติต่างๆของ DLC และ ซิลิกอน

4.5.1 การวัดความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอน

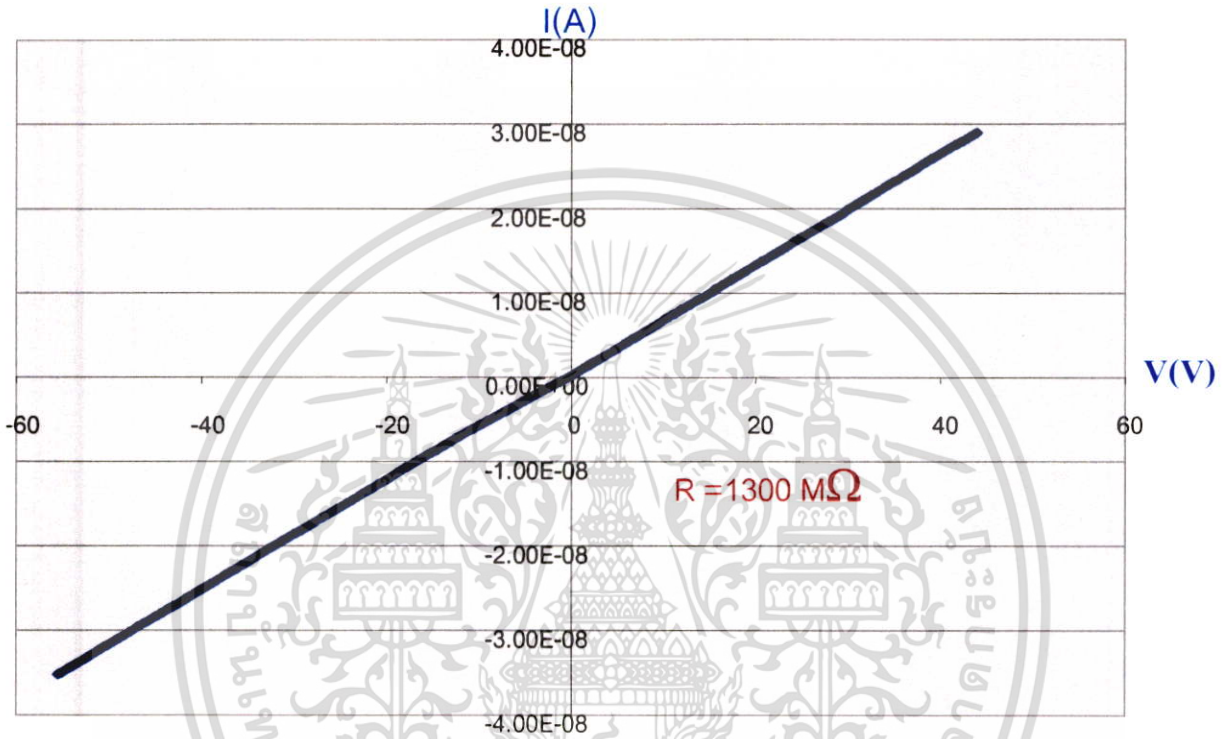


รูปที่ 4.8 วัดความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้า DLC

จากผลการทดลองวัดความต้านทานของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่ทำการสังเคราะห์บนแก้วที่มีความหนา 100 Å , 200 Å , 300 Å , 400 Å และ 500 Å เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นความต้านทานจะลดลงตามตารางที่ 4.9



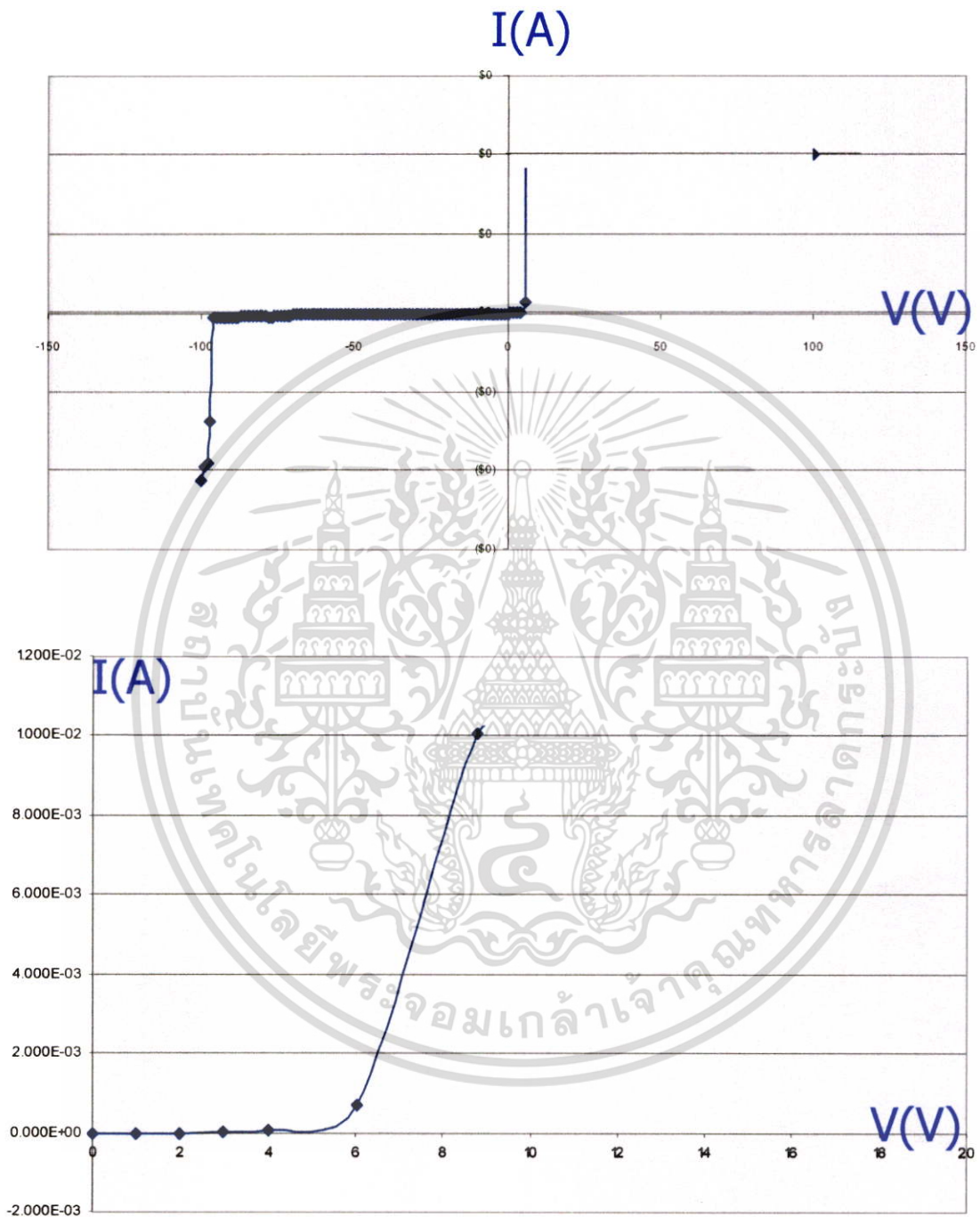
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างผลการวัดความต้านทานไฟฟ้า DLC หนา 100 Å

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวัดความต้านทานไฟฟ้า DLC ที่มีความหนาค่าหน้าต่างกัน

Thickness (Å)	R (MΩ)
100	1300
200	810
300	617
400	420
500	200

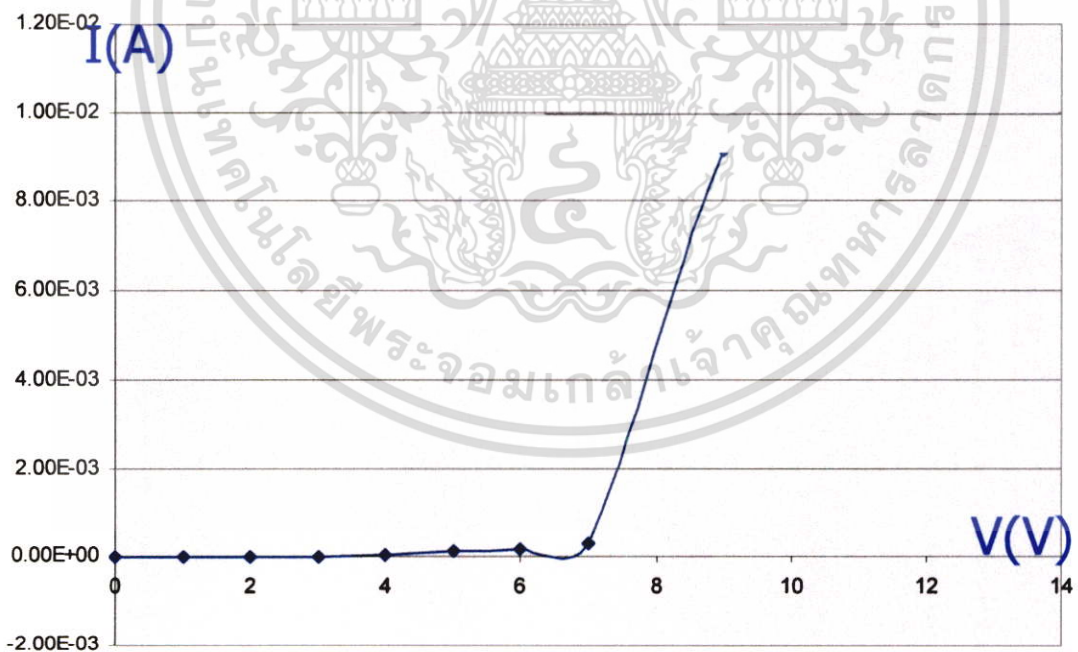
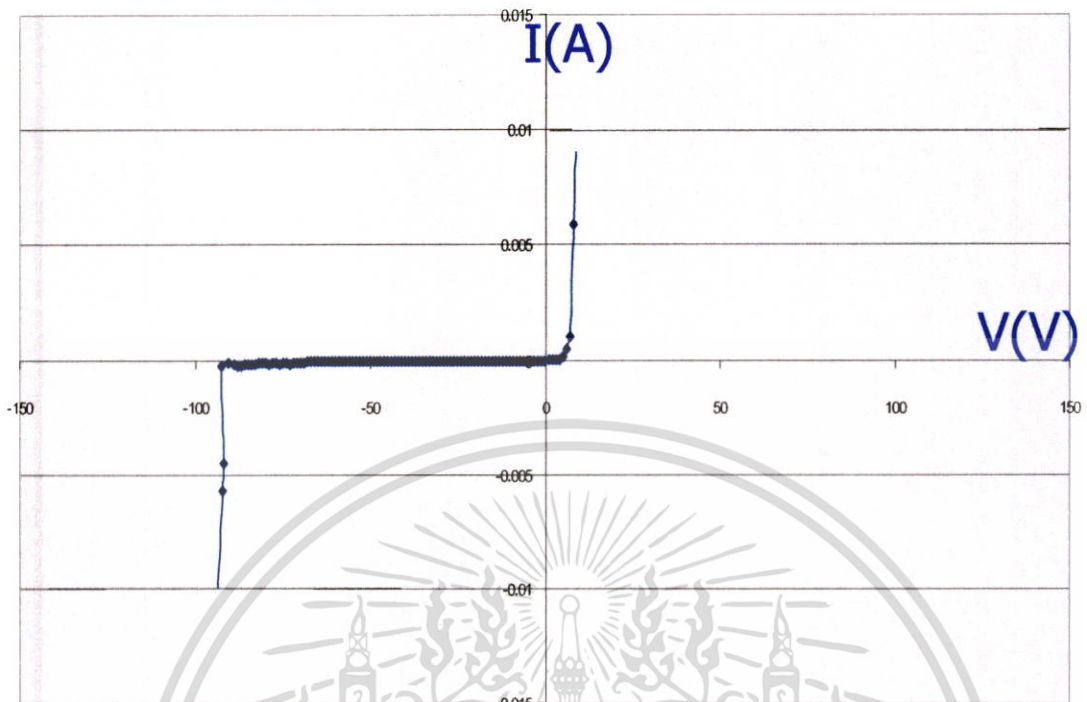
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ DLC/n-Si



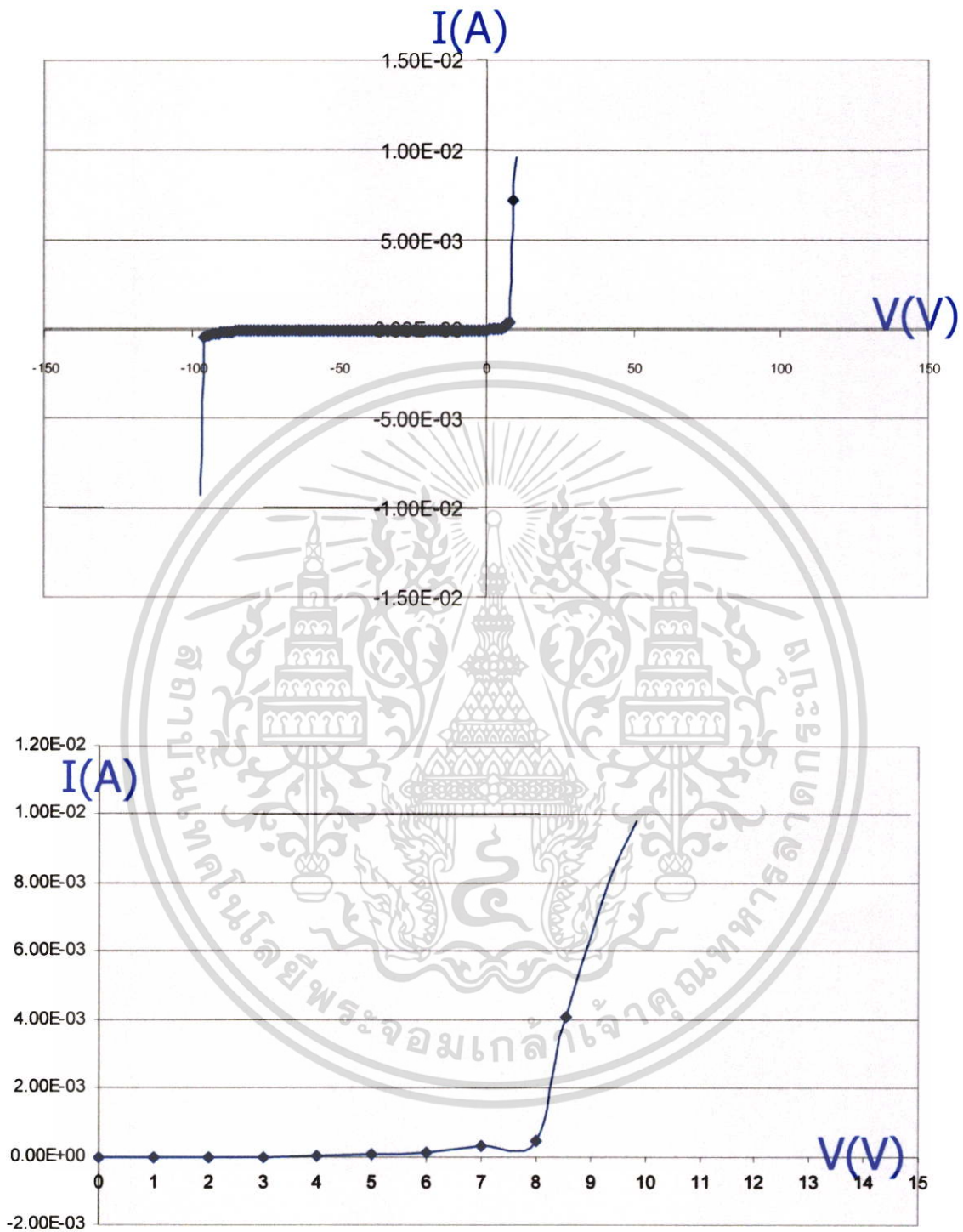
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของ heterojunction DLC/ n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 100 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



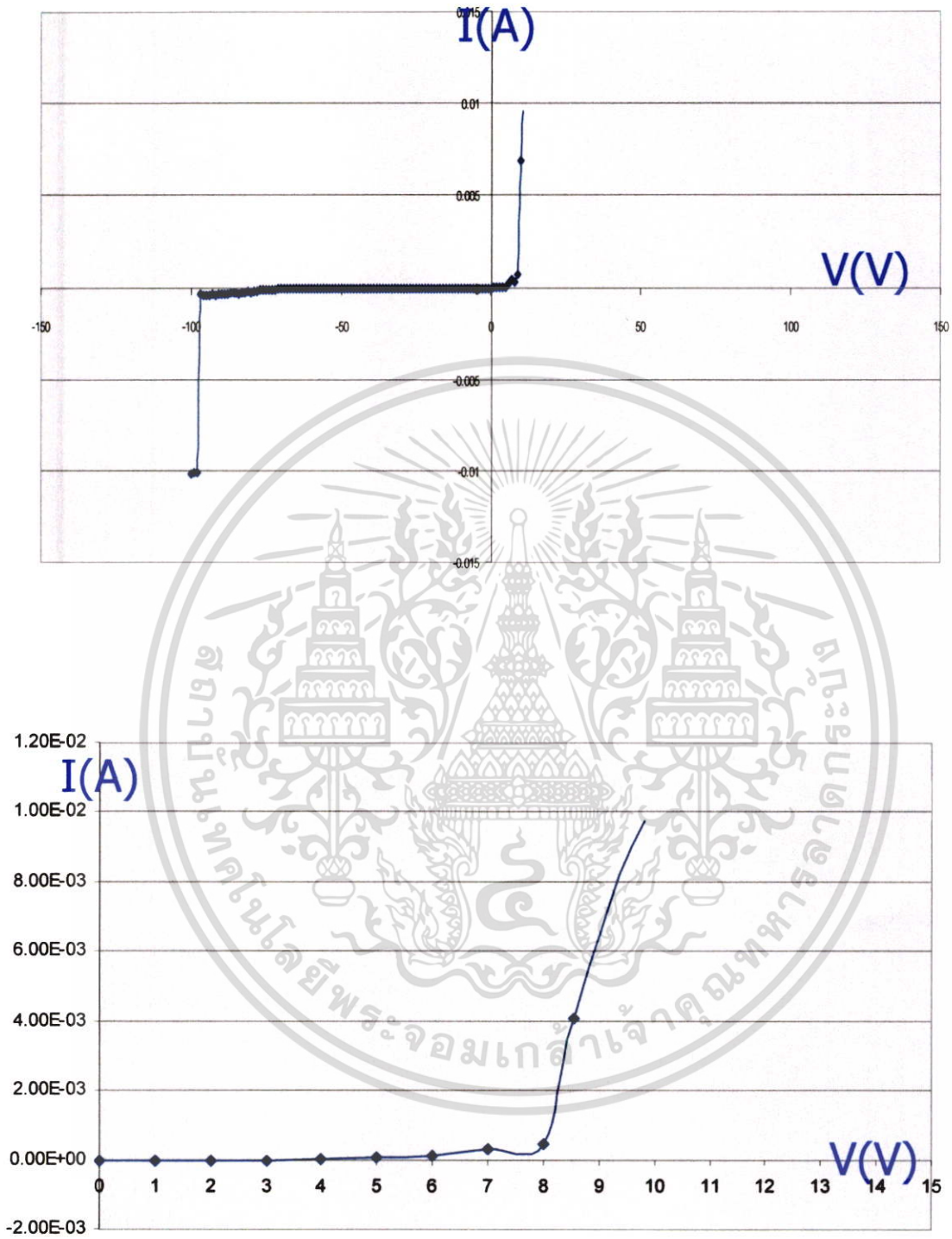
รูปที่ 4.11 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของ heterojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 200 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



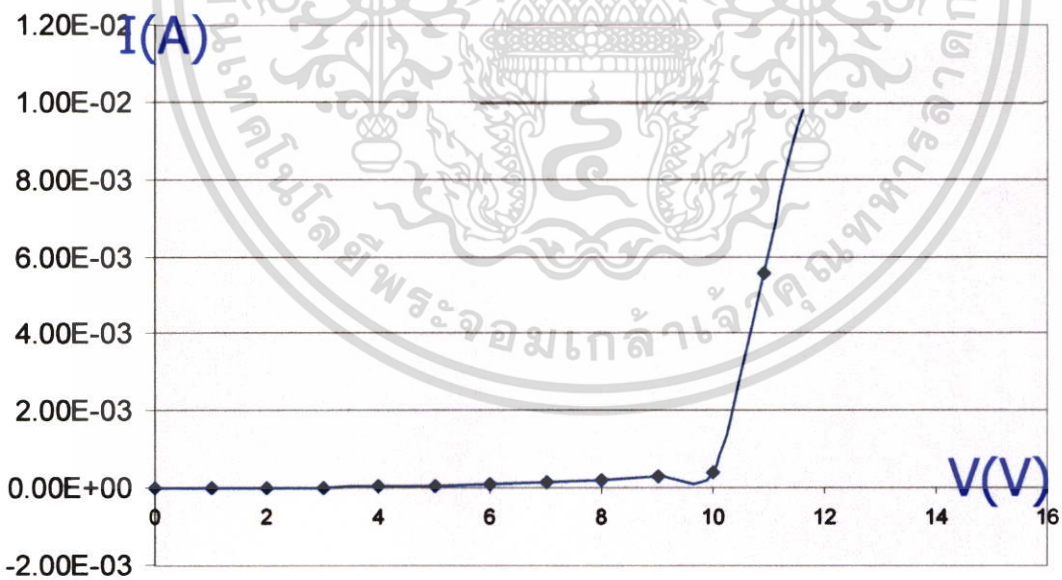
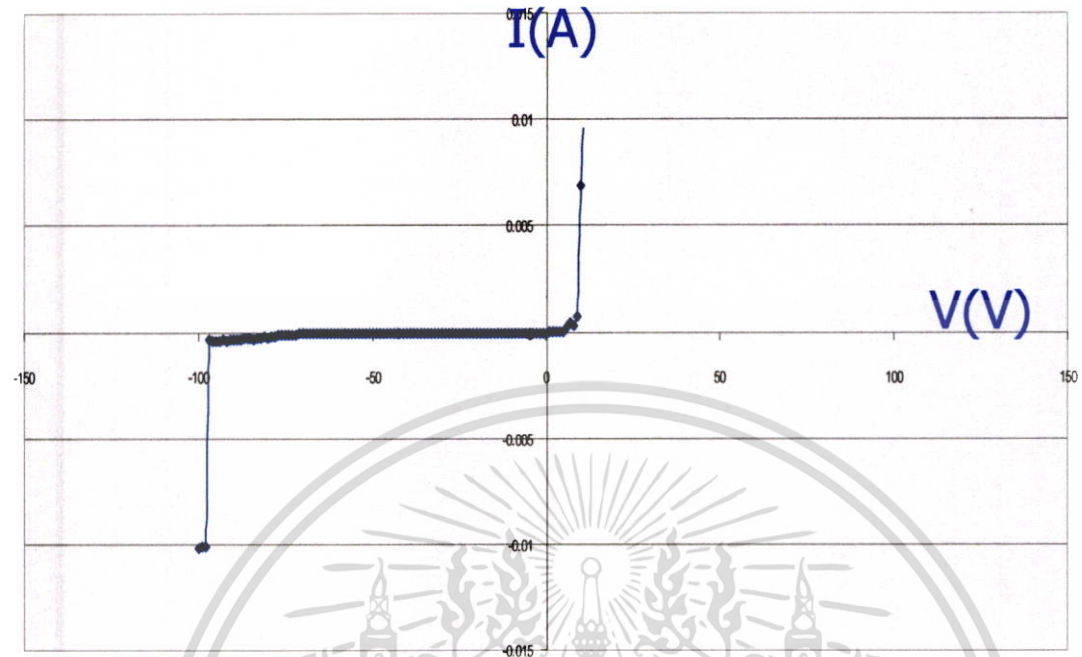
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของ heterojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 300 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



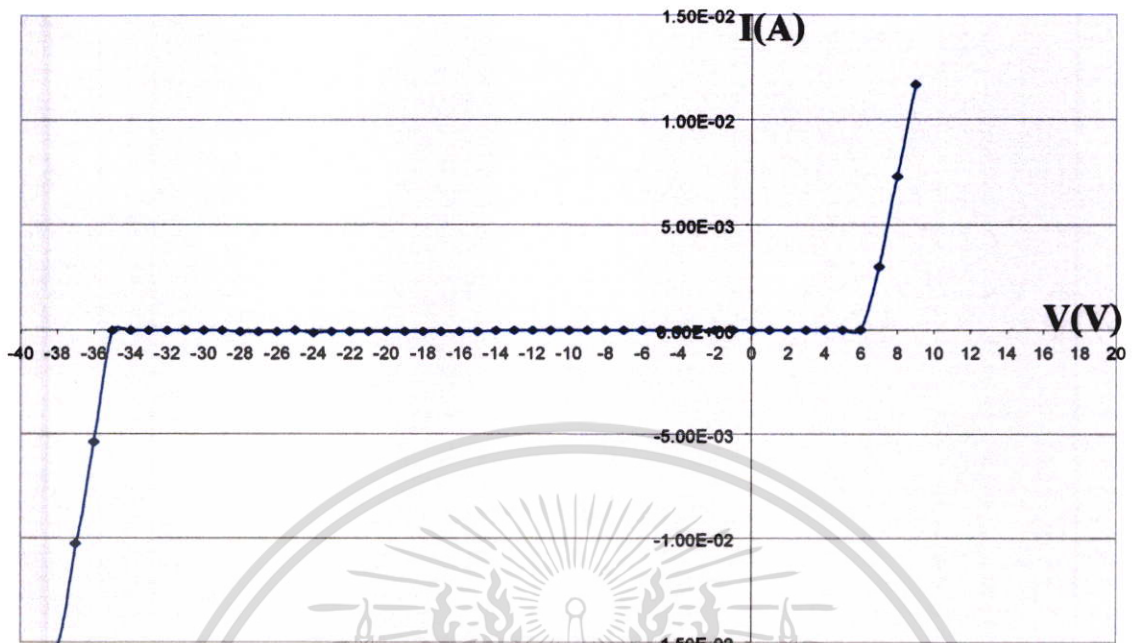
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ heterojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 400 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

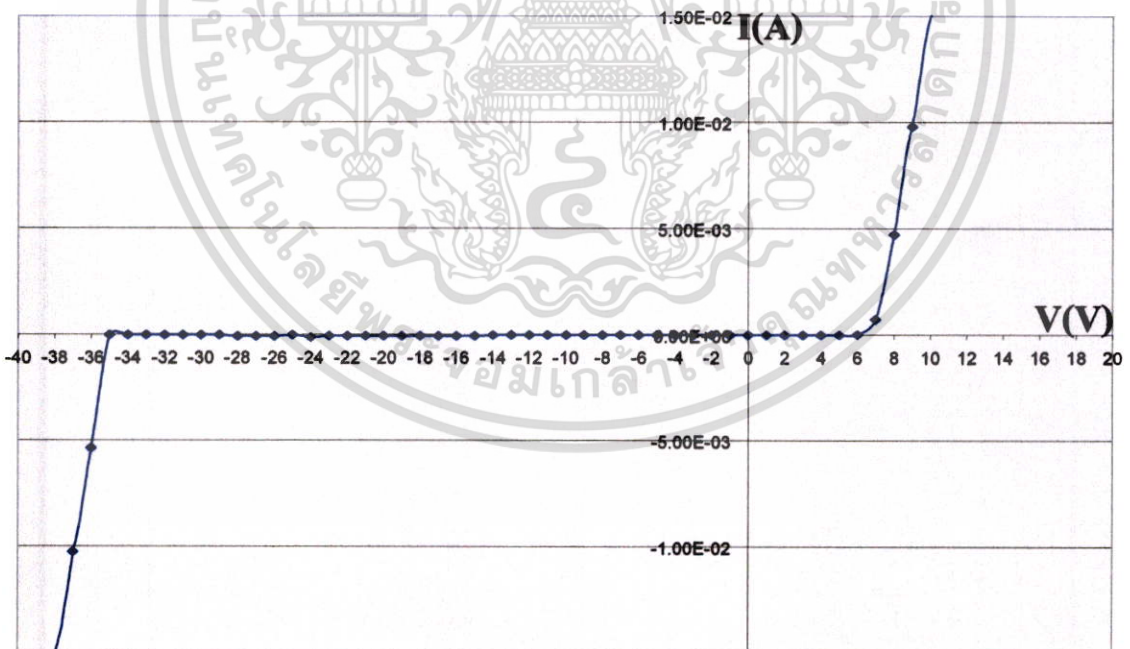


รูปที่ 4.14 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ heterojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 500 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

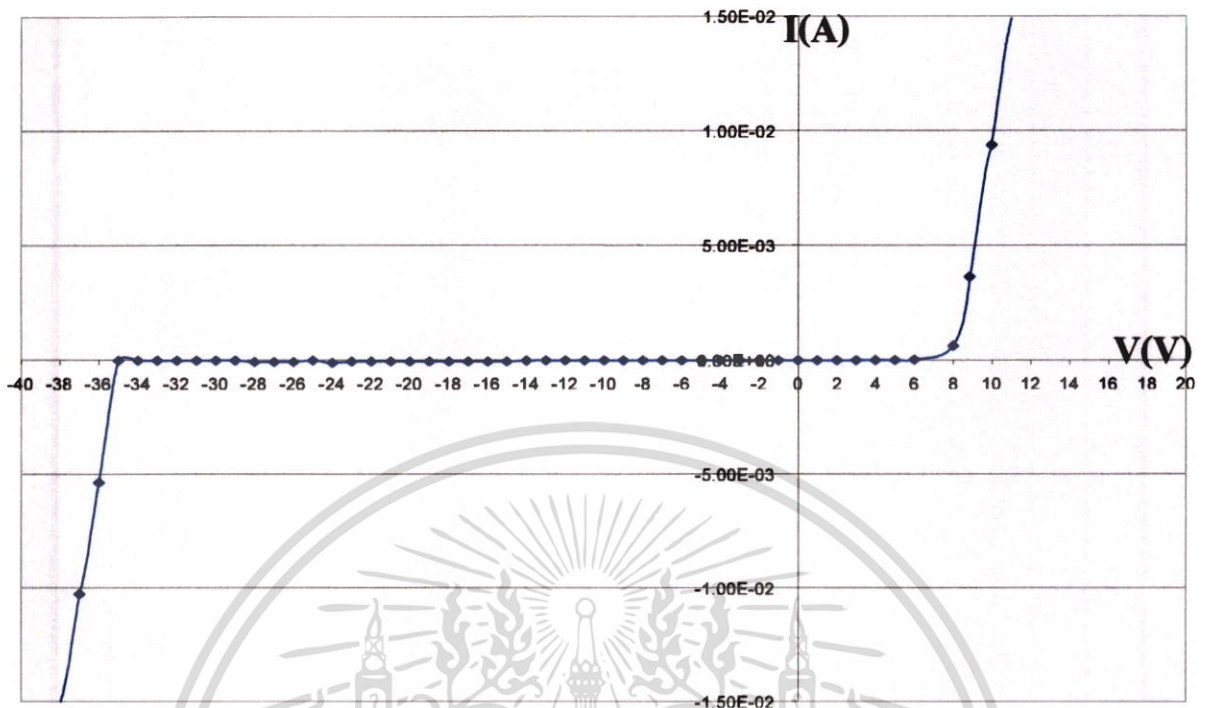


รูปที่ 4.15 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ heterojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หน้า 100 Å

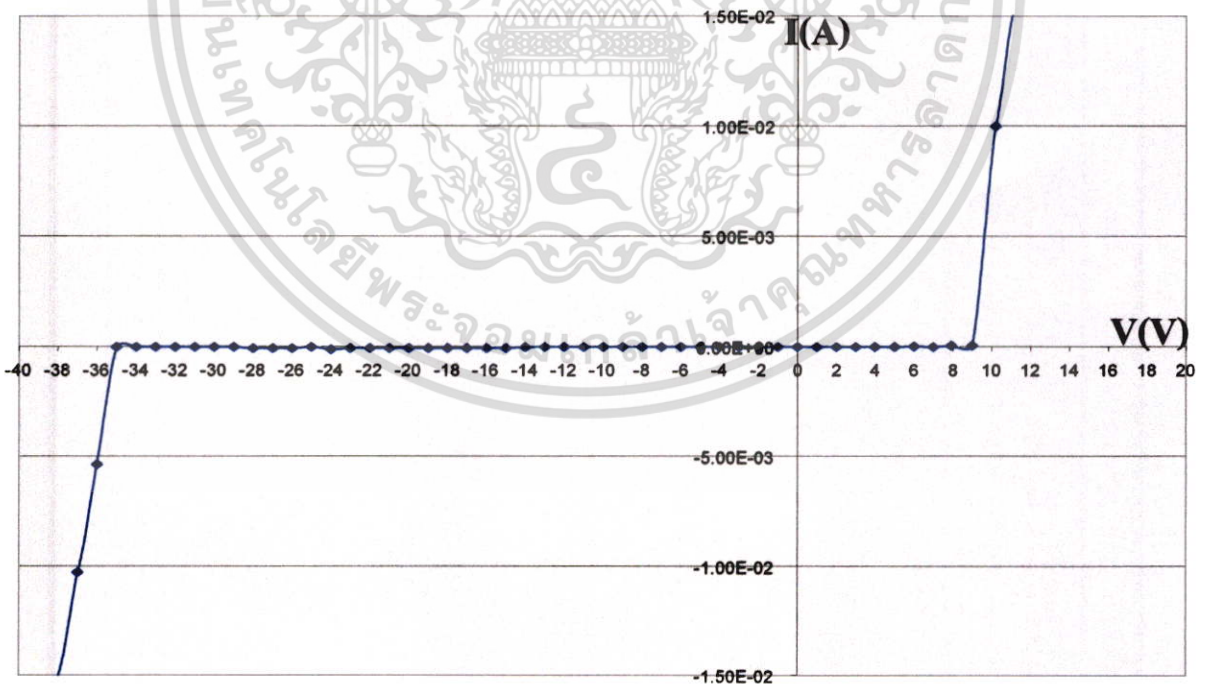


รูปที่ 4.16 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ heterojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หน้า 200 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

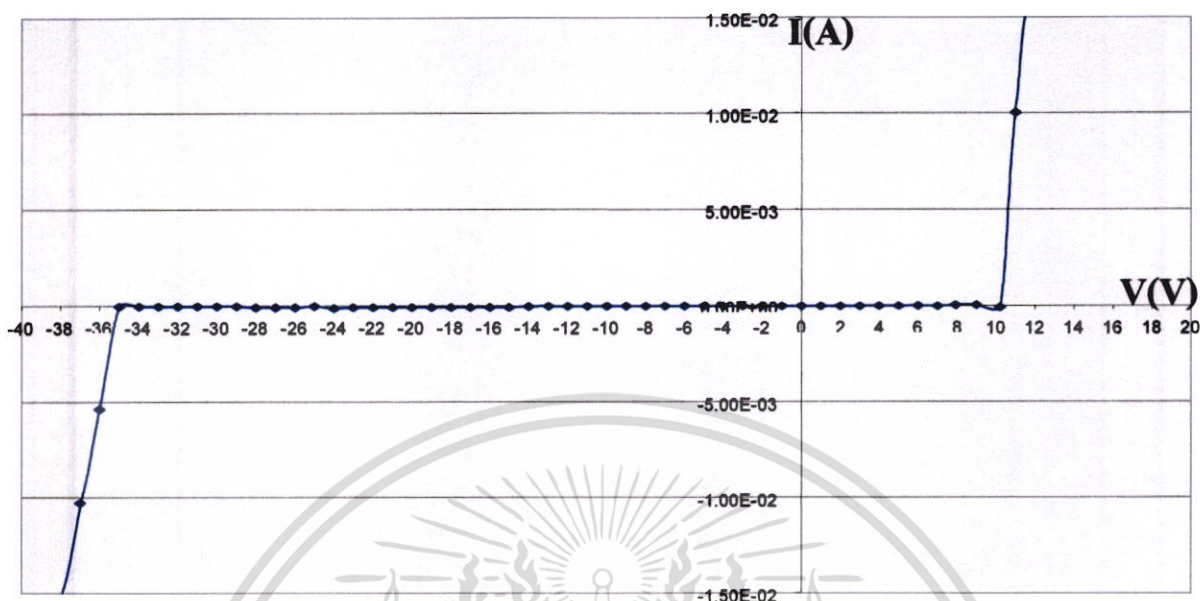


รูปที่ 4.17 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ heterojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 300 Å



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ heterojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 400 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



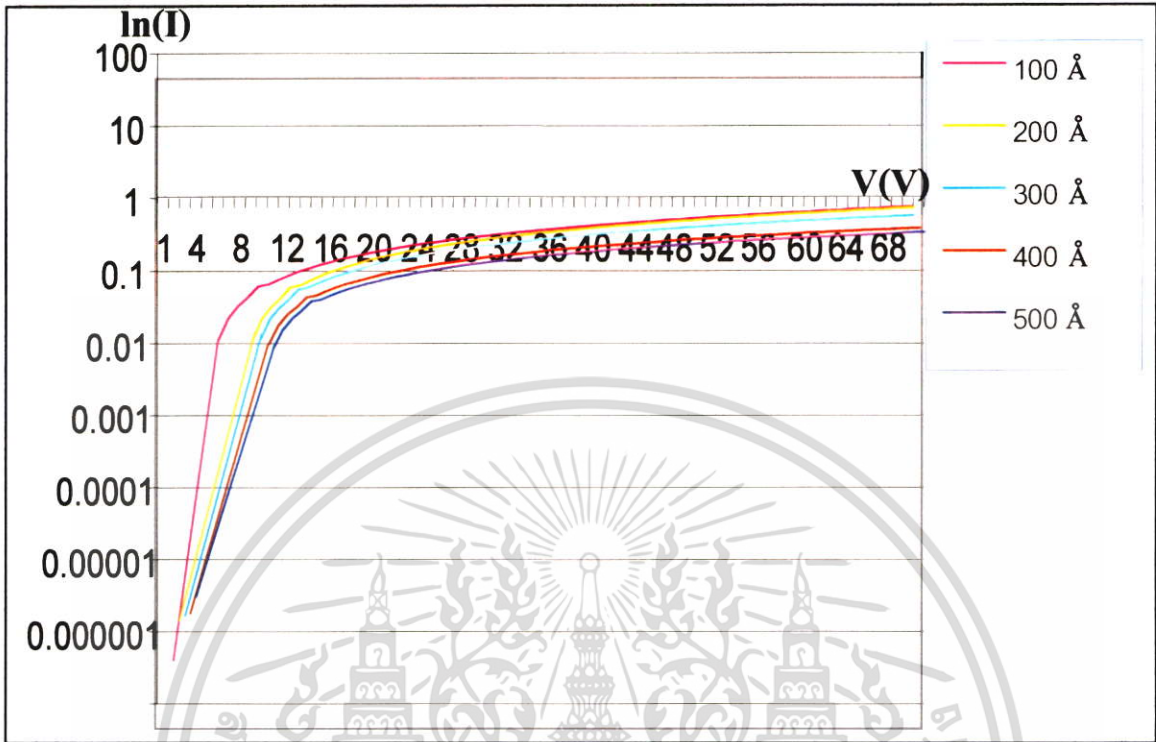
รูปที่ 4.19 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ heterojunction DLC/p-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 500 Å

เมื่อทำการศึกษาคุณสมบัติของ heterojunction ของ DLC / Si โดยพิจารณาคุณสมบัติการนำไฟฟ้า กระแสตรงทั้งชนิด DLC/p-Si และ DLC/n-Si ผลพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสและแรงดันไฟฟ้า

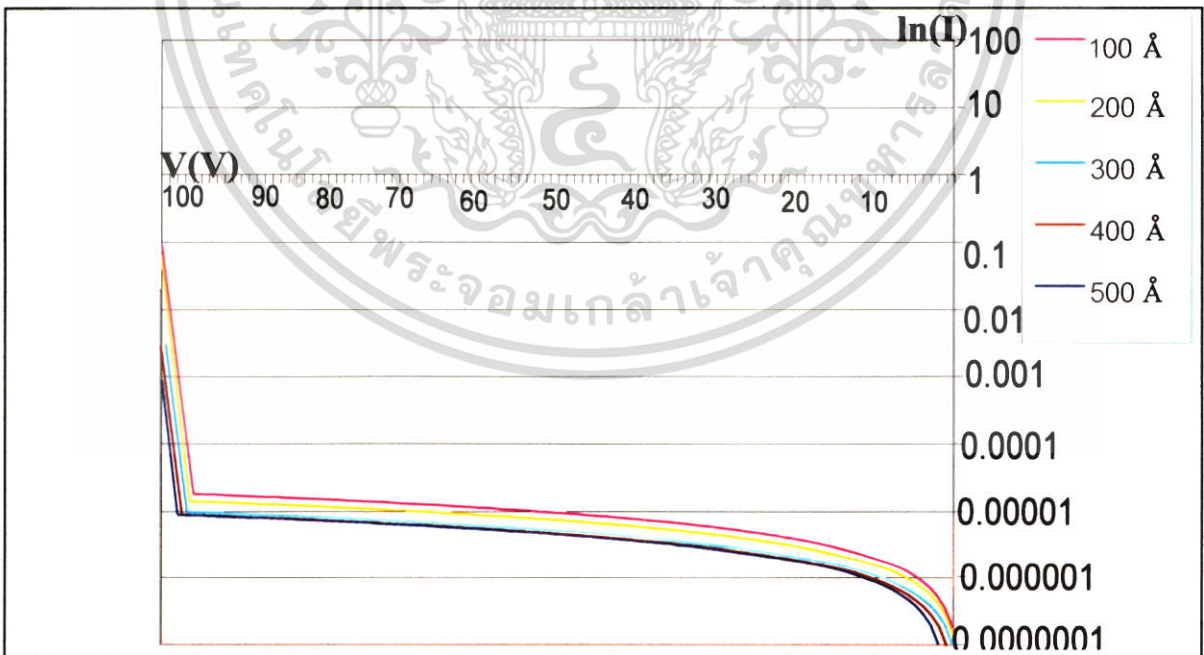


รูปที่ 4.20 ตัวอย่างผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของ heterojunction DLC/n-Si ที่มีชั้นของ DLC หนา 100 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ ของ $\ln(I)$ กับแรงดันไฟฟ้า heterojunction DLC/n-Si ขณะไบอัสตรง



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ ของ $\ln(I)$ กับแรงดันไฟฟ้า heterojunction DLC/n-Si ขณะไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(I-V Characteristics) ของ heterojunction DLC / Si จะมีค่าแรงดันภายใน(Built-in Voltage) 6 โวลต์ เมื่อ heteroJunction DLC / Si มี ชั้นฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) หนา 100 Å และมีค่าแรงดันพังทลาย(Breakdown Voltage) 97โวลต์ ดังรูปที่ 4.20 และ heterojunction DLC/p-Si จะมีค่าแรงดันภายใน(Built-in Voltage) 6 โวลต์ เมื่อ heterojunction DLC /p- Si มีชั้น DLC หนา 100 Å และมีค่าแรงดันพังทลาย(Breakdown Voltage) 35 โวลต์ heterojunction DLC/Si มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นอิสระไม่ขึ้นกับใคร จึงต้องวัดค่าความเค้นของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่แปรผันตรงกับความหนาของฟิล์ม นอกจากนี้จากการทดลองยังพบอีกว่าค่าแรงดันภายในจะเปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) อีกด้วย ดังตารางที่ 4.10 จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้งานเพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ขณะใช้งานแบบไบอัสตรง

heterojunction DLC/Si มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นอิสระไม่ขึ้นกับใคร ลักษณะดังกล่าวสามารถทำความเข้าใจได้เมื่อพิจารณาแถบพลังงานของจุดเชื่อมต่อ DLC/Si ออกมา ซึ่งโครงสร้างแถบพลังงานของจุดเชื่อมต่อของ DLC/Si ได้แสดงไว้แล้วใน รูปที่ 4.24 โดยแบบจำลองแถบพลังงานเป็นผลที่ได้มาจากค่าที่ทราบอยู่แล้ว อันได้แก่ ionization energies และแถบพลังงานของซิลิกอนและฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร โดยโครงสร้างดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับของ Schafer et al. [11] และ Silva et al. [12] เมื่อมีความเป็นลบสูงขึ้นในชั้นซิลิกอน

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของ DLC ที่มีความหนาต่างๆ กัน

Thickness (Å)	Built-in Voltage (V)	Breakdown Voltage (V)
100	6	97
200	7	97
300	8	97
400	9	97
500	10	97

การรวมตัว (concentration) ของอิเล็กตรอนที่จุดเชื่อม DLC/Si จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่มีการรวมตัวของอิเล็กตรอนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ลักษณะดังกล่าวอาจเนื่องจากความ

สามารถการนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนเป็นที่ทราบกันว่าฟิล์มบางคาร์บอน คล้ายเพชร (DLC) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปัจจัยการเคลือบ (deposition parameters) [13-15] หากแต่ปัจจัยบางกรณีก็ยังไม่ชัดเจน ทำให้เกิดความยากลำบากในการเปรียบเทียบผลการทดลอง นอกจากนั้น เรายังไม่กระจ่างชัดในลักษณะความแตกต่างของ กระแส-แรงดัน ($I-V$) ในฟิล์ม DLC ซึ่งเคลือบในภาวะเดียวกันแต่ใช้แผ่นซิลิกอนต่างกัน (ชนิด n-type และ p-type) โดยทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม DLC ทั้งที่ทำการเคลือบบน n-Si และ p-Si โดยควบคุมปัจจัยการสังเคราะห์ของพื้นผิวทั้งสองให้มีลักษณะใกล้เคียงกัน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลอันเกิดจากชนิดของซิลิกอน ที่มีต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของ DLC/Si heterostructures จากผลการทดลองความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง DLC มีค่าต่ำกว่า semiconductors ทั่วไป แต่มีค่าสูงกว่าฉนวนไฟฟ้าซึ่งทั่วไปเป็นชนิดโครงสร้าง metal / insulator / semiconductor (MIS) จึงเป็นเหตุผลที่สนับสนุนว่า metal/DLC/Si heterostructure มีลักษณะไม่เหมือนกับโครงสร้าง MIS structure ความแตกต่างของโครงสร้างทั้งสองสามารถยืนยันผลได้จากการวัดค่า capacitance-voltage [16]

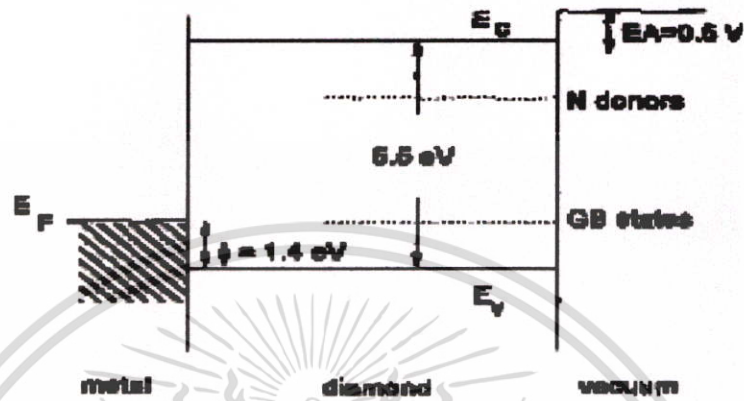
ทุกวันนี้ยังไม่มีทฤษฎีที่ใช้อธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ heterojunction DLC/Si ที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบาง หากแต่เราทราบว่าประจุไฟฟ้าในฟิล์ม DLC สามารถเปลี่ยนระดับพลังงานงานได้โดยการกระโดดของประจุข้ามระดับพลังงาน [17 - 18] (localized states) ทฤษฎีดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับ classical heterostructures ซึ่งภายในชั้นวัสดุมีการเปลี่ยนระดับพลังงานประจุเช่นกัน [19 - 20]

รายละเอียดการวิเคราะห์ได้แสดงให้เห็นว่าไม่มีแบบจำลอง semiconductor heterostructures ใดที่สามารถใช้อธิบายพฤติกรรม $I-V$ ใน heterojunction DLC/Si

กลไกการแพร่ของสนามอิเล็กตรอนจาก เพชร และ ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ฟิล์มคาร์บอนหลายชนิด เช่นฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมากเพื่อนำมาใช้เป็นฟิล์ม microcathodes แผ่นเรียบที่ใช้ใน Field Emission Displays โดยเริ่มแรกได้มีการค้นพบว่าผิวของเพชร นั้นสามารถเป็น negative electron affinity (NEA) ได้ จึงไม่ทำให้เกิด barrier การกระจายของอิเล็กตรอนที่กระจายจากแถบความนำ (condition band) เข้าสู่แถบสุญญากาศ (vacuum level) อย่างไรก็ตามได้พบว่า มีวัสดุที่เป็น carbon-base หลายชนิดที่สามารถแพร่สนามได้ง่ายเช่นกัน อาทิเช่น nano-crystalline diamond, ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) และ carbon nanotubes [10] ดังนั้นคุณสมบัติ negative electron affinity (NEA) จึงไม่ใช่เรื่องแปลกอะไร หากแต่เป็นกลไกธรรมดาๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป

การแพร่ของสนามจากฟิล์มเหล่านี้ เป็นไปตามสมการของ Nordheim equation ดังนี้

$$J = aE^2 \cdot \exp\left(-\frac{b\phi^{3/2}}{\beta E}\right) \quad (1)$$

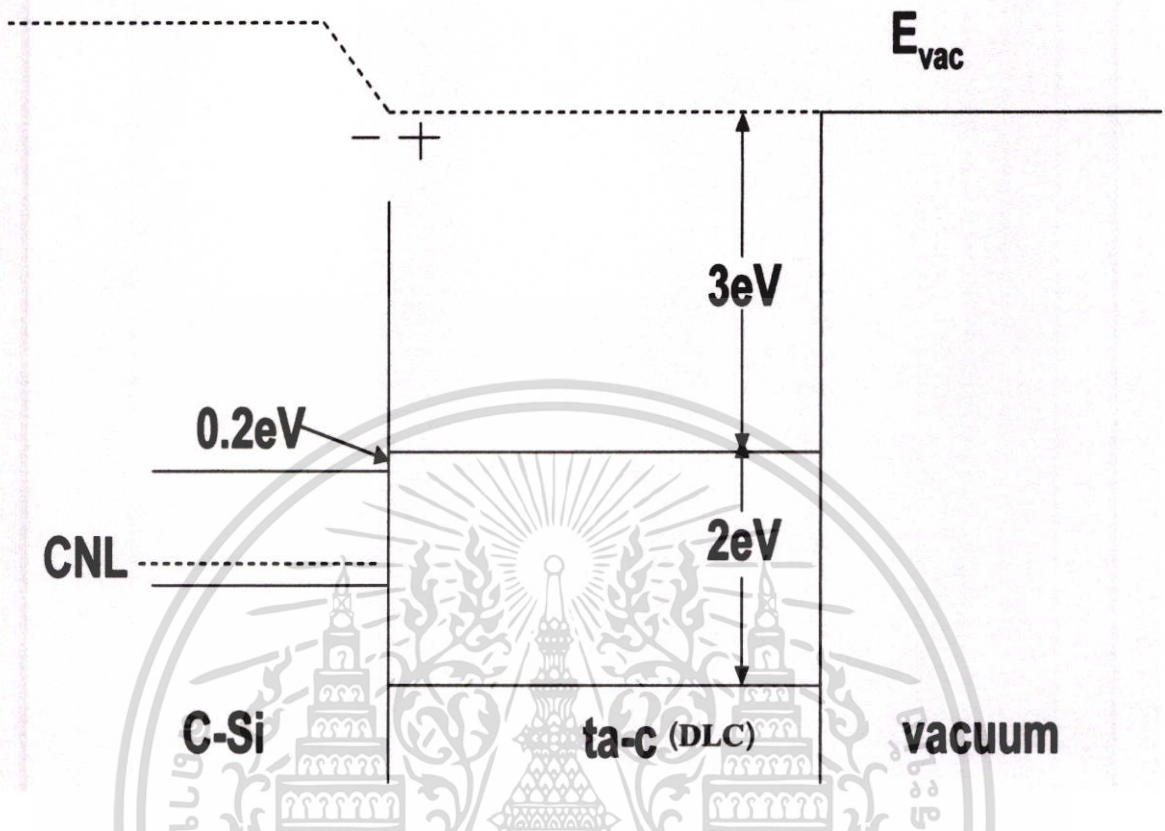


รูปที่ 4.23 แถบพลังงานของโลหะกับเพชร

สำหรับ เพชร จากรูปที่ 4.23 แถบพลังงานแสดงให้เห็นว่า barrier การแพร่ของอิเล็กตรอนในเพชร ชนิด n-type เกิดจากส่วนประกอบที่อยู่ภายในฟิล์มไม่ใช่ที่ผิวหน้า การแพร่ถูกจำกัดไว้เนื่องจากอิเล็กตรอนลอดผ่าน barrier ที่ส่วนประกอบด้านอยู่ในฟิล์มเข้าสู่ แถบความนำของเพชร มากกว่าจะผ่านจาก แถบความนำ (conduction band) เข้าสู่แถบสุญญากาศ (vacuum level)

ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ประกอบไปด้วยพันธะทั้งแบบ sp^3 และ sp^2 ที่สถานะ π ของ sp^2 เป็นตำแหน่งที่แถบมีช่องว่าง ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างของ Nanotube carbon รูปที่ 4.24 แถบพลังงานของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ซึ่งได้จาก photoemission แสดงให้เห็นว่า barrier สำคัญๆ ของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) อยู่ที่ผิวด้านหน้า Electron affinity (EA) ของเพชรสามารถมีค่าอยู่ในช่วง ± 2 eV ได้ โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมี (chemical termination) ที่ผิวของเพชร ทั้งนี้เนื่องจาก C-H bonds มี 2 แขน ทำให้เกิดผิว negative electron affinity (NEA) ขึ้น ในขณะที่ C-O bonds มี 2 แขนตรงข้ามกันทำให้ผิวเป็น EA บวก

โมเดลการแพร่สำหรับระบบคาร์บอนจะต้องมี barrier ขนาดเล็ก โดยมีค่าประมาณ 0.01-0.4 eV ที่ผิวด้านหน้า จากการวัดการกระจายพลังงานที่เกิดจากการแพร่อิเล็กตรอนของเพชรหรือ ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) แสดงให้เห็นว่าอิเล็กตรอนนั้นมาจากสถานะ (state) ~ 5 eV ได้ระดับแถบสุญญากาศ (vacuum level) ซึ่งเป็น barrier ขนาดใหญ่ จากความกว้างของ EED แสดงให้เห็นว่ามีสนาม (field)



รูปที่ 2.24 แถบพลังงานระหว่างซิลิกอนกับฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

ขนาดใหญ่อยู่ภายในซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่ จึงเป็นไปได้ที่จะพบสนามขนาดใหญ่ในโครงสร้างของ carbon nanotube หรือในบริเวณรอบๆ ของ grain boundaries ใน poly-crystalline diamond พิจารณานิวเพชร หรือ ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ซึ่งถูกปิด (terminate) ไว้โดยไฮโดรเจน โดยเว้นพื้นที่เล็กๆ ไว้ 10 nm ค่า affinity ของมันเท่ากับ -1 eV เว้นพื้นที่ที่ไม่ได้ถูกปิดมีค่าเท่ากับ 1 eV การโค้งงอของแถบพลังงานถูกชดเชยโดยการประจุจุดบกพร่อง (charged defects) ได้ผ่านฟิล์ม โดยที่การทำงานของสนามขั้วบวก field lines terminating จะเข้ามาแทนที่ชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) และแผ่กระจายออกมาอย่างสม่ำเสมอได้พื้นผิว โดยจะโฟกัสไปที่ชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) ที่เป็นบวกภายในส่วนที่ไม่ได้ถูกปิด (unterminate) การโฟกัสดังกล่าวนี้ ทำให้สนามลอดผ่าน barrier เป็นจำนวนมาก ขนาดของสนามถูกจำกัดไว้โดยขีดความสามารถที่เป็นไปได้ของ ΔV ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของการปิดกั้น (termination) และจุดบกพร่อง ภายในชั้นปลอดพาหะ (depletion layer)

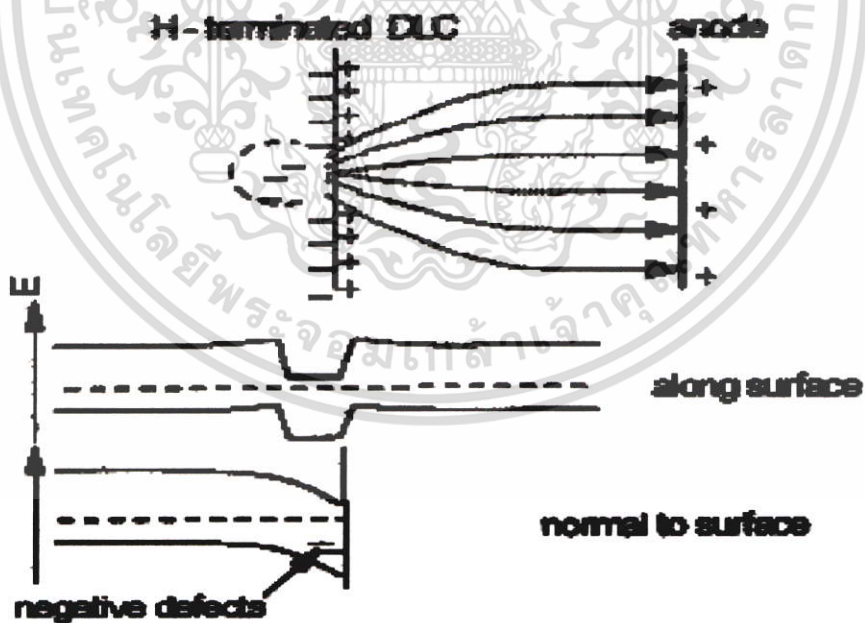
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \left(\frac{2N \cdot e \cdot \Delta V}{\epsilon} \right)^{1/2} \quad (2)$$

ที่ค่า $\Delta V = 2 \text{ V}$, $N = 10^{25} \text{ m}^{-3}$, $\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และ $\epsilon_r = 5$ จะได้ $E = 4 \times 10^8 \text{ V/m}$ และ ϵ_r ภายนอกพื้นผิว ในช่องลอด tunnel barrier ขนาดของสนามนี้จะต้องเป็นไปตาม EEDs

การแพร่หลักๆ นั้น เกิดมาจากพื้นผิวขนาด nanometer ที่ไม่ได้ถูกปิดไว้โดยไฮโดรเจนซึ่งเป็นพื้นที่ที่มี local affinity สูงกว่า เป็นเหตุให้เกิดการหักลงด้านล่างอย่างรุนแรง ในเพชรการแพร่มีแนวโน้มที่จะเกิดจากพื้นผิวที่มีพันธะ sp^2 อยู่เป็นจำนวนมากซึ่งไม่เหมือนใน H-terminated สำหรับฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) โมเดลจะทำให้ได้สนามออกมาไม่สม่ำเสมอโดยไม่จำเป็นต้องขรุขระ

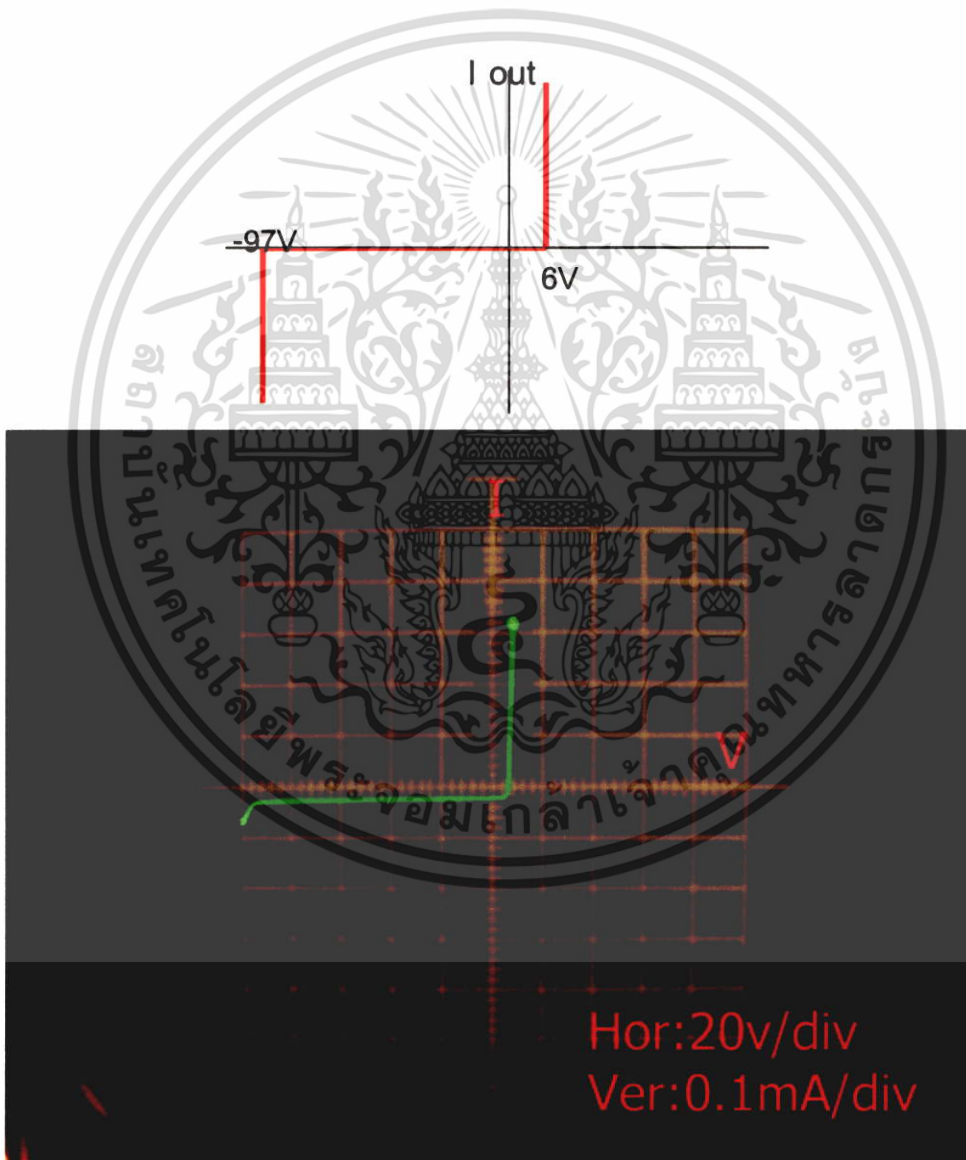
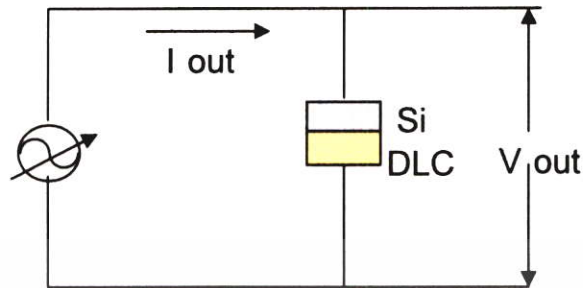
กลไกที่เกิดขึ้นในคาร์บอนเกิดขึ้นจาก การเปลี่ยนแปลงของการปิด (termination) ทำให้ขีดความสามารถเกิดความไม่แน่นอนมากขึ้น , ความบกพร่องที่เกิดกับความหนาแน่นของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) และเพชร มีขนาดใหญ่ ดังนั้นช่วงกว้างของปลอดพาหะ (depletion) จึงสั้น และสนามจึงสูง , ในระบบคาร์บอน สามารถเกิดสนามที่ใหญ่ผิดปกติขึ้นได้ เนื่องจากสนามมีการพังทลาย (breakdown) สูง ประมาณ $1000 \text{ V}/\mu\text{m}$



รูปที่ 4.25 แนวสนามที่สิ้นสุดลงที่ประจุลบบกพร่องในเขตปลอดพาหะหลังพื้นผิวที่ไม่ได้ปิด (unterminated surface) เป็นเหตุให้แถบพลังงานหักลงอย่างรุนแรง

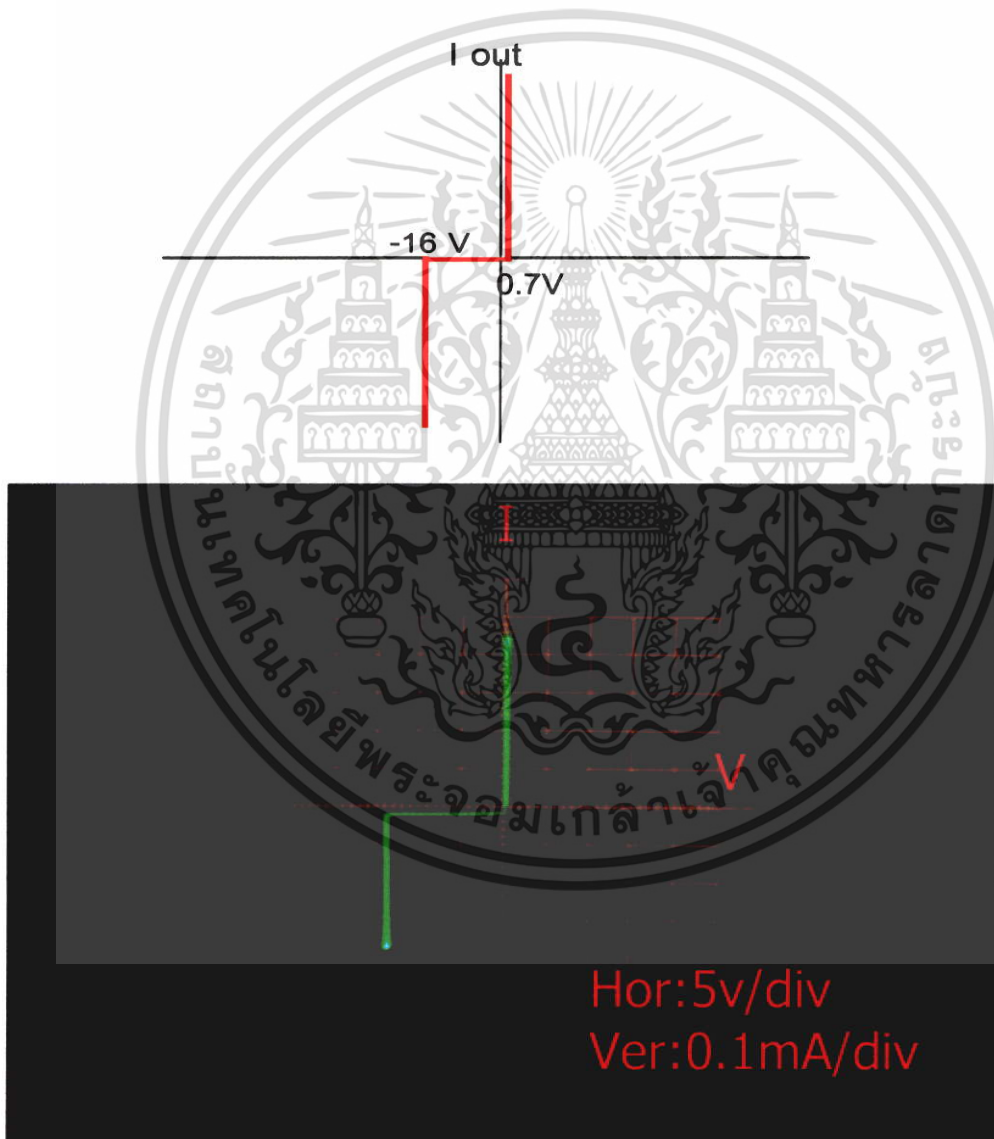
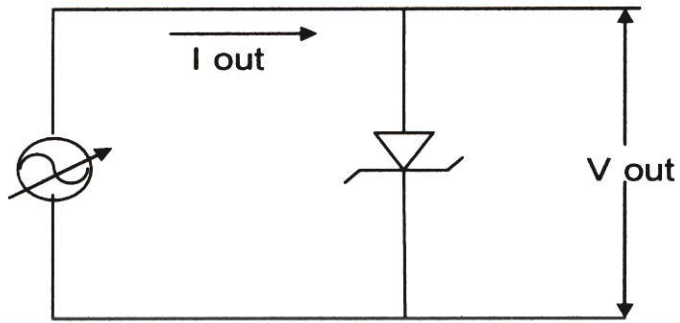
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการทดลองนำไดโอดรอยต่อต่างชนิดกัน DLC/Si มาประยุกต์ใช้งานในวงจร



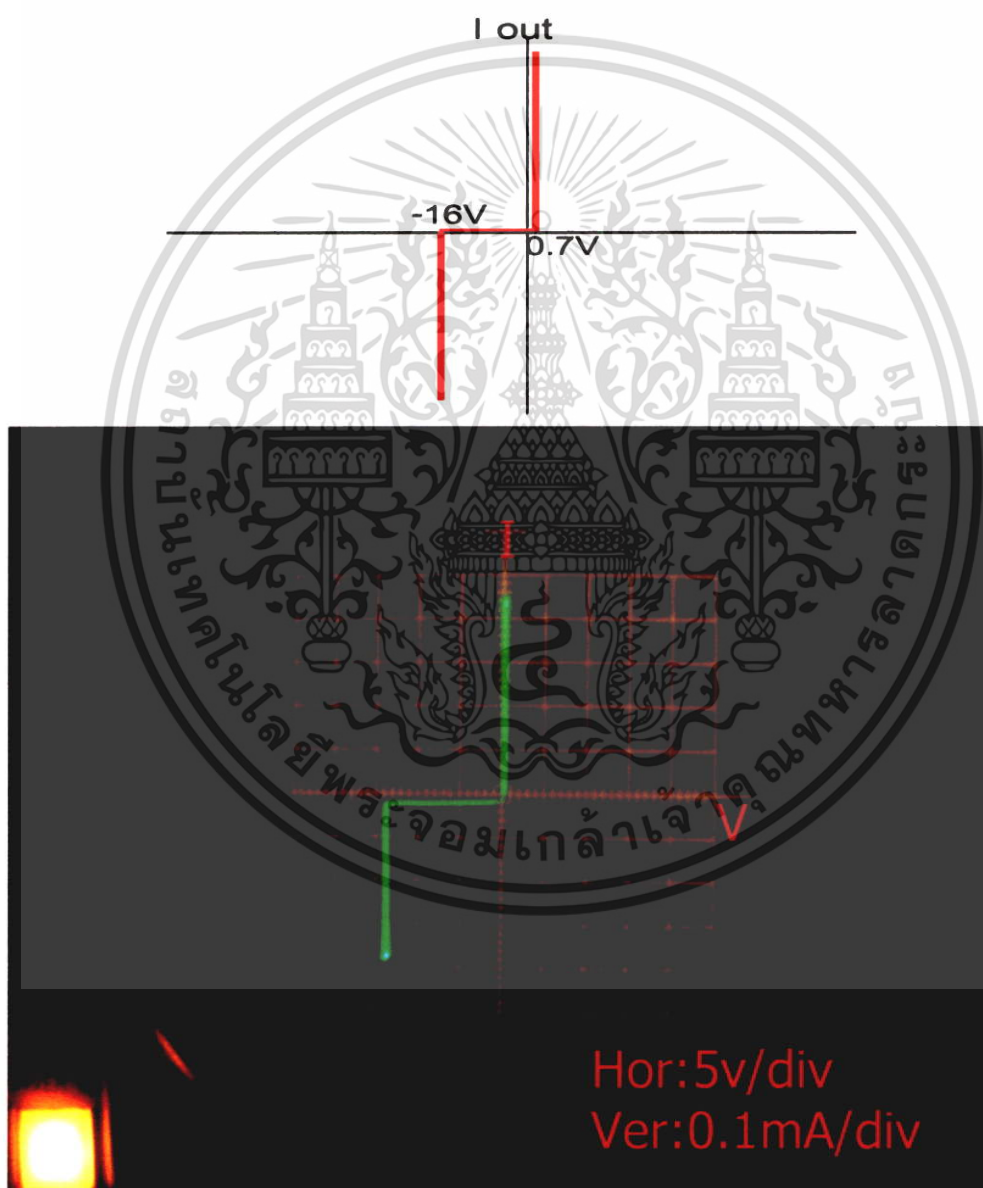
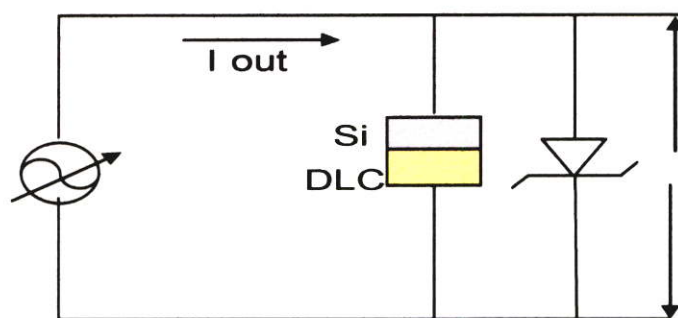
รูปที่ 4.26 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของ heterojunction DLC/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



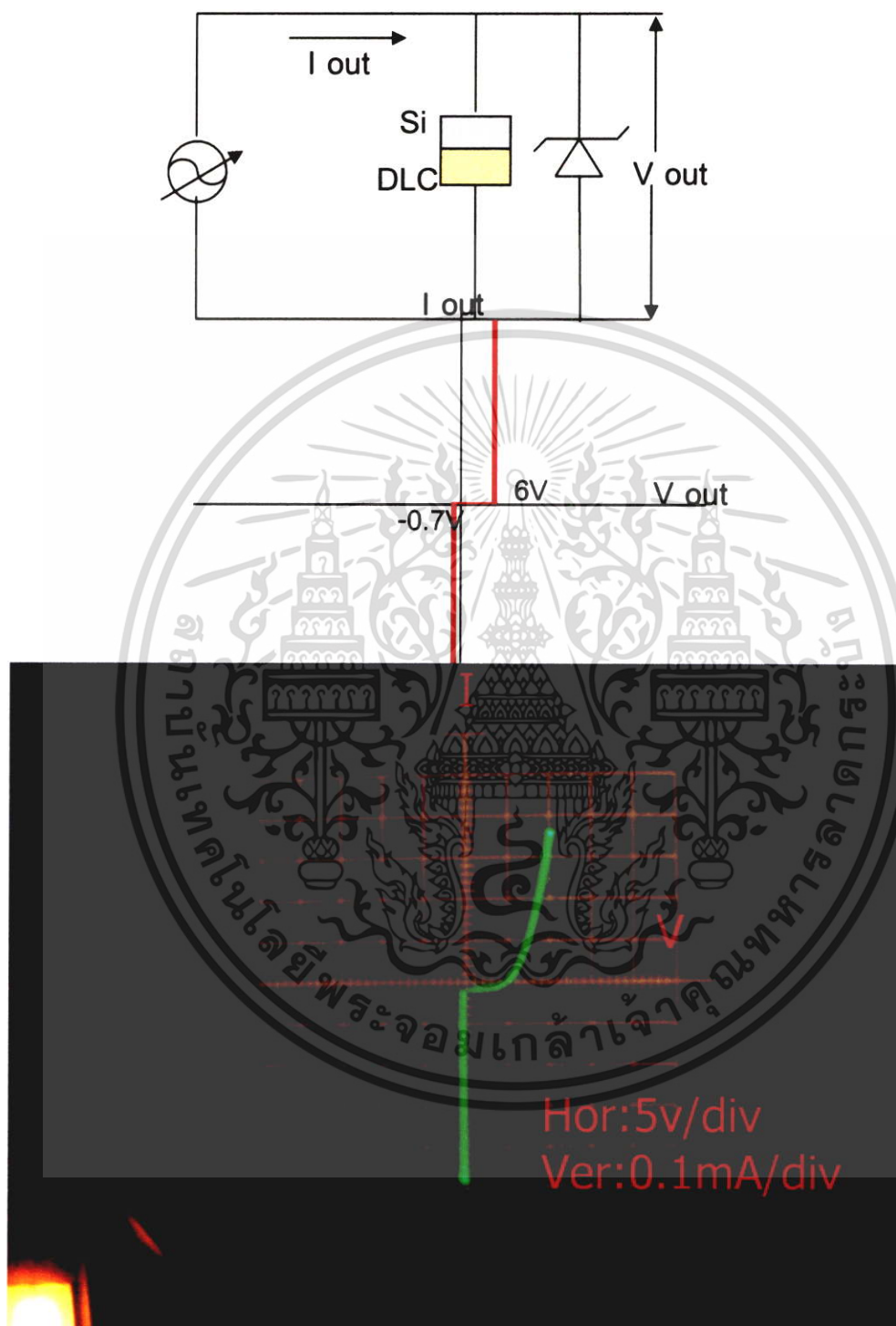
รูปที่ 4.27 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



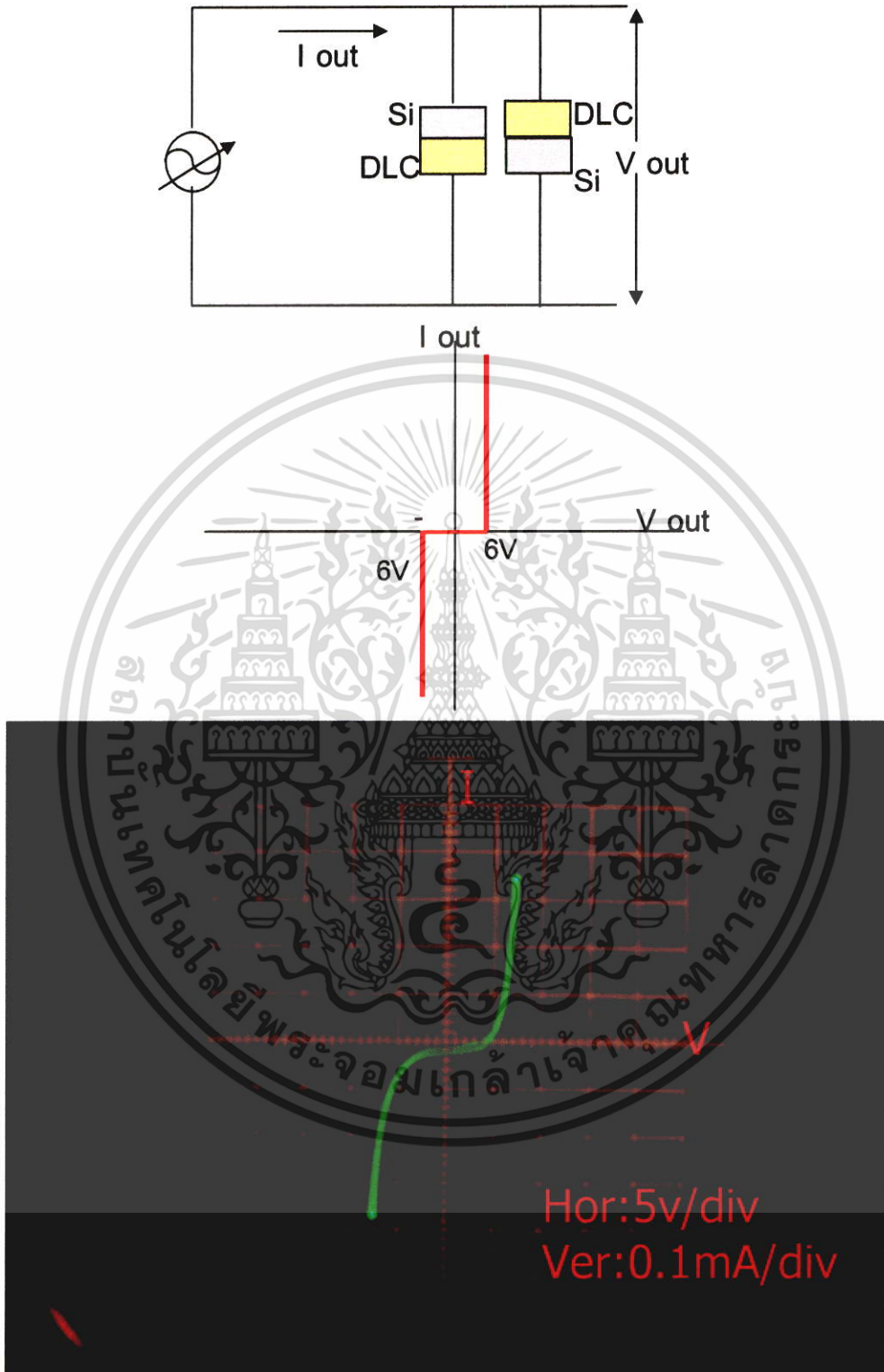
รูปที่ 4.28 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของ heterojunction DLC/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของ heterojunction DLC/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของ heterojunction DLC/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เบื้องต้นได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร ในส่วนของงานวิจัยจากกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้ จากเทคนิค Ion Beam CVD การสร้างฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรมีเงื่อนไขดังนี้

1. อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_2$ ที่เหมาะสมคือ 4
2. อุณหภูมิฐานรอง ช่วงอุณหภูมิ 40-50°C
3. อัตราการไหลของก๊าซ CH_4 และ C_2H_2 40 ลบ.ซม./วินาที และ 10 ลบ.ซม./วินาที
4. ช่วงระยะระหว่างปืนกับฐานรอง 15 ซม.
5. ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เวลา 1,2,3,4,5,8,12,16,20 นาทีได้ฟิล์มDLCหนา 25, 50, 75, 100, 125, 200, 300, 400, 500 Å (อัตราการเกิด 25 Å/นาที)

นำเอาความสัมพันธ์ของเทคนิคการวิเคราะห์ sp^2 และ sp^3 จาก Raman Spectroscopy มาใช้เป็นตัวควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน DLC ซึ่งพบว่าเมื่อมีปริมาณ sp^3 อยู่มาก ค่าความเค้นของงานจะมากตามไปด้วย จึงมีการพัฒนานำเทคนิค Raman Spectroscopy มาใช้ในการตรวจสอบค่าความเค้นดังกล่าว แทนผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการศึกษาคคุณสมบัติของ heterojunction ของ DLC / Si โดยพิจารณาคคุณสมบัติการนำไฟฟ้ากระแสตรงทั้งชนิด DLC/p-Si และ DLC/n-Si ผลพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสและแรงดันไฟฟ้า ($I-V$ Characteristics) ของ heterojunction DLC / Si จะมีค่าแรงดันภายใน (Built-in Voltage) 6 โวลต์เมื่อ heteroJunction DLC / Si มีชั้นฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) หนา 100 Å และมีค่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) 97 โวลต์ และ heterojunction DLC/p-Si จะมีค่าแรงดันภายใน (Built-in Voltage) 6 โวลต์เมื่อ heterojunction DLC /p- Si มีชั้น DLC หนา 100 Å และมีค่าแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) 35 โวลต์ heterojunction DLC/Si มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นอิสระไม่ขึ้นกับใคร จึงต้องวัดค่าความเค้นของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่แปรผันตรงกับความหนาของฟิล์ม นอกจากนี้จากการทดลองยังพบอีกว่าค่าแรงดันภายในจะเปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC) อีกด้วย จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้งานเพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ขณะใช้งานแบบไบอัสตรง

heterojunction DLC/Si มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นอิสระไม่ขึ้นกับใคร ลักษณะดังกล่าวสามารถทำความเข้าใจได้เมื่อพิจารณาแถบพลังงานของจุดเชื่อมต่อ DLC / Si ออกมา ซึ่งโครงสร้างแถบพลังงานของจุดเชื่อมต่อ ของ DLC / Si ได้แสดงไว้แล้วโดยแบบจำลอง แถบพลังงานเป็นผลที่ได้มาจากค่าที่ทราบอยู่แล้ว อันได้แก่ ionization energies และ แถบพลังงานของซิลิกอนและฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร เมื่อมีความเป็นลบสูงขึ้นในชั้นซิลิกอนการรวมตัว (concentration) ของอิเล็กตรอนที่จุดเชื่อมต่อ DLC/Si จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่มีการรวมตัวของอิเล็กตรอนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ลักษณะดังกล่าวอาจเนื่องจากความสามารถการนำไฟฟ้าของฟิล์ม DLC มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปัจจัยการสังเคราะห์ ความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง DLC มีค่าต่ำกว่า semiconductors ทั่วๆ ไป แต่มีค่าสูงกว่าฉนวนไฟฟ้าซึ่งทั่วไปเป็นชนิดโครงสร้าง metal/insulator/ semiconductor (MIS) จึงเป็นเหตุผลที่สนับสนุนว่า metal/DLC/Si heterostructure มีลักษณะไม่เหมือนกับโครงสร้าง MIS structure ความแตกต่างของโครงสร้างทั้งสองสามารถยืนยันผลได้จากการวัดค่า capacitance-voltage

ทุกวันนี้ยังไม่มีทฤษฎีที่ใช้อธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ heterojunction DLC/Si ที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มบาง หากแต่เราทราบว่าประจุไฟฟ้าในฟิล์ม DLC สามารถเปลี่ยนระดับพลังงานงานได้โดยการกระโดดของประจุข้ามระดับพลังงานซึ่งภายในชั้นวัสดุมีการเปลี่ยนระดับพลังงานประจุ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert F.David. Diamond Film and Coatings. U.S.A. : Noyes Publication. 1993.
- [2] J.E.Field. The Properties of Natural and Synthetic Diamond. London : Harcourt Brace Janovich Publisher. 1992.
- [3] Lawrence S. Pan, Don R.Kania. Diamond : Electronic Properties and Application. Boston : Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [4] Solomons. Fundamentals of Organics Chemistry. 5th ed. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [5] Karl E. Spear, John P. Dismukes. Synthetic Diamond : Emerging CVD Science and Technology. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [6] Brain R Pamplin. Crystal Growth. Oxford : university of Bath Pergamon Press. 1975.
- [7] M.A.George, A.Burger, W.E.Collins, J.L.Davidson, A.V.Barnes and N.H.Tolk.
"Investigation of nucleation and growth processes of diamond films by Atomic
- [8] Kanaan Kano. Semiconductor Devices. New Jersey : Prentice-Hall. 1998.
- [9] Donald A. Neaman. Semiconductor Physics and Devices. Lllinois : IRWIN. 1992.
- [10] A Talin, et al, Appl Phys Lett 69 3842 (1996); B S Satyanarayana, et al, App Phys Lett 71 1430 (1997); W A deHeer, et al, Science 270 1179 (1995).
- [11] J.Schafer,J.ristein and L.Ley "Electronic and structural properties of the interface between c-si (111)and diamond-like carbon",diamond and Related Materials, Vol.6,pp.730-735,1997
- [12] S.R.P. Silva,K.J.Clay,S.P.Speakman and G.A.J. amaratunga," diamond-like carbon thin film deposition using a magnetically confined rf PECVD system" , diamond and Related Materials,Vol.4,pp.977-983,1995
- [13] J.C.Angus,P.Koidl and S.Domitz,in plasma deposited thin films, ed.J.Mort and F.Jansen, CRC Press,Boca Raton,FL,1986,ch1
- [14] D.Nir,R.Kalish and G. Lewin, "diamond-like carbon films of low hydrogen contents made with a mixture of hydrocarbon and reactive gas",Thin Solid Films, Vol.117,pp.125 –

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

130,1984

- [15] M.Atamor,W.C. Vassell and K.R Carduner, "Atomic constraint in hydrogenated diamond-like carbon",Appl. Phys. Lett Vol.58,pp.592-594,1991
- [16] M.Dluzniewski, unpublished results(in,"Case of typical MIS structures a characteristic change of capacitance at the voltage corresponding to transition from the accumulation to the depletion is registered. No such a change of capacitance of our heterostructures was found")
- [17] B. Meyerson and S.W. Smith,"Electrical and Optical properties of hydrogenated amorphous carbon films", J.Non-Cryst.Solids, Vol.435,pp.35-36,1980
- [18] D.I. Jones and A.D. Stewart,"Phil.Mag.B, Vol.46,pp.423-434,1982
- [19] W.Mycielski,E. Staryga,A.Lipinski,S.Mitura and A. Sokolowska, "Open-circuit mode drift mobility measurements in DLC thin films",Diamond and Related Materials Vol.3,pp.858-860,1994.
- [20] R.L. Anderson,"Experiments on Ge-GaAs heterojunctions",Solid State Electronics Vol.5,pp.341-346,1962.
- [21] S.S. Perlman and D.L. Feucht,"p-n heterojunctions", Solid State Electronics Vol.7,pp. 911-915,1964
- [22] Eileen Wilks, John Wilks. Properties and Applications of Diamond. Oxford : Butterworth-Heinemann.1991. Sons, Inc. 1997.
- [23] Vainshtein, Boris K. Fundamentals of Crystals. 2nd ed. Berlin : Springer-Verlag. 1994.
- [24] J.E.Field. The Properties of Natural and Synthetic Diamond. London : Harcourt
- [25] Donald A. Neaman. Semiconductor Physics and Devices. Illinois : IRWIN. 1992.
- [26] E. Mitura, P. Niedzielski, Z. Has,R. Wolowicz,a. Jakubowski, J. Szmidt,A.Sokolowska P.Louda, J. Marciniak and B.Koczy," diamond-like carbon coatings for biomedical applications", diamond Related Materials,Vol.3,pp.896-898,1994[27] J F Zhao and etc., J.Phys.:Condens.Matter. 12, 9201-9213 (2000)
- [28] Andrea Kailer and Yury G. Gogotsi, Raman Spectroscopy. 30, 939-946 (1999).
- [29] John R. Ferraro, *Introductory Raman Spectroscopy* (Academic Press, Inc.,

- New York, 1994).
- [30] R.H.Rediker,S.Stopek and J.H.Rward,"Interface Alloy Epitaaxial heterojunctions", Solid State Electronics Vol.7,pp.621-625,1964
- [31] G.Giebel and L. Pavesi,"About the I-V characteristics of metal-porous silicon diodes", Phys.Stat.Sol(A) Vol.151,pp.355-361,1995
- [32] นิรุช ปิ่นเกตุ "การศึกษาและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544
- [33] Leigh Canham. 1997. Properties of Porous Silicon. London. Inspec.
- [34] Matsuo Fukada. Optical Semiconductor Devices. United State of America : John Wiley & Sons,INC
- [35] สมเกียรติ คุนเดช.2545. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์พิมพ์ครั้งที่1.กรุงเทพฯ
- [36] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง "การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542
- [37] ดุสิต เรืองงาม. "สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการใช้งานต่าง ๆ เล่ม 1" สำนักพิมพ์แสงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [38] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง "การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542
- [39] คณะรัชต์ วรรณ "การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของพอร์สซิลิกอนและฟิล์มเพชร" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal Conductivities

Material	Conductivities (W/cm. ⁰)
Diamond (Type II)	20.00
Boron Nitride (Theory)	13.00
Silicon Carbide	4.90
Copper	3.80
Gold	3.11
Tungsten	1.70
Silicon	1.50
Grphite	0.80-2.50
Gallium Arsenide	0.46
Germnium	0.28

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบ Molar Heat capacity

Material	Conductivities (J/Mole. ⁰ C)
Silver	25.50
Gold	25.41
Copper	24.50
Aluminium	24.37
Silicon	19.85
Graphite	8.54
Diamond	6.19
Water	4.22
BeO	0.74
Si	0.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบ Thermal Expansion Coefficients

Material	Coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Silicon Dioxide	0.5
Diamond (300K)	0.8
Diamond (193K)	0.4
Diamond (400-1200K)	1.5
Silicon	2.6
Aluminum nitride	4.5
Tungsten (Polycrystal)	4.5
Sapphire	5.5
Germanium	5.7
Gallium Arseniae	5.9
Beryllium Oxide	5.9
YAG	7.8
Grapphite (in plane)	8.8
Platinum (Polycrystal)	8.9
Gold (Polycrystal)	14.1

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบ Hardness

Material	Knoop Hardness(kg/mm^2)(298K)
Diamond	5700-10400
Cubic BN	4500
Boron Carbide	2250
Titanium Oxide	2000
Silicon Carbide	1875-3980
High Carbon Steel	400
Copper	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	รุ่งนภา จิตภักดี
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2517
สถานที่เกิด	พัทลุง
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2541



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้