

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการวัดค่าความแข็งของดีแอลซีฟิล์มโดยไม่ทำลายชิ้นงาน

THE STUDY OF NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR DLC HARDNESS  
MEASUREMENT



T117107



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 117107  
วันเดือนปี..... 23 ส.ย. 2554

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

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-043-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR DLC HARDNESS  
MEASUREMENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONIC ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2010

KMITL-2010-EN-M-043-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการวัดค่าความแข็งแรงของดีแอลซีฟิล์มโดยไม่ทำลายชิ้นงาน  
Thesis Title The Study of Non-Destructive Method for DLC Hardness Measurem  
นักศึกษา นายอรรถพร สุพลจิต  
รหัสประจำตัว 48061353  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ จูดีรุ่งเรือง  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMHTL-2010-EN-M-043-002

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	นิยมเจริญ	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
รศ.ดร.วิสุทธิ	จูดีรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.30-11.30 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
วันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.  
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์กลับบัณฑิตยสถาน  
วันที่ 29 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 53  
ลงชื่อ.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการวัดค่าความแข็งของดีเอลซีฟิล์มโดยไม่ทำลายชิ้นงาน
นักศึกษา	นาย อรรถพร สุพลจิต
รหัสนักศึกษา	48061353
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้ Diamond-like-Carbon (DLC) ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้มีการนำมาใช้ในหลายส่วนด้วยกัน เช่น ได้มีการนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์สำหรับหัวอ่าน (Magnetic head) และการสร้างฐานรองการลงจอดของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดย DLC ที่ได้สร้างขึ้นมานี้ มีเทคนิคจำนวนมากที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของ DLC ฟิล์ม ซึ่งเกิดจากการเกาะเกี่ยวกันของพันธะคาร์บอนเช่น ความเค้น และความแข็งเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ถูกนำมา วิเคราะห์ DLC ในเชิงคุณภาพ ดังนั้น ความแข็งจึงเป็นพารามิเตอร์ที่น่าสนใจสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของ DLC ฟิล์ม แต่การวิเคราะห์ความแข็งโดยใช้เทคนิคปัจจุบันคือวิธีนาโนอินเด้นเตชัน นั้นมีความยุ่งยากในการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบและยังเป็นการทำลายชิ้นงาน จึงเป็นที่มาของการหาวิธีการวัดค่าความแข็งโดยใช้วิธีการทางแสง

วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการศึกษาถึงวิธีการวัดค่าความแข็งของ DLC ฟิล์มที่ง่าย และไม่ทำลายชิ้นงาน และใช้เวลาในการวัดค่าความแข็งของ DLC ฟิล์มที่สั้นกว่าวิธีนาโนอินเด้นเตชัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอไว้สองแนวทางคือ การหาค่าความแข็งของ DLC ฟิล์มจากการกระเจิงของโมเลกุลแบบ Raman Scattering และ การสะท้อนของแสง ซึ่งเราสามารถนำความสัมพันธ์เหล่านี้มาหาค่าความแข็งโดยอ้อมได้ แต่วิธีการนี้ก็ยังมีข้อจำกัดคือจะต้องควบคุมความหนาของ DLC ฟิล์มให้คงที่เสมอก่อนนำมาทำการวัดหาค่าความแข็ง

<b>Thesis Title</b>	The Study of Non-Destructive Method for DLC Hardness Measurement
<b>Student</b>	Mr. Attaporn Suponjit
<b>Student ID</b>	48061353
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	<u>2010</u>
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang

### Abstract

Currently, diamond-like-carbon ( DLC ) is widely used in many industries especially in hard disk drive manufacturing. DLC is involved in many parts such as used to protect both Chemical and physical wears and also be used to be landing pad in hard disk drive. To analyze quality of the synthetic DLC film, we interest to test on carbon bond properties, for example stress and Hardness. One technique used to analyze DLC film hardness is nanoindentation. This one is very difficult, complicated and also destroy the sample.

This thesis intended to study on easy, non-destructive and less time consumed methods for hardness measurement. In this research, I would like to present 2 possible methods which based on 2 principles, Raman molecular scattering and light reflection, to indirect finding the DLC film hardness value.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ที่ให้ความรู้แนวทางในการแก้ไขปัญหาและช่วยสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบคุณ บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย จำกัด ที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัยทั้งหมด และขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้กำเนิด ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XI
ศัพท์เทคนิค.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัยและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของ Diamond Like Carbon (DLC).....	4
2.1.1 เทคโนโลยีต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์ DLC.....	4
2.2 ลักษณะโครงสร้างของ DLC Film, เพชร และรูปต่างๆของคาร์บอน.....	18
2.2.1 Diamond Like Carbon Film.....	18
2.2.2 เพชร (Diamond).....	18
2.2.3 Microcrystalline carbon.....	20
2.2.4 Amorphous Carbon.....	20
2.3 สมดุลภาคของคาร์บอน.....	21
2.4 ทฤษฎีการวัดค่าความแข็งด้วยวิธี Nanoindentation.....	22
2.4.1 การวิเคราะห์การสัมผัสแบบยืดหยุ่น (Elastic contact analysis).....	24
2.4.2 การวิเคราะห์แบบโดเนอร์ และ นิกซ์ (Doner and Nix).....	25
2.4.3 การวิเคราะห์แบบโอลิเวอร์ และ พาร์ (Oliver and Pharr).....	27
2.4.4 วิธีการวิเคราะห์แบบ field and swain approach.....	28
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานของ Raman Spectroscopy.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของ Reflextrometer.....	36
2.6.1 ทฤษฎีพื้นฐานทางแสงของเครื่อง Reflextrometer.....	36
2.6.2 หลักการทำงานของเครื่อง Reflextrometer.....	42
2.7 เครื่องมือในการวิเคราะห์ DLC Film ทางกายภาพ.....	44
2.7.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดด้วย SEM.....	44
2.7.2 การวิเคราะห์ด้วย Atomic Force Microscope (AFM).....	45
2.7.3 Ellipsometry.....	50
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง และ ผลการทดลอง.....	62
3.1 การออกแบบการทดลองเพื่อสร้าง DLC พิล์ม.....	62
3.1.1 ความหนาของ DLC พิล์มที่ได้จากการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างมีเทนต่อ เอทิลีน จาก 0/35 ถึง 30/5 และทำการการปลูกฟิล์มเป็นเวลา 20 นาที เท่ากันในทุกการทดลอง.....	63
3.1.2 อัตราการปลูกฟิล์มเทียบกับ อัตราส่วนของมีเทนต่อเอทิลีน จาก 0/35 ถึง 30/5.....	65
3.1.3 การออกแบบการทดลองเพื่อสร้าง DLC พิล์มที่มีความหนา 100 นาโนเมตร.....	66
3.1.4 ค่าความขรุขระของ DLC พิล์มในแต่ละการทดลอง.....	67
3.1.5 ภาพถ่ายพื้นผิวของ DLC พิล์มด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope).....	70
3.2 การออกแบบ วิธีการวัดค่าสัญญาณ Raman ของ DLC พิล์ม.....	71
3.2.1 ผลการวัดค่าสัญญาณ Raman ต่างๆของ DLC พิล์มในแต่ละการทดลอง....	73
3.3 การออกแบบวิธีการวัดค่าความแข็งของ DLC พิล์ม.....	74
3.3.1 ค่าความแข็งของ DLC พิล์มในแต่ละการทดลอง.....	75
3.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแข็งกับอัตราส่วนระหว่างมีเทนต่อเอทิลีน..	76
3.4 การออกแบบ วิธีการวัดค่าการสะท้อนแสง (Light Reflection) ของ DLC พิล์ม.....	76
3.4.1 ค่าการสะท้อนแสง (Light Reflection) ของ DLC พิล์ม ในแต่ละการทดลอง.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ หรือการขึ้นทะเบียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านกา  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าสัญญาณต่างๆของ DLC พิล์ม.....	79
3.5.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าสัญญาณ Raman ต่างๆ ของDLC พิล์ม.....	79
3.5.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าการสะท้อนแสงของฟิล์ม DLC.....	83
บทที่ 4 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์.....	85
4.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็งด้วยการวัดค่าการกระเจิงของแสงแบบรามาน.....	85
4.2 การวิเคราะห์ค่าความแข็งด้วยการวัดค่าระดับการสะท้อนแสง.....	85
4.3 ข้อจำกัดของการวัดค่าความแข็งของฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคทางแสง.....	86
4.4 การตรวจสอบผลการทดลอง.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ยอดกราฟหลักๆ จากการวัดเพชรด้วยเครื่อง Raman Spectroscope .....	35
2.2 คัมภ์หักเหของตัวกลางต่าง ๆ สำหรับแสงโซเดียม, 589.3 nm (D-line).....	38
2.3 คัมภ์หักเหของแก้วคราวน์ (crown) และแก้วฟลินท์ (flint) ที่ความถี่แสงต่าง ๆ กัน.....	42
3.1 อัตราส่วนของ $C_2H_4$ ต่อ $CH_4$ ในแต่ละการทดลอง.....	62
3.2 ความหนาของ DLC ฟิล์มที่ได้ในแต่ละการทดลองที่เวลา 20 นาที.....	63
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มเทียบกับ อัตราส่วนของมีเทนต่อเอทิลีนจาก 0/35 ถึง 30/5.....	65
3.4 เวลาในการปลูกฟิล์มและค่าความหนาของฟิล์มในแต่ละการทดลอง.....	66
3.5 ค่าความขรุขระของฟิล์ม DLC ในแต่ละการทดลอง.....	67
3.6 ค่าสัญญาณ Raman ต่างๆของ DLC ฟิล์มในแต่ละการทดลอง.....	73
3.7 ค่าสัญญาณ Raman ต่างๆของ DLC ฟิล์มในแต่ละการทดลอง.....	73
3.8 ผลการวัดค่าความแข็งของ DLC ฟิล์มด้วยวิธีนาโนอินเด้นชัน (Nanoindentation).....	75
3.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของ DLC ฟิล์มแต่ละการทดลอง.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 (ก) ตัวอย่างการเตรียมงานสำหรับวัดค่าความแข็งด้วยวิธีนาโนอินเด้นเตชัน.....	2
1 (จ) ตัวอย่างพื้นผิวของ DLC พิล์มหลังจากผ่านการวัดค่าความแข็งด้วยวิธีนาโนอินเด้นเตชัน.....	2
2.1 โค้ดแกรมอย่างง่ายของระบบ FCVA.....	5
2.2 ตัวอย่างของเครื่อง FCVA ของบริษัท Veeco.....	5
2.3 โค้ดแกรมอย่างง่ายของระบบ Ion Beam CVD.....	6
2.4 โค้ดแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่1.....	7
2.5 โค้ดแกรมอย่างง่ายของระบบ IBVCD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่2.....	8
2.6 โค้ดแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่3.....	9
2.7 โครงสร้างภายในของเครื่อง IBCVD.....	10
2.8 ระบบ Microwave plasma CVD method (a) Tube-style (b) Bell jar.....	12
2.9 ระบบ RF plasma CVD method (a) Inductive RF plasma CVD (b) RF thermal plasma CVD.....	13
2.10 ระบบ DC plasma CVD method .....	14
2.11 ระบบ DC plasma jet CVD method .....	15
2.12 ระบบ Electron cyclotron resonance microwave plasma CVD method .....	16
2.13 ระบบ Combustion activation method .....	17
2.14 Raman Spectrum ของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	18
2.15 โครงสร้างผลึกของเพชร.....	19
2.16 การจัดเรียงตัวของอะตอมของกราฟไฟต์.....	20
2.17 แผ่นภาพสมมูลภาคของคาร์บอน.....	21
2.18 ชนิดของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC).....	22
2.19 เส้นโค้งของ load-displacement.....	24
2.20 การวิเคราะห์แบบ Doerner และ Nix.....	26
2.21 การวิเคราะห์แบบ Oliver และ Pharr.....	28
2.22 การวิเคราะห์แบบ Field และ Swain.....	29
2.23 เส้นทางการเดินทางของแสงในเครื่อง Raman Spectroscopy.....	31
2.24 กลไกของเครื่อง Raman spectroscope.....	33

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 เครื่อง Raman spectrum ของบริษัท Renishaw .....	34
2.26 Raman spectrum ของเพชรที่สร้างขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน .....	36
2.27 ชิ้นงานตัวอย่างที่มีชั้นฟิล์มเคลือบอยู่สองชั้นและไม่ทราบค่าข้อมูล โครงสร้างของฟิล์มทั้งสองชนิด.....	41
2.28 ชิ้นงานตัวอย่าง A จะนำไปหาค่า $n$ และค่า $k$ ของฟิล์มชนิดที่ 1 .....	41
2.29 องค์ประกอบหลักของเครื่อง Reflextrometer.....	43
2.30 แผนภาพการทำงานของ Scanning Electron Microscope (SEM).....	45
2.31 เครื่องมือวัด AFM.....	46
2.32 แผนภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วย AFM.....	46
2.33 การเปลี่ยนแปลงเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric ceramics).....	47
2.34 วงจรป้อนกลับ (Feedback circuit) ของ AFM.....	48
2.35 แผนภาพของ Scanning Probe Microscope (SPM).....	49
2.36 หัววัด (Cantilever) ของเครื่อง AFM ซึ่งถ่ายภาพจาก SEM.....	49
2.37 ภาพสามมิติจากการวิเคราะห์ด้วย AFM.....	50
2.38 ตัวอย่างการเกิด Polarization แบบต่างๆ.....	52
2.39 ปฏิกิริยาที่แสงเปลี่ยนแปลงความเร็วในวัสดุต่างชนิดกัน.....	54
2.40 ค่าคงที่ทางแสงของ $TiO_2$ จากย่าน ultraviolet (UV) ไปจนถึง infrared (IR).....	54
2.41 เส้นทางการเดินของแสงหลังจากตกกระทบกับชิ้นงาน.....	55
2.42 เส้นทางการเดินของแสงหลังจากตกกระทบกับชิ้นงาน.....	56
2.43 รูปแบบพื้นฐานของการวัด Ellipsometer.....	57
2.44 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง Ellipsometer.....	58
2.45 ขั้นตอนการทำงานของเครื่อง Ellipsometer.....	59
2.46 (a) ระดับการสะท้อนแสงของ $SiO_2$ ที่มีความหนาต่างกัน ที่มีความหนาต่างกัน.....	60
(b) ค่าความแตกต่างทางเฟสของ $SiO_2$ ที่มีความหนาต่างกัน.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ DLC พิล์มกับอัตราส่วนของ $C_2H_4$ ต่อ $CH_4$ .....	64
3.2 ตัวอย่างผลการวัดความหนาของ DLC พิล์มด้วยเครื่อง AFM.....	64
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มเทียบกับ อัตราส่วนของมีเทนต่อเอทิลีนจาก 0/35 ถึง 30/5.....	66
3.4 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 1.....	68
3.5 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 2.....	68
3.6 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 3.....	68
3.7 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 4.....	68
3.8 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 5.....	69
3.9 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 6.....	69
3.10 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 7.....	69
3.11 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 8.....	69
3.12 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 1.....	70
3.13 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 2.....	70
3.14 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 3.....	70
3.15 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 4.....	70
3.16 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 5.....	71
3.17 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 6.....	71
3.18 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 7.....	71
3.19 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 8.....	71
3.20 ตัวอย่างตำแหน่ง D-Band และ G-Band.....	72
3.21 ลักษณะการกดของหัววัดค่าความแข็ง.....	74
3.22 กราฟแสดงค่า load curve ซึ่งได้จากการวัดค่าความแข็งในแต่ละการทดลอง.....	75
3.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแข็งกับอัตราส่วนระหว่างมีเทนต่อเอทิลีน.....	76
3.24 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของ DLC พิล์มในแต่ละการทดลอง.....	77
3.25 เส้นทางเดินของแสงในเครื่อง Reflectometer.....	77
3.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความชันของเส้นฐาน (Slope) กับ ค่าความแข็ง.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตำแหน่งศูนย์กลางของพีคจี (G-Position) กับ ค่าความแข็ง.....	80
3.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของพีคจี (IG-Intensity) กับ ค่าความแข็ง.....	80
3.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของพีคดี (ID-Intensity) กับ ค่าความแข็ง (Hardness).....	81
3.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน ID ต่อ IG กับ ค่าความแข็ง (Hardness).....	81
3.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตำแหน่งศูนย์กลางของพีคดี (D-Position) กับ ค่าความแข็ง.....	82
3.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน AD ต่อ AG กับ ค่าความแข็ง (Hardness).....	82
3.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อน ในช่วงความยาวคลื่น 400นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร.....	83
3.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อน ในช่วงความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 1000 นาโนเมตร .....	84
3.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อน ในช่วงความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 1000 นาโนเมตร ต่อ อัตราส่วน ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร.....	84
4.1 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชัน และ การคำนวณจากค่าตำแหน่ง ศูนย์กลางของพีคจี.....	86
4.2 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชัน และ การคำนวณจากค่าความ ชันของเส้นฐาน.....	87
4.3 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชัน และ การคำนวณจากค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร...87	87
4.4 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชัน และ การคำนวณจากค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 800นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 1000 นาโนเมตร..88	88
4.5 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชัน และ การคำนวณจากอัตราส่วน ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 1000 นาโนเมตร ต่อ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

$P_{\max}$

$A_r$

$H$

$E_r$

$E$

$v$

$i$

$s$

$S$

$A$

$h_c$

$h_{\text{end}}$

$Ac$

$P$

$H$

$\infty$

$m$

$R$

$P$

$\alpha$

$E$

$v_m$

$E_0$

$v_0$

$v_m$

$\alpha_m$

$t$

ความหมาย

แรงกดสูงสุด

รอยของการกด

ค่าความแข็ง

โมดูลัสที่ถูกลดให้ลดลง

ค่าคงที่ยังโมดูลัส

สัดส่วนพอสซัน

tip หรือตัวกด

ชิ้นงานตัวอย่าง

ความรุนแรงของการกด

พื้นที่สัมผัส

ระยะลึกสัมผัส

จุดที่มีความรุนแรงสูงสุด

area function

น้ำหนักที่ให้กับ tip

ระยะยึดหยุ่นของ tip

เป็นค่าคงที่ Oliver

เป็นค่าคงที่ Pharr

รัศมีของ tip

โมเมนต์สนามเหนี่ยวนำ

polarizability

สนามไฟฟ้า

ความถี่ของการสั่น

สนามไฟฟ้าของลำแสงตก

กระทบ

ความถี่ของแสงตกกระทบ

ความถี่ของโฟตอน

การโพลาไรส์ซึ่งเป็นฟังก์ชัน

ของการสั่น

เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

### สัญลักษณ์

N

K

E<sub>g</sub>

$\sigma$

C

v

E

H

E<sub>g</sub>

t

R<sub>cal</sub>

x

F

$\Psi$

$\Delta$

ความหมาย

ดัชนีการหักเหของแสง

ค่าการดูดกลืนแสง

Energy Band gap

ค่าความขรุขระ

อัตราเร็วแสงในสุญญากาศ

อัตราเร็วแสงในตัวกลาง

ค่าพลังงานของโฟตอน

ค่าคงที่ของพลังค์

ค่าพลังงานในแต่ละช่วง

ความหนาของฟิล์ม

แถบสี่เหลี่ยมสะท้อน

การเคลื่อนที่ของกานกระเดื่อง

แรงที่ใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่

Amplitude ratio

Phase difference



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์ทางเทคนิค

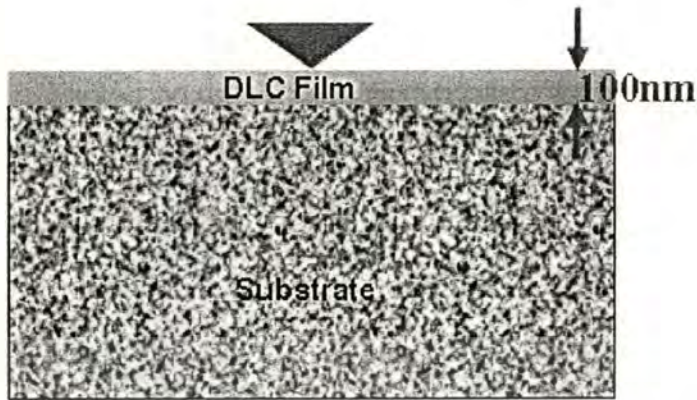
คาร์บอนคล้ายเพชร	Diamond Like Carbon
ฐานรองการลงจอด	Landing Pad
การวัดค่าความแข็ง	Nanoindentation
หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	Slider
การสะท้อนของแสง	Light Reflection
วิธีการเคลือบผิววัสดุแบบยิงลำไอออน โดยตรงสู่ชิ้นงาน	Ion Beam Deposition Technology
ห้องสุญญากาศ	Chamber
อุปกรณ์เร่งการเกิดพลาสมา	Plasma Bridge Neutralizer (PBN)
ตะแกรงสำหรับควบคุมทิศทางของไอออน	Grid
สนามแม่เหล็กความเข้มสูง	Magnetron
การกัดเซาะ	Etching
คาร์บอนอะตอมแบบมีโครงสร้างสมมาตรขนาดเล็ก	Microcrystalline carbon
คาร์บอนอะตอมแบบมีโครงสร้างไม่เป็นรูปแบบ	Amorphous Carbon
ความลึกที่เกิดจากการกัดเซาะ	Depth – sensing
ความผิดพลาด	Correction factor
การกระเจิงของแสงขาว	Rayleigh scattering
สเปกตรัมในย่านอินฟราเรด	Infrared Spectroscopy
ลายนิ้วมือ	Finger print
เครื่องมือวัดค่าระดับการสะท้อนแสง	Reflextrometer
ชุดรับสัญญาณ	Detector
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	Scanning Electron Microscopy (SEM)
การทำปฏิกิริยาต่อกัน	Interact
กล้องวัดการทะลุผ่านของอิเล็กตรอน	Transmission Electron Microscopy
เครื่องวัดการพื้นผิวชิ้นงาน	Atomic Force Microscope (AFM)
วัดการหักเหของคานกระเดื่อง	Cantilever
เปียโซอิเล็กทริกเซรามิก	Piezoelectric ceramics
สัมประสิทธิ์การขยาย	Expansion coefficient
การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแสง	Ellipsometry
ความไว	Sensitivity
การเกิดโพลาไรซ์ของแสง	Polarization

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์ทางเทคนิค(ต่อ)

อยู่ในเฟสเดียวกัน	In-phase
แบบวงรี	Elliptical
ความเร็วเฟส	Phase velocity
ความเข้มแสง	Intensity
วัสดุที่ดูดกลืนแสง	Absorbing materials
ค่าคงที่ทางแสง	Optical constants
การสั่นของ โมเลกุล	Molecular vibration
ภาวะที่ถูกกระตุ้น	Elevated state
รอยต่อของพื้นผิว	Interface
อุปกรณ์วัดการเกิดโพลาไรซ์ชันของแสง	Rotating analyzer (RAE)
การรวมเฟส	Phase modulation (PME)
คำนวณเบื้องต้น	Preliminary calculation
ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาด	The mean squared error (MSE)
ฟิล์มชนิด โปร่งใสบนซิลิกอน	Transparent film on silicon
ความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงาน	Roughness
ค่าความแข็ง	Hardness
ยกหัวขึ้นจากชิ้นงาน	Unload

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) ตัวอย่างการเตรียมงานสำหรับวัดค่าความแข็งด้วยวิธีนาโนอินเด้นต์

(ข) ตัวอย่างพื้นผิวของ DLC ฟิล์์มหลังจากผ่านการวัดค่าความแข็งด้วยวิธีนาโนอินเด้นต์

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาถึงเทคโนโลยีการหาค่าความแข็งของ DLC ฟิล์์มด้วยวิธีการทางแสง ที่ใช้เวลาในการวัดที่สั้นกว่าวิธีนาโนอินเด้นต์ ทำให้สามารถวัดค่าความแข็งของชิ้นงานได้ในปริมาณที่มากขึ้น
2. ศึกษาถึงเทคโนโลยีการหาค่าความแข็งของ DLC ฟิล์์มด้วยวิธีการทางแสง ที่ปลอดภัยและไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายเหมือนการวัดค่าความแข็งด้วยวิธีนาโนอินเด้นต์
3. ศึกษาถึงเทคโนโลยีการหาค่าความแข็งของ DLC ฟิล์์มด้วยวิธีการทางแสงที่สามารถวัดบนชิ้นงานที่มีขนาดเล็กได้ทำให้สามารถทำการวัดค่าความแข็งได้บนงานที่ได้จากกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Slider) ได้โดยไม่ต้องเตรียมงาน เป็นพิเศษทำให้ลดเวลาในการวัด และลดขั้นตอนในการวัดลงกว่าวิธีนาโนอินเด้นเตชั่น รวมทั้งยังลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยชิ้นนี้มีขอบเขตในการศึกษา ครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการสร้าง DLC ฟิล์ม การวัดค่าความแข็งของ DLC ฟิล์ม โดยใช้วิธีนาโนอินเด้นเตชั่น วิธีการวัดการกระเจิงของแสงแบบรามาน (Raman Scattering) และวิธีการวัดระดับการสะท้อนของแสง (Light Reflection) รวมถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดค่าความแข็งด้วยวิธีต่างๆ ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

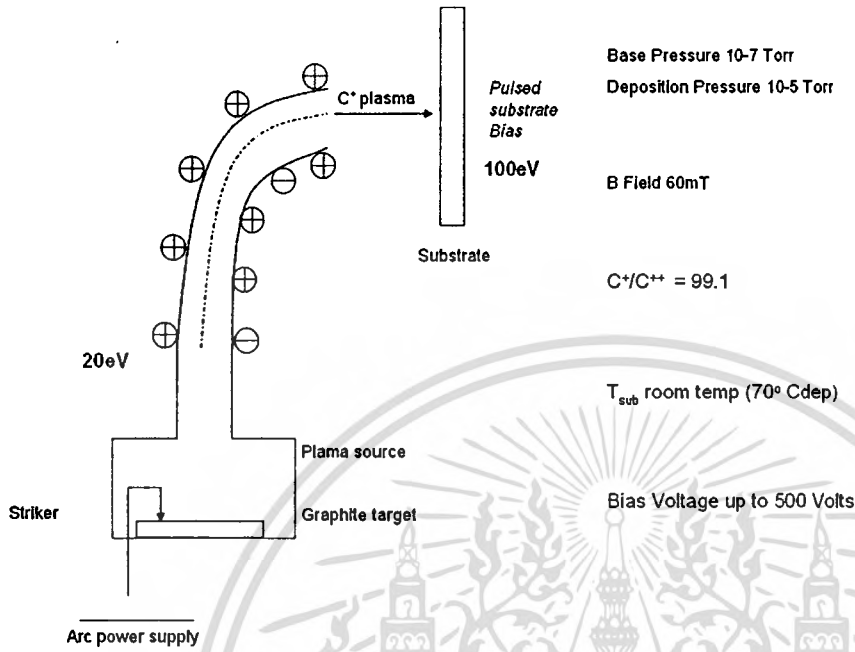
#### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของ DLC

##### 2.1.1 เทคโนโลยีต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์ DLC

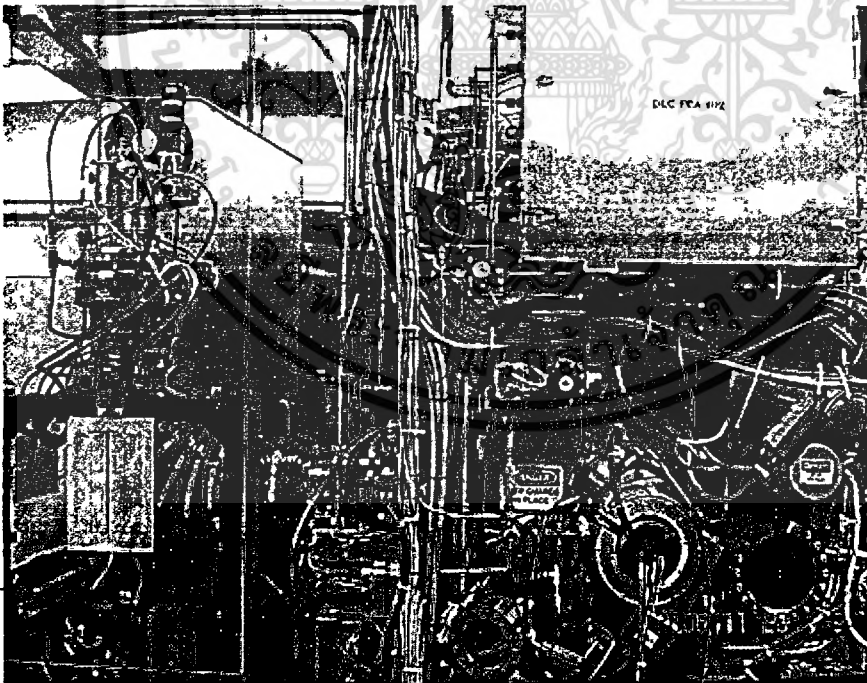
###### 2.1.1.1 Arc-Evaporation Deposition Filtered Cathodic Vacuum Arc Technology

วิธีการเคลือบผิววัสดุอุปกรณ์แบบ arc-evaporation deposition เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย หากแต่ในการเคลือบผิวนั้น มักมีอนุภาคที่ไม่ต้องการกระจายตัวปะปนอยู่ด้วย ทำให้ประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นบริษัท Nanofilm Technology International Co.,Ltd จึงได้พัฒนากรรมวิธีการเคลือบอนุภาคสารแบบใหม่ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่า โดยเรียกว่าวิธีการนี้ว่า Filtered Cathodic Vacuum Arc (FCVA) การทำงานของวิธีการดังกล่าวอนุ Tetrahedral Amorphous Carbon (ta-C), โลหะออกไซด์ และอื่นๆ จะเคลือบผิวได้อย่างดีที่สุดตามที่ต้องการ โดยในระหว่างที่อนุเหล่านี้เรียงตัวลงเคลือบผิว ขบวนการ cathodic vacuum arc จะทำให้ลำแสงพลาสมาซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มอนุภาคเล็กๆ และอะตอมที่เป็นกลาง แพร่กระจายออกจากจุด cathodic arc spot และในระหว่างนั้นอนุภาคและอะตอมต่างๆ ที่ไม่ต้องการ จะถูกกรองออกสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหลือเพียงไอออนที่มีพลังงานอยู่ในช่วงที่ต้องการเท่านั้นที่จะตกลงเคลือบผิวได้ วิธีการดังกล่าวทำให้ได้แผ่นฟิล์มเคลือบผิวที่มีความแข็งแรง แน่นและสะอาด ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดี โดยแผ่นฟิล์มจะมีคุณสมบัติตามที่ต้องการไม่ว่าจะเป็น การยึดติดกับพื้นผิว , ความใส , คุณสมบัติทางเคมี , คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ยิ่งไปกว่านั้นระหว่างที่มีการเคลือบ พื้นผิวสัมผัสจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า  $70^{\circ}\text{C}$  ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้การเคลือบผิวพลาสติกทำได้ดียิ่งขึ้น ต่างจากเทคโนโลยีการเคลือบผิวที่เคยมีมา เช่น การเคลือบละอองไอโดยทางเคมีหรือทางกายภาพ (วิธีการ FCVA เป็นการเคลือบด้วยไอออนบริสุทธิ์ 100%) ซึ่งเป็นไอออนที่มีช่วงพลังงานตามที่ต้องการ และด้วยเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ทำให้สามารถผลิตฟิล์มเคลือบที่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆ อย่างเช่น ta-C และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ประสิทธิภาพสูงได้

FILTERED CATHODIC VACUUM ARC



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ FCVA



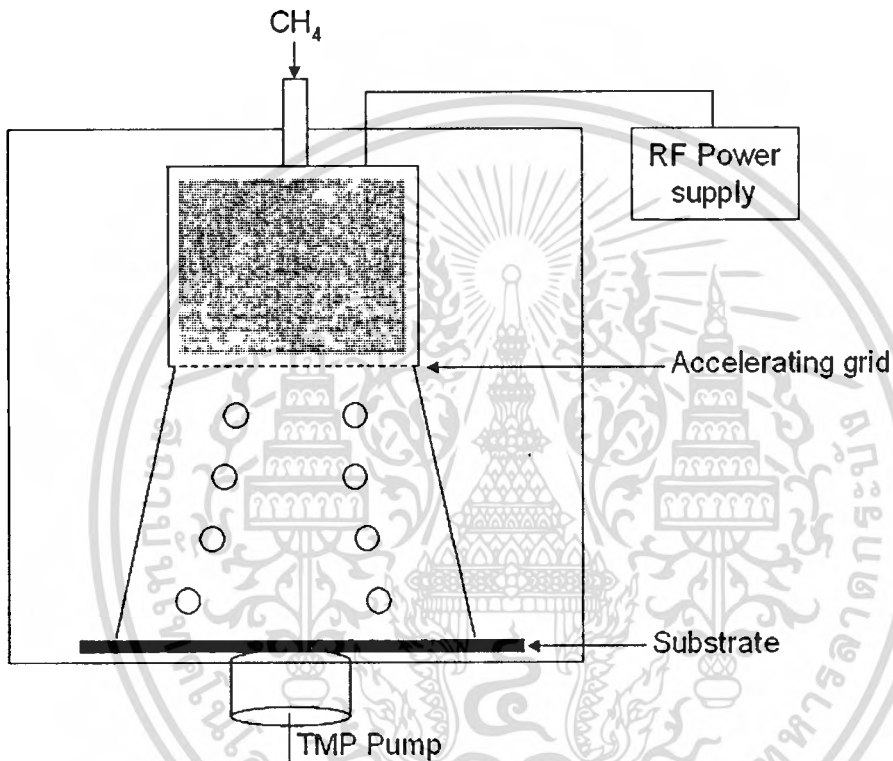
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของเครื่อง FCVA ของบริษัท Veeco

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.2 Ion Beam Deposition Technology

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Ion beam จะมีกระบวนการทำงานประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

Ion Beam Deposition (IBD) system.



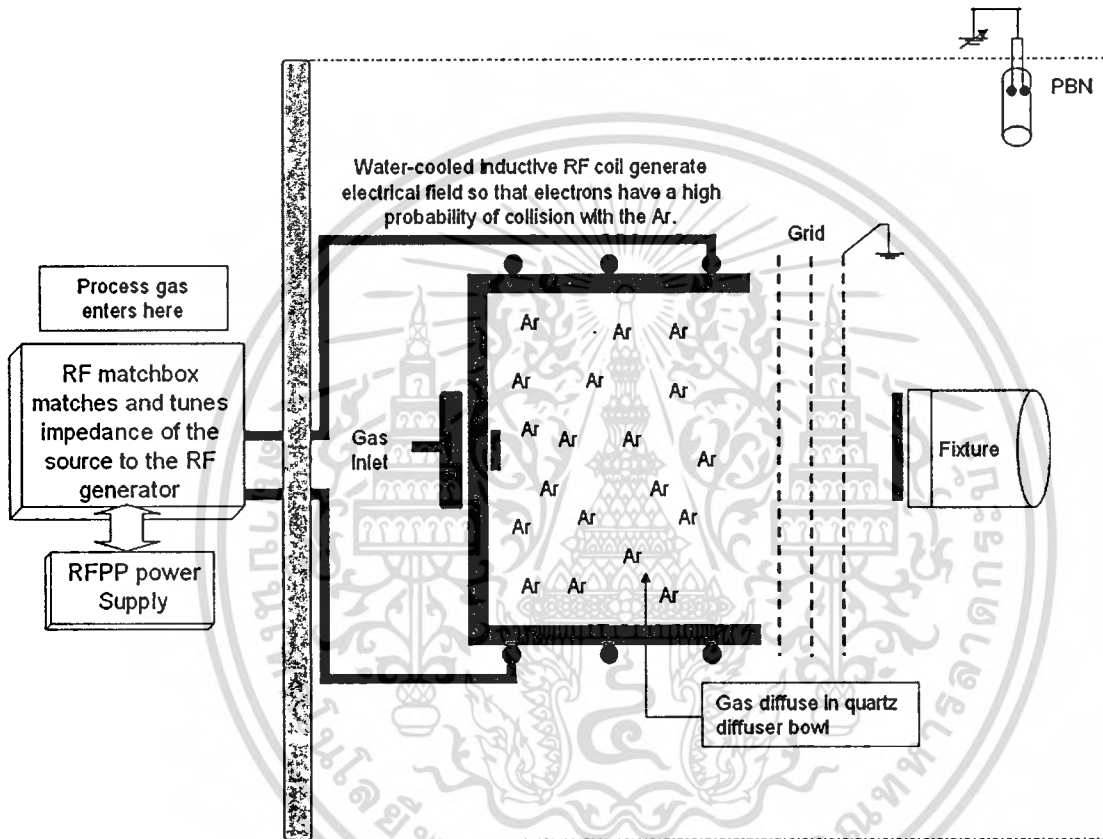
Deposition	Value
Base Pressure	$2 \times 10^{-7}$ mTorr
Deposition ion energy	50-400 eV
Deposition ion current	200 mA
Substrate Temperature	Room temperature

รูปที่ 2.3 โดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ Ion Beam CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 การทำความสะอาดพื้นผิวของฐานรองมีขั้นตอนการทำงาน 3 ขั้นตอนดังนี้

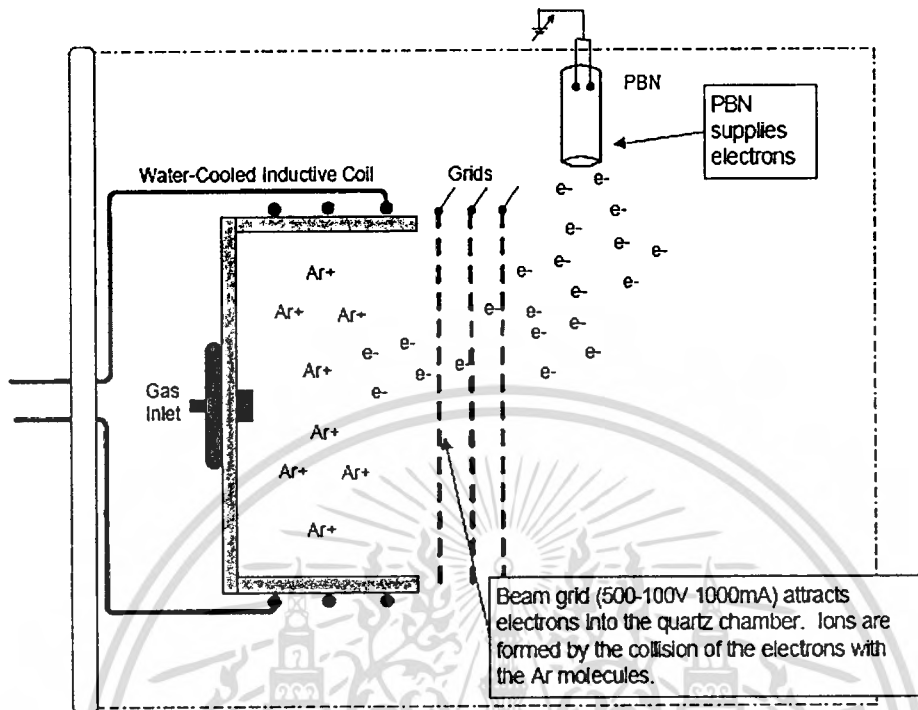
1.1 ขั้นตอนแรกปั๊มสุญญากาศจะดูดอากาศภายใน chamber ซึ่งอากาศภายใน chamber จะมีค่าความดัน  $3 \times 10^{-4}$  torr ให้ค่าความดันมีค่าเท่ากับ  $7 \times 10^{-4}$  torr ขั้นตอนที่สองก๊าซอาร์กอนจะไหลเข้าสู่ chamber ด้วยอัตราการความเร็ว 25 sccm.



รูปที่ 2.4 ไลอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองขั้นตอนที่ 1

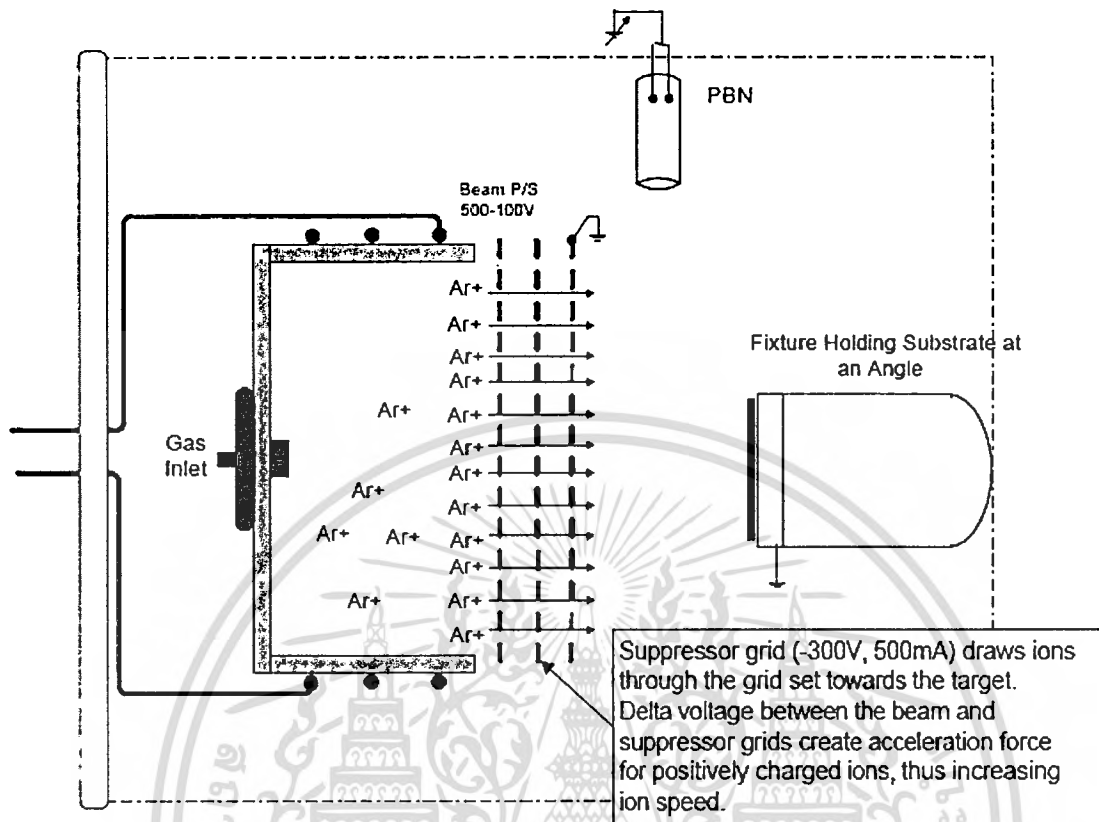
1.2 ก๊าซอาร์กอนจะแตกตัวเป็น  $Ar^+$  โดยมี Plasma Bridge Neutralizer (PBN) เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และมีค่า RF Power 300 Watts.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBVCD ของการทำทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองขั้นตอนที่ 2

1.3 ขั้นตอนที่ 3 นี้ เป็นขั้นตอนการทำทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองเป็นเวลา 10 นาที โดยจะทำการเร่งให้ อาร์กอนไอออนมีความเร็วและพลังงานมากขึ้น โดย อาร์กอน ไอออนจะหลุดเข้ามาในรูเล็กๆที่เจาะขึ้นบนแผ่นโลหะแผ่นแรก (Beam Grid) และจะถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นโดยอาศัยการเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง ตะแกรงโลหะแผ่นที่ 2 (Suppressor grid) และตะแกรงโลหะแผ่นที่ 3 (Ground Grid)



รูปที่ 2.6 โดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ IBCVD ของการทำทำความสะอาดพื้นผิวฐานรองชั้นตอนที่ 3

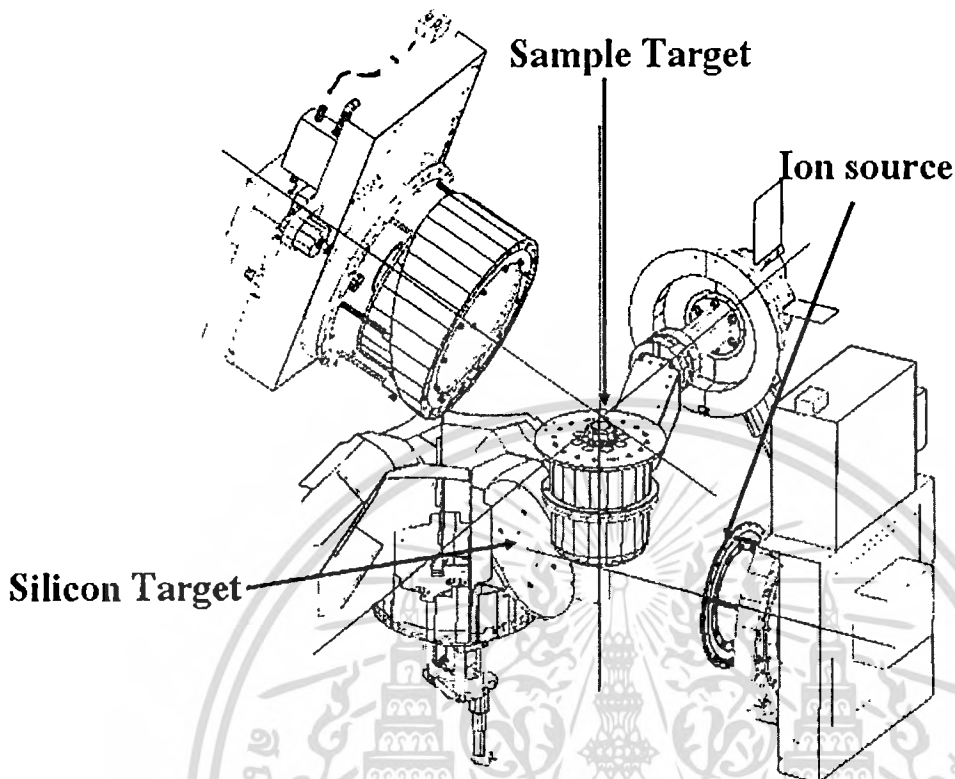
### ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอน

ในขั้นตอนนี้จะทำการปล่อยก๊าซ อาร์กอนเข้าสู่ระบบ โดยมีเงื่อนไขในการสร้างดังนี้

- 1 ก๊าซอาร์กอนจะไหลเข้าสู่ Chamber ด้วยอัตราการความเร็ว 25 sccm
- 2 Discharge voltage 40 volts

โดยอาร์กอนไอออนที่ได้จะถูกยิงไปยังแท่งซิลิกอนบริสุทธิ์และทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย ของซิลิกอนไปจับตัวกันเป็นชั้นฟิล์มอยู่ที่ชิ้นงาน โดยแท่งซิลิกอนบริสุทธิ์นี้จะอยู่ในตำแหน่งตรงกันข้ามกับชิ้นงาน และในกระบวนการนี้จะใช้เวลาในการสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับความต้องการซิลิกอน ว่าต้องการฟิล์มที่มีความหนาเท่าใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างภายในของเครื่อง IBCVD

### ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร(DLC)

ในขั้นตอนนี้จะทำการปล่อยก๊าซ  $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_2$  เข้าสู่ระบบและทำการเพิ่มพลังงานให้กับก๊าซเหล่านั้นผ่านตะแกรงโลหะ และพุ่งตรงไปเกาะตัวเป็นชั้นฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่ตำแหน่งชิ้นงาน และในกระบวนการนี้จะทำให้เกิดฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรหนา ความแข็ง และความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้างดังนี้

- 1.อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซ  $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_2$
- 2.อุณหภูมิของฐานรอง
- 3.อัตราการไหลของก๊าซ  $\text{CH}_4$  sccm/min และ  $\text{C}_2\text{H}_2$  sccm/min
- 4.ระยะระหว่างปืนกับฐานรอง
- 5.RF Power (Watts)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

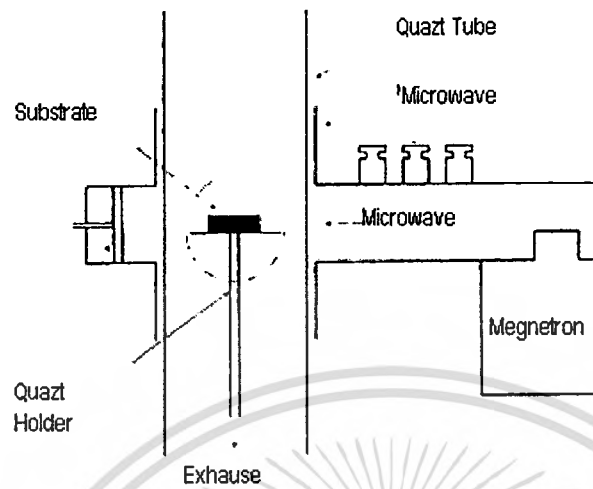
#### ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการทำความสะอาด Chamber

ในกระบวนการนี้จะทำความสะอาดและกำจัดสิ่งสกปรกที่อยู่ใน Chamber ให้มีปริมาณน้อยลง โดยจะทำการปล่อยก๊าซออกซิเจนให้ไหลเข้าสู่ chamber และทำการเพิ่มพลังงานให้ก๊าซออกซิเจนเปลี่ยนสภาพเป็นออกซิเจนไอออน หลังจากนั้นก็จะทำการเร่งความเร็วของออกซิเจนไอออนให้มากขึ้น และปล่อยออกไปทำความสะอาดภายใน chamber

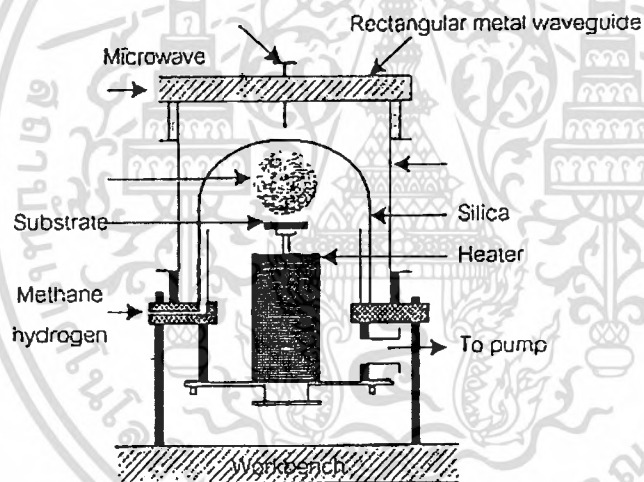
##### 2.1.1.3 Microwave plasma enhanced CVD

ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรหลายรูป บนฐานรองต่างชนิดกัน โดยเริ่มจากกลุ่มวิจัยชาวญี่ปุ่นจาก NIRIM (National Institute for Research in Inorganic Material) โดยความถี่ไมโครเวฟทำการสั่นอิเล็กตรอนทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนกับไอออนที่เย็น โมเลกุลอะตอมคู่จึงแยกออกเป็นอะตอมได้ และการกระตุ้นไมโครเวฟพลาสมาของโมเลกุลไฮโดรเจนจะทำให้เกิดภาวะสมดุลยิ่งยวดของความเข้มข้นของไฮโดรเจน

ชุดอุปกรณ์ Microwave plasma enhanced CVD แสดงดังรูปที่ 2.8 (a) เป็น Tube-style ประกอบด้วย Magnetron ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ตรงเข้าสู่ Applicator ภายใน Rectangular wave guide ซึ่งเป็นตัวกำหนดขอบเขตของคลื่นไมโครเวฟระหว่างตัวกำเนิดและแชมเบอร์ซึ่งใช้ทำปฏิกิริยา โดย Chamber นี้จะทำมาจากท่อซิลิกาซึ่งสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส และไม่ดูดกลืนรังสีไมโครเวฟที่ผนังของท่อซิลิกา จึงทำให้เกิดการปนเปื้อนซิลิกอนในฟิล์มเพชรขึ้น ตำแหน่งทิศทางการเคลื่อนที่ของไมโครเวฟจะพุ่งผ่าน Three stub tuners ที่บริเวณ Waveguide ฐานรองจะมีอุณหภูมิ 400-1,000 องศาเซลเซียส ใช้ก๊าซผสม 0.1-5% มีเทนในไฮโดรเจน อัตราการไหลรวมอยู่ระหว่าง 50-500 sccm ความดันรวม 1-400 ทอร์ แต่เนื่องจาก Tube-style ดังรูปที่ 2.8 (a) มีข้อเสียที่ขนาดของฐานรองเล็ก ดังนั้นในปี 1986 Applied Science and Technology, Inc. [1] จึงพัฒนารูปแบบทางวิศวกรรมของระบบนี้เป็นดังรูปที่ 2.8 (b) ฐานรองจะมีอุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส เกิดความร้อนโดยการกระตุ้น (Coupling) ด้วยไมโครเวฟและการระเบิดของพลาสมา สามารถสร้างไมโครเวฟพลาสมาได้ขนาด 10 เซนติเมตร ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง พลาสมาจะมีลักษณะกลมเป็นลูกบอล ซึ่งจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นมีผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของฟิล์ม



(a)



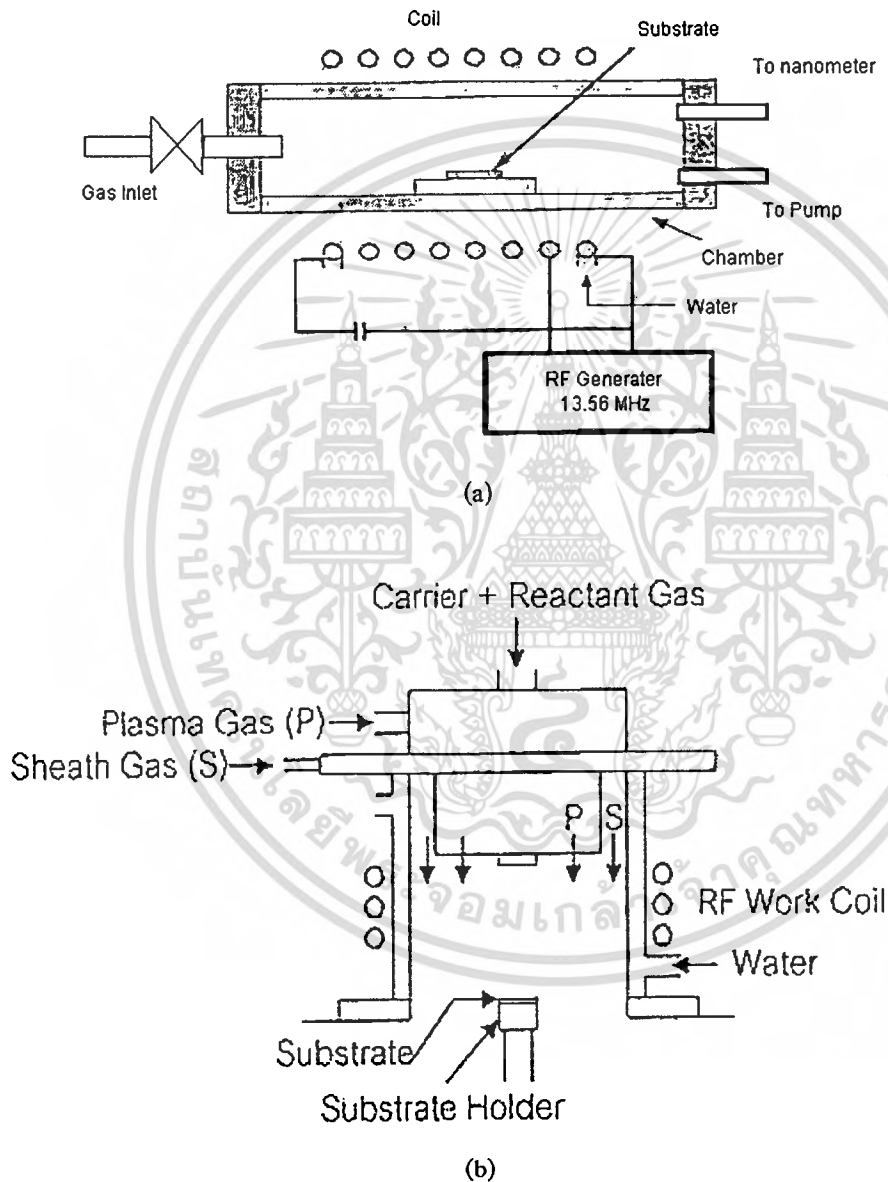
(b)

รูปที่ 2.8 ระบบ Microwave plasma CVD method (a) Tube-style (b) Bell jar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.1.4 RF plasma enhanced CVD

โดยทั่วไปความถี่วิทยุที่สามารถสร้างพลาสมาในอิเล็กทรอนิกส์มี 2 ลักษณะที่สามารถคัปเปิลได้ คือ การเพทแบบขนานและโดยการเหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.9 RF (a) และ (b) plasma enhanced CVD ทำงานด้วยความถี่ 13.58 MHz มีข้อเสียในเรื่องความไม่สม่ำเสมอของฟิล์มในแนวรัศมี



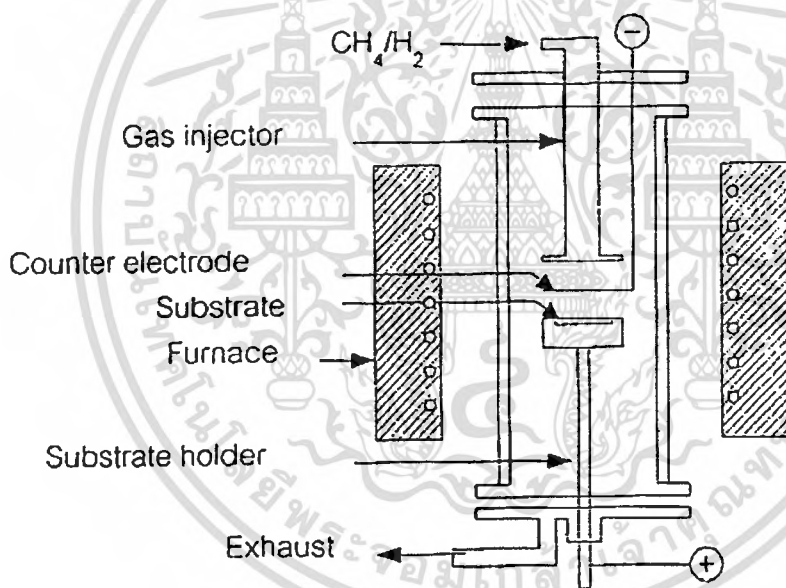
รูปที่ 2.9 ระบบ RF plasma CVD method (a) Inductive RF plasma CVD (b) RF thermal plasma CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเนื่องจากความหนาแน่นของพลาสมาจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่แกนของ Chamber ความหนาแน่นของพลาสมาใกล้ผนังของฐานรองมีค่าสูง เป็นผลให้เกิดการกัด (Etching) ของท่อควอทซ์ และเกิดการส่งผ่านไอไปสู่ฟิล์มเพชร มีอัตราการเกิด  $0.5-3.0 \mu\text{m}/\text{h}$  Matsumoto [3] ได้รายงานว่าสามารถสร้างฟิล์มเพชรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ที่ความดันบรรยากาศโดยใช้กำลังพลาสมา 20-75 kW ใช้อาร์กอนแก๊สเป็นตัวพา อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 700-1,200 องศาเซลเซียส ได้อัตราการเกิดสูงถึง  $120 \mu\text{m}/\text{h}$

#### 2.1.1.5 DC plasma enhanced CVD

ใน DC plasma CVD จะจ่ายแรงดันไฟตรงลบหรือบวกให้กับฐานรองเพื่อให้เกิดเป็นอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบ DC plasma CVD method [3]

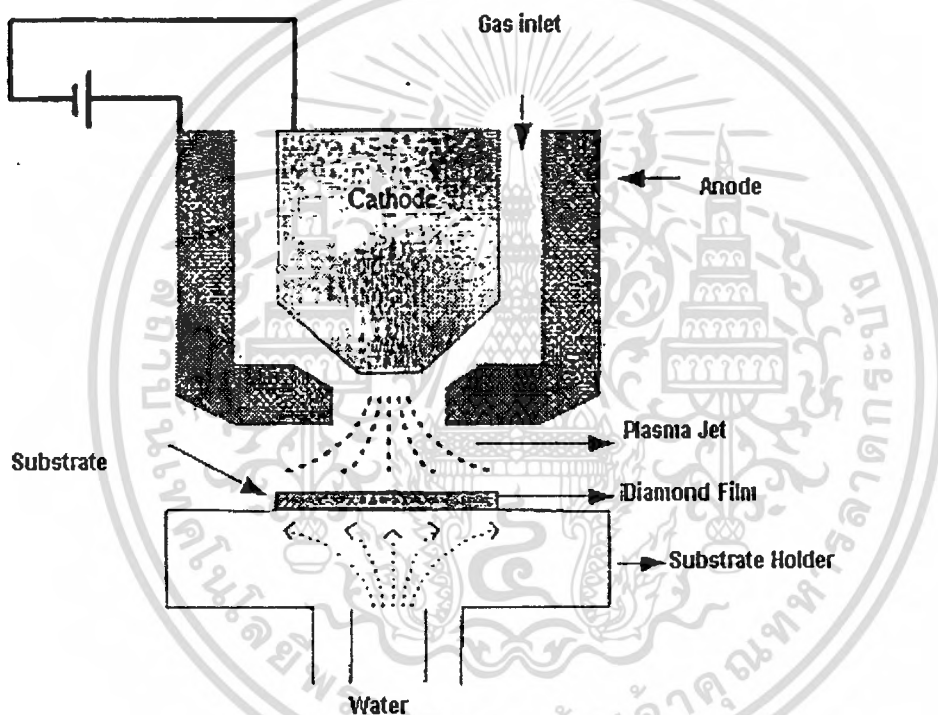
มีรายงานการวิจัย DC plasma CVD ซึ่งให้พลาสมาทางความร้อนพลังงานสูงโดย Singh และคณะได้พัฒนาอุปกรณ์ Hollow cathode PECVD ทำให้เกิดพลาสมาขึ้นจากการไบอัสลบและให้ฐานรองไบอัสบวก สามารถปลูกฟิล์มเพชรได้ที่อัตราเร็วกว่าหรือเท่ากับ  $20 \mu\text{m}/\text{h}$  Suzuki และคณะ ใช้แคโทดโมลิบดีนัมเป็นเพลาทในการสร้าง DC arc plasma ใช้ฐานรองเป็นแอโนด พลาสมาอยู่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดัน 27 kPa (200 ทอร์) กำลังงาน 2.4-4.0 kW/cm<sup>2</sup> Akatsuka และสร้าง DC Arc ให้กำลัง 560 W โดยใช้ก๊าซผสมเป็น Ar+H<sup>2</sup>+เอทานอล ไหลผ่าน Arc ไปยังฐานรองที่ความดันรวม 27-41 kPa (200-300 ทอร์) อ้างว่าได้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรเป็น 200-250  $\mu\text{m} / \text{h}$

#### 2.1.1.6 Plasma torch activation

การใช้ Torch จะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นกำลังกระตุ้นก๊าซเฟสในระบบการปลูกผลึกเพชรได้อย่างมีประสิทธิภาพ อัตราการโคของผลึกมีค่าสูงจึงสามารถใช้เป็นเทคโนโลยีการสร้างฟิล์มหนาทั้งที่มีอัตราการใช้ก๊าซสูง และ ให้คุณสมบัติใกล้เคียงเพชรธรรมชาติ



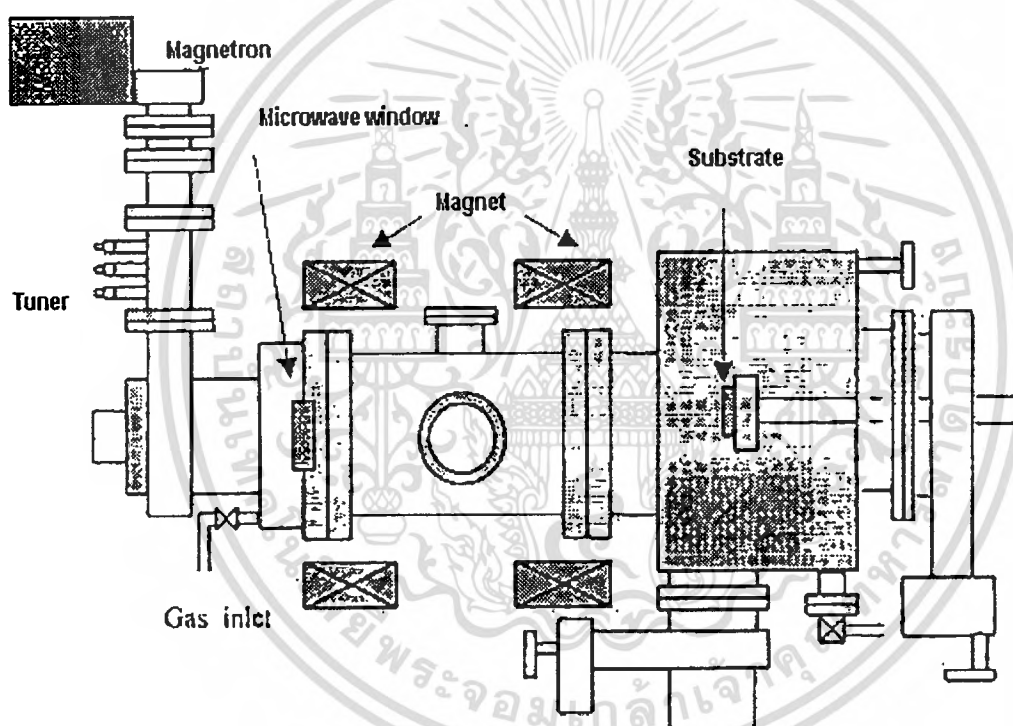
รูปที่ 2.11 ระบบ DC plasma jet CVD method [3]

Kurihara และคณะผู้ทำงานวิจัยร่วมที่ Fujitsu laboratories [3] ได้พัฒนา DC plasma jet process เรียก DIA-JET process โดยการพ่นก๊าซผสมมีเทนและไฮโดรเจนไปกับก๊าซพลาสมาอาร์กอนหรือฮีเลียม (ภายใต้ความดัน 4.1-41 kPa (30-300 ทอร์) Dc arc ได้รับแรงดัน 80-150 V และกระแส 10-50 A (ช่วง 0.8-7.5 kW) และใช้ฐานรองอุณหภูมิ 520-1,220 องศาเซลเซียส จะได้อัตราการโคของผลึกเป็น 80  $\mu\text{m}/\text{h}$  มีค่าความแข็งของ Vicker เป็น 10,000 kg/mm<sup>2</sup> ความนำความร้อน 8 W/cm<sup>2</sup> C และสภาพความต้านทาน 10<sup>4</sup> ถึง 10<sup>5</sup>  $\Omega\text{cm}$  สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ถึงขนาด 10 mm X 10 mm X 2mm และเพชรที่ได้มีคุณภาพสูงสามารถใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.7 Electron cyclotron resonance

Electron cyclotron resonance เหมาะกับการใช้งานที่ระบบพลาสมาเอชซิงค์ความดันต่ำ แต่ได้พื้นที่กว้างและความหนาแน่นพลาสมาสูง โดยเลือกความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อความถี่ของ Electron gyration ที่เท่ากับความถี่ของไมโครเวฟ เมื่อความถี่เหล่านี้เหมาะสมพอดีกัน ความหนาแน่นพลาสมาจะเพิ่มขึ้นโดยการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นของพลาสมาจากพลังงานไมโครเวฟ พบว่าเงื่อนไขการปลูกเพชรวิธีนี้จะใช้ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz สนามแม่เหล็ก 875 Gauss ความดัน  $\geq 0.1$  ทอร์ พบว่ามีความหนาแน่นของจุดเสียในผลึกน้อย ปัจจุบันเทคนิคนี้สามารถสร้างพลาสมาเหนือพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ได้ดังรูปที่ 2.12



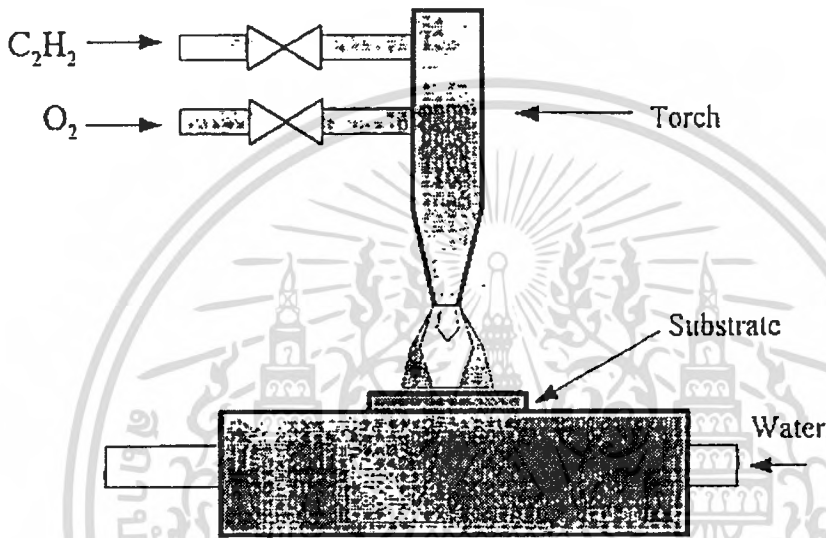
รูปที่ 2.12 ระบบ Electron cyclotron resonance microwave plasma CVD method [3]

### 2.1.18 Combustion activation CVD method [3]

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 2.13 ประกอบด้วยหัวเชื่อมแหล่งจ่ายก๊าซออกซิเจนและไฮโดรคาร์บอนเป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือ ทำการเผาก๊าซออกซิเจนและไฮโดรคาร์บอนในอัตราส่วนประมาณ 0.7-0.95 จะปรากฏเปลวไฟเป็นสามเปลว ทำการปรับให้เปลวไฟชั้นกลางสัมผัสกับฐานรองซิลิกอน ควบคุมอุณหภูมิของฐานรองในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้จะตกลงบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพที่ดี อัตราการเกิดของฟิล์มเพชรสูงสุดประมาณ 200  $\mu\text{m/h}$  และอัตราเฉลี่ย 30-50  $\mu\text{m/h}$  สามารถสังเคราะห์ในอากาศได้ ไม่ต้องใช้ Chamber และปั๊มสุญญากาศ ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าขณะสังเคราะห์ สามารถสร้างบนฐานรองที่เป็นส่วนโค้งได้ แต่ผลึกที่ได้จะมีข้อบกพร่องสูง



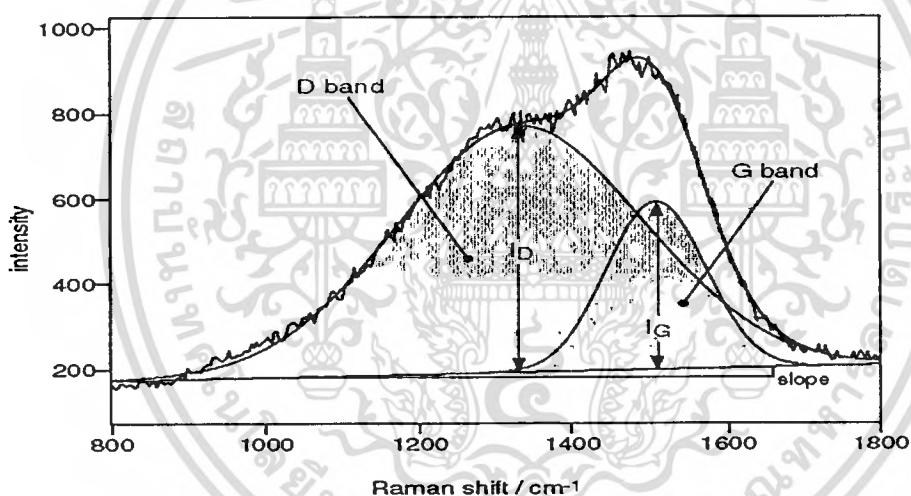
รูปที่ 2.13 ระบบ Combustion activation method [3]

จากที่กล่าวพบว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีที่ใช้ความดัน และ อุณหภูมิสูงเท่านั้นที่สามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในระดับเพชรพลอย ส่วนการสังเคราะห์ที่ความดันที่ความดันต่ำนั้นนิยมสังเคราะห์เพื่อให้ได้เป็นฟิล์มเพชรเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยไม่มีความสนใจทำการศึกษาถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของก้อนเนื้อผลึกก่อนเชื่อมต่อเป็นฟิล์ม ซึ่งแน่นอนต้องเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้

## 2.2 ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC), เพชร และรูปร่างของคาร์บอน

### 2.2.1 ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร “DLC” (Diamond Like Carbon Film)

เป็นอะมอร์ฟัสคาร์บอนฟิล์ม มีส่วนประกอบทั้งส่วนที่เป็น กราไฟต์และเพชร คาร์บอนอะตอมใน DLC ปกติแล้วสมมติว่าเกิดจากโครงสร้างการไฮบริไดเซชัน 2 แบบคือ  $sp^2$  และ  $sp^3$  รูปแบบการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบแรกเป็นคุณลักษณะของโครงสร้างของแกรไฟต์ ให้ Raman band มีพีคสูงสุดอยู่ที่ประมาณ  $1580\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งรู้จักกันในชื่อ G-Band และในส่วนของโครงสร้างเพชรจะมี Raman Band อยู่ที่ประมาณ  $1332\text{ cm}^{-1}$  ส่วนโครงสร้างของแกรไฟต์แบบผลึกหลายรูปจะมีพีคสูงสุดอยู่ที่ประมาณ  $1360\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นคิสออร์เดอร์จากโหมดการสั่นที่ขอบเขตเกรนแกรไฟต์ให้เข้าสู่โครงสร้าง  $sp^3$  จะถูกเรียกว่า D-Band



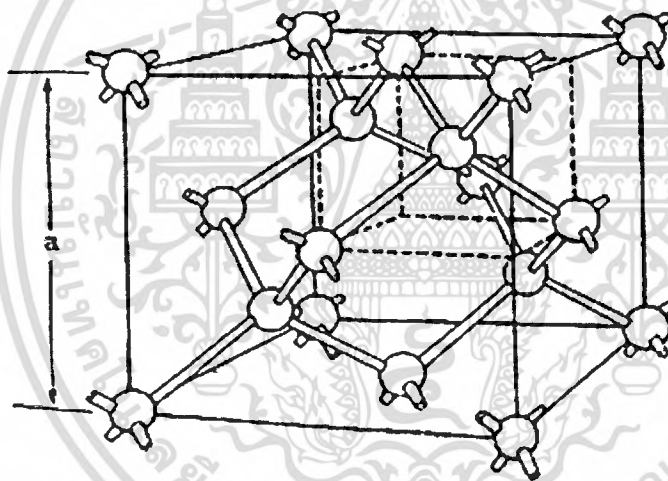
รูปที่ 2.14 Raman Spectrum ของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

### 2.2.2 เพชร (Diamond)

ในกรณีของเพชรธรรมชาติ อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า “Diamond Structure” ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 จากรูปพบว่า ภายในยูนิตเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง  $1/4$  เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของทุกยูนิตเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ  $sp^3$  ในที่สุดก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ว่าใน Diamond Structure นี้อะตอมของคาร์บอนจะจับกันเป็นลักษณะ 6 เหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเชื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกัน วงหกเหลี่ยมที่เกิดจากอะตอมจับตัวกันเป็นระนาบ{111} 2 อัน วางซ้อนทับกันในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน อะตอมของคาร์บอนที่เป็นลายขวางวางซ้อนกันอยู่เป็นรูปวงหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆของวงแหวนหกเหลี่ยม โดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกันในทิศทางของระนาบ{111} การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.567 Å และความยาวพันธะเท่ากับ 1.54Å ผลของการตรวจสอบด้วย Raman Spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First Order Peak) ของเพชรมีค่าอยู่ที่  $1332\text{cm}^{-1}$  และยอดลำดับที่สอง (Second Order Peak) จะมีค่าอยู่ที่  $2458\text{cm}^{-1}$  สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดลำดับที่หนึ่งอยู่ที่  $1284\text{cm}^{-1}$



รูปที่ 2.15 โครงสร้างผลึกของเพชร

กราไฟต์เป็นรูปแบบพื้นฐานของคาร์บอนที่พบได้มากที่สุด ลักษณะโครงสร้างภายในของมันได้แสดงดังรูปที่ 2.16 อะตอมของคาร์บอน จะจับตัวเป็นวงในลักษณะหกเหลี่ยมคล้ายกับเพชร แต่มีข้อแตกต่างที่เห็นได้อย่างเด่นชัดคือ อะตอมคาร์บอนจะไม่มีการจับตัวในลักษณะเหลี่ยมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันดังเช่นเกิดกับโครงสร้างของเพชร แต่จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบเสมอกัน และคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ Teigonally กับอะตอมทั้งสามตัวที่อยู่ใกล้เคียงด้วยพันธะแบบ  $SP^2$  การเรียงลำดับชั้นของวงแหวนหกเหลี่ยมกราไฟต์จะเป็นแบบ AB AB AB... ตามลำดับโดยมีระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมใกล้เคียงกันเท่ากับ 1.42 Å ในขณะที่ค่าคงที่แลตทิจคือ 6.707 Å สำหรับกราฟไฟต์ ผลการวัดด้วย Raman Spectroscopy จะแสดงตำแหน่งยอดลำดับที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ  $1580\text{ cm}^{-1}$  และยอดลำดับที่สองอยู่ที่  $3240\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 การจัดเรียงตัวของอะตอมของกราฟไฟต์

### 2.2.3 Microcrystalline carbon

โครงสร้างของผลึกเพชรจะมีเพียงพันธะของคาร์บอนอะตอมแบบ  $sp^3$  เท่านั้นแต่บางครั้งในการสังเคราะห์เพชรอาจจะมีพันธะแบบ  $sp^2$  ใกล้เคียงกับ Crystallite Grain Boundaries สารที่มีคุณลักษณะเช่นนี้จะถูกเรียกว่า “Microcrystalline Carbon” หรือ Microcrystalline graphite กราฟจาก Raman จะแสดงยอดคลื่นที่ตำแหน่ง  $1335\text{ cm}^{-1}$  เมื่อเนื้อสารมีขนาดของเกรนเล็กมากๆ และยอดคลื่นอันดับที่สองจะมีค่า  $2710\text{ cm}^{-1}$

### 2.2.4 Amorphous Carbon

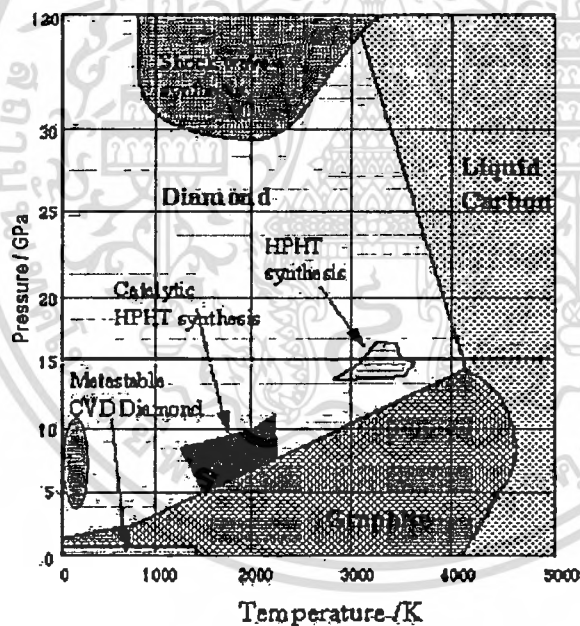
Amorphous Carbon ที่มีพันธะเป็นแบบ  $sp^3$  จะมียอดพีคของ Raman อยู่ระหว่างตำแหน่งยอดที่  $1345\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $1550\text{ cm}^{-1}$  โดยยอดคลื่นจะเปลี่ยนจาก  $1345\text{ cm}^{-1}$  เป็น  $1550\text{ cm}^{-1}$  เมื่อเนื้อสารเกิดการ Hydrogenated ซึ่งตำแหน่งยอดคลื่น  $1550\text{ cm}^{-1}$  สารนี้จะถูกเรียกว่าเป็น “Diamond Like

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Carbon” (DLC) ส่วน Amorphous Carbon ชนิดนี้ มีชื่อเรียกว่า “Small size cubic diamond” (ขนาดผลึก <math><0.1</math> ไมครอน)

### 2.3 สมดุลยภาพของคาร์บอน

พิจารณาที่รูป 2.17 ที่ความดันปกติจนถึงแนวโค้งปกติ จนถึงแนวเส้นโค้งของบริเวณ Liquid carbon (meit) ใกล้เคียงกับ 4000 องศาเซลเซียส คาร์บอนจะอยู่ในรูปของกราไฟต์ และสาเหตุที่เพชรสามารถพบที่พื้นผิวโลก เพราะว่าอุณหภูมิต่ำเกินไปที่จะทำลายพันธะ และเปลี่ยนรูปเป็นกราไฟต์ ถึงอย่างไร ก็ตามถ้าเพชรถูกทำให้ร้อนเกิน 1500 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศในภาวะที่เพชรจะเปลี่ยนเป็นกราไฟต์ ในส่วนบริเวณสีขาวคาร์บอนจะอยู่ในรูปเพชรทั้งนี้สามารถพบกราไฟต์ ในบริเวณสีขาวแสดงสถานะที่เกิดเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการของ General electric ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้โลหะหลอมละลายเช่น นิกเกิล มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกการสังเคราะห์เพชรชนิดนี้ว่า Catalytic HPHT synthesis

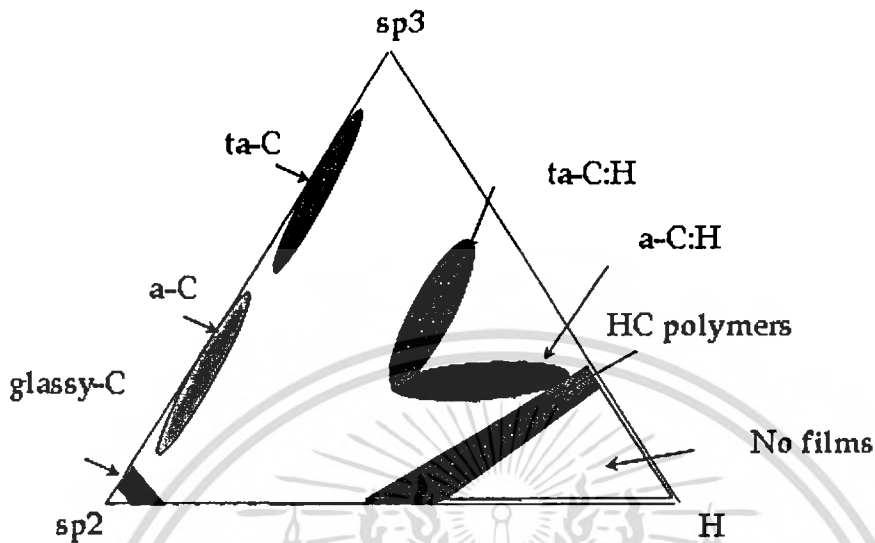


รูปที่ 2.17 สมดุลยภาพของคาร์บอน

ส่วนที่บริเวณอุณหภูมิและความดันสูง เช่นบริเวณสีส้ม เพชรสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีที่ปราศจากโลหะหลอม เป็นวิธีที่เสนอโดยนาย Bundy เรียกวิธีนี้ว่า HPHT synthesis โดยตรง ในส่วนสีเขียวอ่อนเป็นวิธีที่ใช้ความดันสูงแต่ใช้อุณหภูมิต่ำที่รู้จักกันในชื่อ shock wave technique

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Ternary phase diagram



รูปที่ 2.18 ชนิดของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

จากรูปที่ 2.18 แสดงชนิดของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้ ถ้าสังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรจากวิธี DC Magnetron จะได้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ชนิด amorphous carbon (a-C) และ amorphous Hydrogenated carbon (a-C:H), สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) จากวิธี Filtered Cathodic Arc จะได้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ชนิด tetrahedral amorphous carbon (ta-C) และในกรณีที่สังเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) จากวิธี Ion Assisted (PECVD, Ion Beam CVD) จะได้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ชนิด amorphous Hydrogenated carbon (aCH)

### 2.4 ทฤษฎีการวัดค่าความแข็งด้วยวิธี Nanoindentation

โดยทั่วไปแล้ววัดความแข็งแบบรอยกดในระดับไมโคร ใช้ tip เป็นตัวกด ซึ่ง tip ที่ใช้จะมี ความแข็งและเรขาคณิตตามสมบัติทางกลของมัน โดยส่วนมากจะทำมาจากเพชร tip จะถูกกดลงไบบนชิ้นงานตัวอย่างที่เราต้องการทราบค่าความแข็ง เมื่อเราเพิ่มแรงกดให้กับ tip มากขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่า ค่านึง ณ จุดนี้เราจะให้แรงกดมีค่าที่ชั่วขณะหนึ่ง หรือไม่ก็ยกแรงกดนั้นออก และเราจะวัดค่าความ แข็งของชิ้นงานตัวอย่างได้จากรอยกดที่หลงเหลืออยู่บนชิ้นงาน

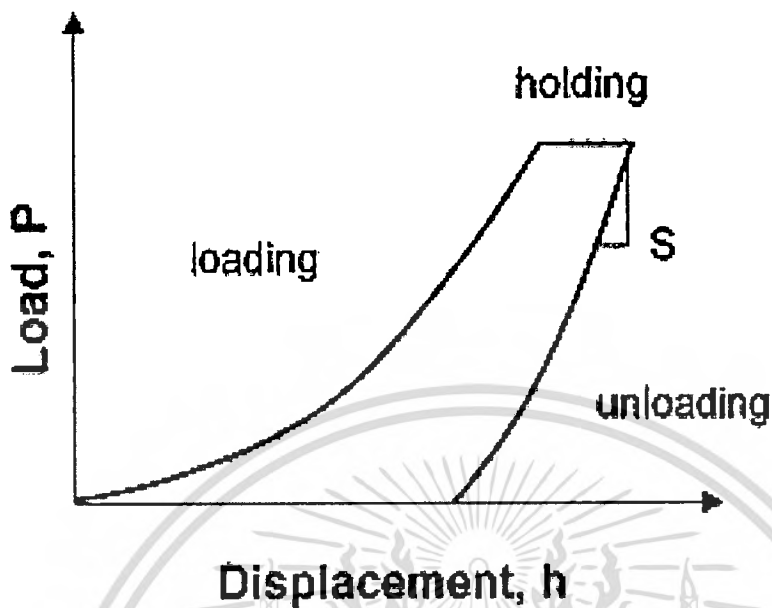
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $P_{\max}$  คือ แรงกดสูงสุดที่ให้กับ tip และ  $A_r$  คือ รอยของการกดที่หลงเหลืออยู่บนชิ้นงานตัวอย่าง

$$H = \frac{P_{\max}}{A_r} \quad (2.1)$$

เราวัดพื้นที่รอยกดได้จาก Light microscope ดังสมการข้างต้น ทำให้เราทราบว่า ถ้าเราให้แรงกดที่เท่ากันบนวัสดุที่อ่อนและแข็ง รอยกดบนวัสดุแข็งจะมีขนาดเล็กกว่ารอยกดบนวัสดุที่อ่อนกว่า

วิธีการนี้มีข้อจำกัดเนื่องจาก ขนาดและรูปร่างของ tip ที่มีขนาดใหญ่ทำให้ เราไม่สามารถระบุตำแหน่งที่ต้องการวัดได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นการวัดความแข็งแบบรอยกดในระดับนาโนจึงถูกพัฒนาขึ้น ด้วย tip ที่มีรูปร่างสมมาตรแน่นอน และมีความละเอียดสูงในการระบุตำแหน่งที่ต้องการวัด และนอกจากนั้น ยังสามารถบอกระยะเวลาการกดได้ ณ เวลาใดๆ ในขณะที่ tip กดลงไปบนชิ้นงานตัวอย่าง เมื่อเครื่องวัดความแข็งแบบรอยกดระดับนาโน สามารถเก็บสะสมระยะเวลาการกดได้อย่างต่อเนื่อง ณ เวลาใดๆ ในขณะที่ tip กำลังกดลงไปบนชิ้นงานตัวอย่าง ดังนั้น เราจะนำค่าเหล่านี้มาใช้เป็นบอกคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งในที่นี้ก็คือ ความแข็งของวัสดุ นั่นเอง ข้อดีของการใช้ depth – sensing คือ เราจะได้รับข้อมูลอื่นๆด้วยนอกเหนือจากความแข็งของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับ การเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ และขึ้นอยู่กับรายละเอียดของการวิเคราะห์ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างของ เส้นโค้งของระยะเวลาการกดที่น้ำหนักต่างๆ แบบ กึ่งอยู่กับที่ (Quasi-static load-displacement) แสดงดังรูปที่ 2.19 เมื่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น ตัวคจะจมลงไปบนเนื้อวัสดุเนื่องจากการเสีรูปร่างของวัสดุเชิง ยืดหยุ่น (elastic) และ เชิงพลาสติก (plastic) และเมื่อให้แรงกดมีค่าคงที่ ตัวคก็จะค่อยๆจมลงไปบนเนื้อวัสดุอย่างช้าๆ (creep) เนื่องจาก การเสีรูปร่างของวัสดุ เนื่องจากเวลา และเมื่อเรายกตัวคออกจากชิ้นงานตัวอย่าง วัสดุจะค่อยๆคืนสภาพเนื่องจากกระบวนการที่เรียกว่า ยืดหยุ่นขึ้นต้น (primarily elastic)



รูปที่ 2.19 เส้นโค้งของ load-displacement

ทฤษฎีนี้ประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ให้แรงกด (load), แรงกดคงที่ (hold), ยกแรงกดออก (unload) จากเส้นโค้งในรูปที่ 2.19 ช่วงที่ยกแรงกดออก เป็นช่วงยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ (fully elastic) ของวัสดุ สำหรับทั้งการยืดหยุ่นและพลาสติกของวัสดุจะอยู่ในช่วงที่ให้แรงกด และเมื่อให้แรงกดคงที่ที่ tip ค่อยๆจมลงไปในเนื้อวัสดุ วัสดุจะเสียรูปเนื่องจากเวลา

ในทางปฏิบัติ เราจะวิเคราะห์ ส่วนที่ให้แรงกดร่วมกับ ส่วนที่ให้แรงกดคงที่เพื่อที่จะดูว่า การเสียรูปเชิงพลาสติก และ เวลา ส่งผลต่อการกดอย่างไร และวิเคราะห์ส่วนที่ยกแรงกดออกเพื่อที่จะดูว่าการเสียรูปเชิงยืดหยุ่นส่งผลต่อการกดอย่างไรเช่นกัน

#### 2.4.1 การวิเคราะห์การสัมผัสแบบยืดหยุ่น (Elastic contact analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูลการวัดความแข็งแบบรอยกดระดับนาโน ประสบความสำเร็จและถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง คือ ข้อมูลในช่วงยกแรงกดออกเกิดขึ้นได้จาก การสัมผัสแบบยืดหยุ่นโดยสมบูรณ์ (Hertzian contact) วิธีการนี้ถูกทำให้เป็นรูปเป็นร่างเมื่อ 40 กว่าปี ที่ผ่านมาก มีงานวิจัยตีพิมพ์ทั่วโลกเป็นจำนวนมาก แต่ที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดถูกเสนอโดย Oliver และ Pharr ซึ่งเรียกว่า ทฤษฎีของ Oliver และ Pharr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์นี้ได้ถูกพัฒนาให้เป็นรูปเป็นร่างขึ้นครั้งแรกโดย ผู้ที่ทำงานอยู่ในสถาบันบันโลหะไบคอฟ (Baikov) ในเมืองมอสโก ประเทศรัสเซียในช่วงทศวรรษที่ 1970 โดยสมมติฐานเบื้องต้นคือ

1. การเสียรูปของวัสดุในช่วงที่ยกแรงกดออกนั้น เกิดจากการยืดหยุ่นบริสุทธ์
2. ชิ้นงานตัวอย่างและ tip สามารถรวมกันให้อยู่ในรูปของสปริงที่ต่ออนุกรมกัน

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \quad (2.2)$$

ซึ่ง  $E_r$  ตามสมการข้างต้นคือ โมดูลัสที่ถูกทำให้ลดลง (reduced modulus) และ  $E$  คือ ค่าคงที่ยังโมดูลัส (Young modulus),  $\nu$  คือ สัดส่วนพอสซัน (Poisson ratio),  $i$  คือ tip หรือตัวกด,  $s$  คือ ชิ้นงานตัวอย่าง

3. ส่วนการกด นั้น จะวิเคราะห์รูปแบบสำหรับการสัมผัสกันระหว่าง tip ที่แข็งและทราบขนาดที่แน่นอน พื้นที่ครึ่งหนึ่งของการยืดหยุ่นที่สมมาตรเหมือนกัน

$$S = \frac{2\sqrt{A}}{\sqrt{X}} E_r \quad (2.3)$$

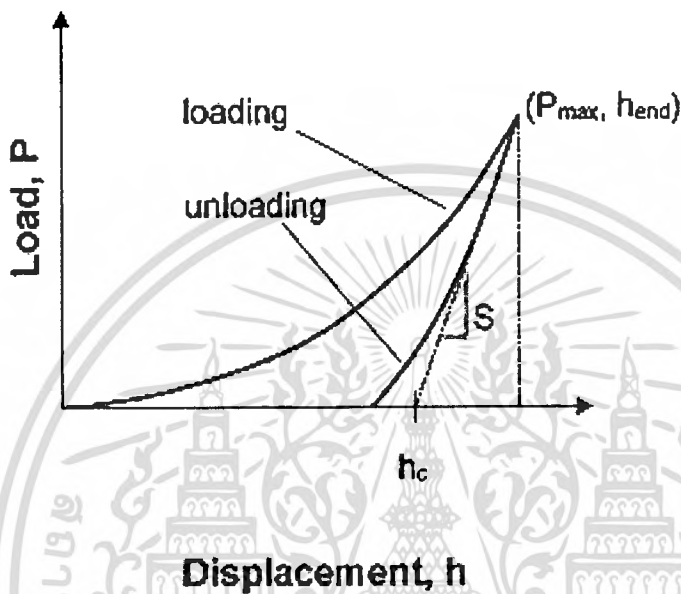
เมื่อ  $s$  คือ ความรุนแรงของการสัมผัสหรือการกด และ  $A$  คือพื้นที่สัมผัส ซึ่ง Sneddon เป็นผู้เสนอสมการที่ 2.3 ข้างต้น หลังจากนั้นต่อมาคณะของ Pharr, Oliver และ Brotzen. ได้แสดงให้เห็นว่า สมการที่ 2.3 นั้นสามารถใช้ได้กับ tip ที่มีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันออกไปได้ในเวลาต่อมา

#### 2.4.2 การวิเคราะห์แบบโดเนอร์ และ นิกซ์ (Doner and Nix)

การวิเคราะห์ข้อมูลการวัดความแข็งแบบรอยกดระดับนาโน ได้สำเร็จสมบูรณ์อย่างแท้จริง โดย Doner และ Nix เนื่องจากว่ากลุ่มชาวรัสเซียไม่สามารถที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูล P-h (จากรูปที่ 1) กับ พื้นที่สัมผัสได้ ดังนั้น Doner และ Nix เป็นผู้เสนอว่า ในขณะที่ยกแรงกดออก ถ้าพื้นที่สัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แสดงว่า tip มีการกดแบบราบเรียบลงไปบนชิ้นงานตัวอย่าง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ในขณะที่ยกแรงกดออกนั้น เนื้อวัสดุทั้งหมดที่สัมผัสกับ tip จะเกิดการเสียรูปเชิงพลาสติก แต่พื้นที่รอบด้านนอกของพื้นที่สัมผัสจะเป็นการเสียรูปเชิงยืดหยุ่น ดังนั้น Doner และ Nix จึงสามารถที่จะหาความสัมพันธ์กันระหว่าง ข้อมูล P-h (จากรูปที่ 1) กับ พื้นที่สัมผัสได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาตามแนวแกนของ tip ให้ระยะที่ tip สัมผัสลึกลงไปในชิ้นงานตัวอย่าง เป็น ระยะ ลึกสัมผัส ( $h_c$ , contact depth) และจากรูปที่ 2.20 slope S จะพิจารณาจากจุดที่ให้แรงกดสูงสุด ( $P_{max}$ ) หรือ ณ จุดที่มีความรุนแรงสูงสุดในการสัมผัส ( $h_{end}$ ) นั้นเอง เมื่อลากเส้นจากจุด S ไปยังแกนระยะการ กด จุดตัดที่ได้คือ ระยะลึกสัมผัส



รูปที่ 2.20 การวิเคราะห์แบบ Doerner และ Nix

ดังนั้นการวัดพื้นที่สัมผัสแรงกดจึงจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์หาค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่าง และ จะพิจารณาพื้นที่สัมผัส เมื่อให้แรงกดมีค่ามากที่สุด

Doerner และ Nix วัดรูปร่างของ tip โดย นำ tip ไปกดลงบนเนื้อทองแดงอ่อนหลายๆ จุด ซึ่ง แต่ละจุดมีระยะลึกต่างกัน หลังจากนั้นนำรอยกดไปวัดด้วยกล้อง TEM ได้ความสัมพันธ์ของพื้นที่ สัมผัสกับระยะการกดตามสมการที่ 2.4 หรือเรียกว่า area function

$$A_c = f(h_c) \quad (2.4)$$

และสามารถหาค่าความแข็งได้จากสมการที่ 2.5

$$H = \frac{P_{max}}{A(h_c)} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งตามสมการที่ 2.5 จะแตกต่างจาก ค่าความแข็งโดยทั่วไป เนื่องจากว่า ในการวัดวิเคราะห์ ข้อมูลของการหาค่าความแข็งแบบรอยกดระดับนาโนพิจาณาพื้นที่ผิวสัมผัส ณ จุดที่ให้แรงกดสูงสุด แต่ค่าความแข็งโดยทั่วไปจะไม่ได้พิจารณา ณ จุดที่ให้แรงกดสูงสุด

เมื่อต้องพิจารณาการสัมผัสแบบยึดหยุ่นด้วย ดังนั้นเราจึงต้องทราบค่า Elastic modulus ของวัสดุด้วย เราสามารถหา reduced modulus ในสมการที่ 2.2 ได้ โดยการรวมสมการพื้นที่สัมผัสสมการที่ 3 กับสมการ ความรุนแรงของการกด ณ จุดที่ให้แรงกดสูงสุด (สมการที่ 2.3) และทราบค่า E และ  $\nu$  ของ tip ในที่สุดเราจะสามารถหาค่าสัดส่วน  $E/(1-\nu^2)$  ของชิ้นงานตัวอย่างได้

#### 2.4.3 การวิเคราะห์แบบโอลิเวอร์ และ พาร์ (Oliver and Pharr)

วิธีการของ Sneddon สามารถที่จะคาดการณ์ได้ว่า การยกแรงกดออก ซึ่งจะทำให้เกิดการสัมผัสแบบยึดหยุ่นจะเป็นไปตามกฎของพลังงาน ซึ่งใช้ได้กับ tip รูปแบบต่าง ที่มีรูปทรงสมมาตร เช่น ทรงกรวย ทรงกลม เป็นต้น

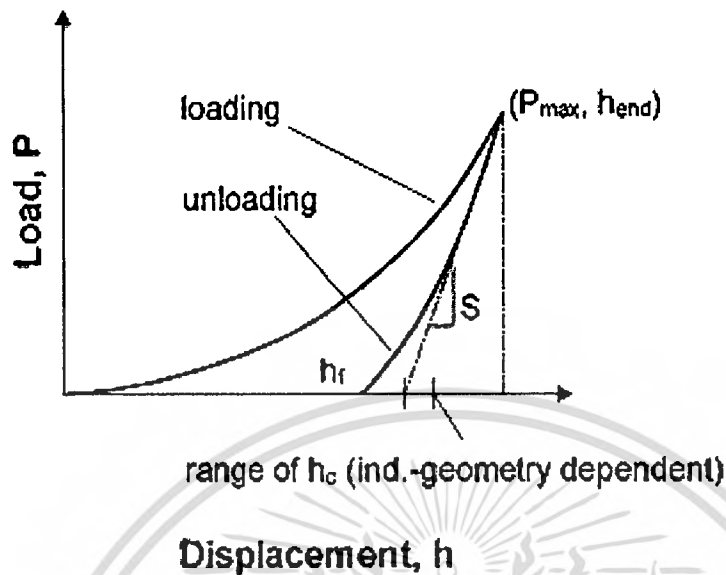
$$P = \infty h^m \quad (2.6)$$

ซึ่ง P คือ น้ำหนักที่ให้กับ tip, h คือ ระยะยึดหยุ่นของ tip,  $\infty$  และ m เป็นค่าคงที่ Oliver และ Pharr นำข้อมูลเหล่านี้ไปช่วย ในการกำหนดค่าของ พื้นที่สัมผัส ณ จุดที่ให้แรงกดสูงสุด และสมการนี้ยังใช้ได้ แม้กระทั่งกับ พื้นที่สัมผัสที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ยกแรงกดออก

$$h_c = h_{end} - \theta \frac{P_{max}}{S} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\theta = 0.72, 0.75$  และ 1 สำหรับ รูปทรง กรวย, ทรงกลม, กดราบแบบสมมาตร

กระบวนการของ Oliver และ Pharr คือ การนำกฎของพลังงาน ไปใช้วิเคราะห์ในส่วนที่ยกแรงกดออก ซึ่งค่าความชันของกราฟที่ได้ คือ S ซึ่งค่า S จะเป็นตัวบอกว่า ณ จุดที่ให้แรงกดสูงสุด ความรุนแรงของการกดจะมีค่าเท่าไร ค่าความชันที่ได้นี้จะต้องมีการพิจารณาค่า  $\theta$  ร่วมด้วย เพื่อให้ได้ค่าระยะลึก ที่แท้จริง ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะหาค่า modulus ของรอยกด และ ค่าความแข็งของรอยกด



รูปที่ 2.21 การวิเคราะห์แบบ Oliver และ Pharr

ค่า Modulus ของรอยกด และ ค่าความแข็งของรอยกด ทั้งสองค่านี้จะขึ้นอยู่กับ area function;  $A(h_c)$  และ ค่าความถูกต้อง

มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนา รูปแบบของ Oliver และ Pharr โดยการเพิ่มค่า แก้ไขความผิดพลาด (correction factor) โดยจะคำนวณ ระยะรัศมีของพื้นผิวในวิธีการของ Sneddon เพิ่มเติมเข้าไปด้วย ในกรณีที่วัสดุแสดงพฤติกรรมที่บดบังกันขึ้นมา หรือจมลงไป ก็ยังมีความเป็นไปได้ที่พัฒนารูปแบบการวิเคราะห์โดยการเสริมตัวแปรที่เกิดการความผันแปรระหว่าง ฟังก์ชันพื้นที่สัมผัส ในอุดมคติกับที่ตรวจวัดมาตรฐานแล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับของจริง

การวิเคราะห์เมื่อรวม Plasticity เข้าไปด้วย จากรูปที่ 2.21 เรายังมีข้อมูลในส่วนแรก คือ การให้แรงกด ซึ่งในส่วนนี้เราจะไม่พิจารณาการยืดหยุ่น ซึ่งเราได้พิจารณาการยืดหยุ่นในส่วนที่ยกแรงกดยืดหยุ่นออกอย่างแท้จริงไปแล้ว ดังนั้นในหัวข้อนี้เราจึงจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมแบบพลาสติกของวัสดุ ในขณะที่มีการให้แรงกดด้วย

#### 2.4.4 วิธีการวิเคราะห์แบบ Field and swain approach

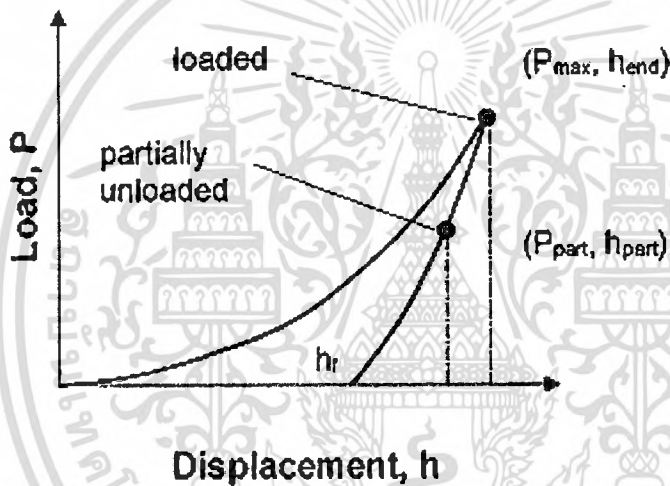
การวิเคราะห์รอยกดระดับนาโนแบบกึ่งอยู่กับที่ จาก tip ทรงกลม และ แบบวิธีการสัมผัส ของ HurZian ถูกนำมาใช้โดย Field และ Swain โดยให้ ความลึกทั้งหมดของ tip ทรงกลมที่กดลงไปในครึ่งหนึ่งของพื้นที่ยืดหยุ่น ดังสมการที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = Qk \text{ ด้วย } Q = \left(\frac{9}{16}\right)^{1/3} \left(\frac{P}{E_r}\right)^{2/3} \text{ และ } k = \left(\frac{1}{R}\right)^{1/3} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $P$  คือ น้ำหนักที่กด,  $E_r$  คือ reduce modulus,  $R$  คือ รัศมีของ tip

โดย Field และ Swain ใช้ผลที่ได้จาก Sneddon, Tabor, Nadai, Love, Hertzian มารวมเข้าด้วยกัน เพื่ออธิบายการเสียรูปเชิงพลาสติก Field และ Swain นำส่วนที่ให้แรงกดและส่วนที่ค่อยๆยกแรงกดออกมาใช้หาค่าความแข็งและโมดูลัสที่ถูกทำให้ลดลง



รูปที่ 2.22 การวิเคราะห์แบบ Field และ Swain

รัศมีการสัมผัสของ tip ทรงกลม, รัศมี ( $R$ ) กับ ชั้นงานตัวอย่าง แสดงดังสมการที่ 2.8

$$a = \sqrt{R(h_{end} + h_f) - \left(\frac{h_{end} + h_f}{2}\right)^2} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_r = \frac{h_{part} \left( \frac{P_{max}}{P_{part}} \right)^{2/3} - h_{end}}{\left( \frac{P_{max}}{P_{part}} \right)^{2/3} - 1} \quad (2.10)$$

และ ค่า ความแข็ง และ ค่า โมดูลัสที่ทำให้ลดลงแสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$H = \frac{P_{max}}{\pi a^2} \quad (2.11)$$

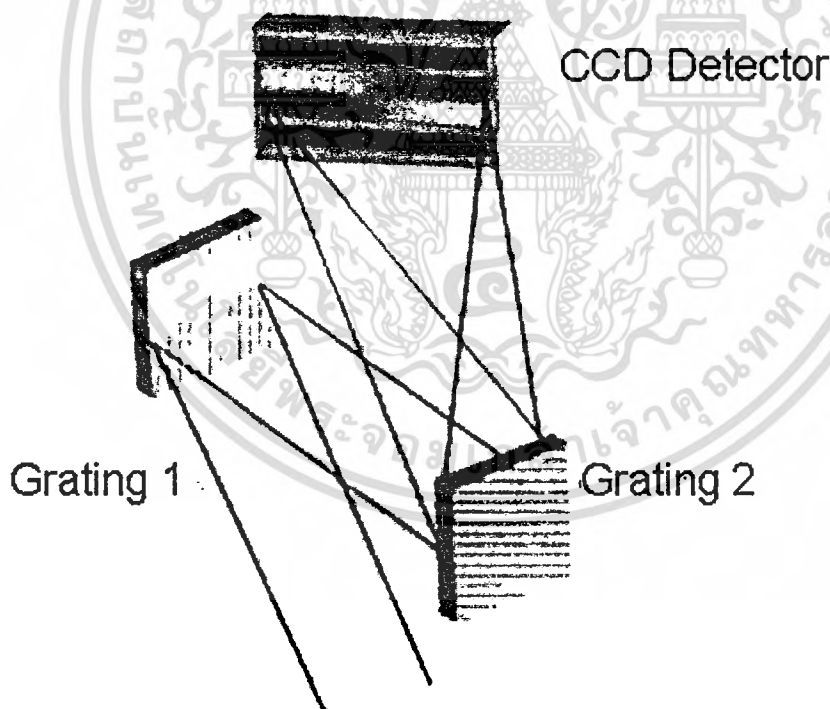
$$E_r = \frac{3}{4} \frac{P_{max}}{a(h_{end} - h_f)} \quad (2.12)$$

## 2.5 ทฤษฎีพื้นฐานของ Raman Spectroscopy

เทคนิค Raman Spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการระบุชนิดของสารและใช้ในการวิเคราะห์โมเลกุลของสาร โดยเทคนิคนี้จะให้ข้อมูลที่คล้ายกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Infrared Spectroscopy แต่จะมีข้อดีที่ได้เปรียบที่สำคัญกว่าคือ ไม่จำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยากและบางครั้งก็สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้เลยโดยไม่ต้องผ่านการเตรียมตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์สารที่อยู่ในภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์ที่มีลักษณะใส ได้แก่ แก้วหรือพลาสติก หรือสารละลายที่อยู่ในน้ำซึ่ง peak ของน้ำจะรบกวนตัวอย่าง แต่ด้วยเทคนิคนี้จะให้ peak ของน้ำที่อ่อนมากจึงไม่รบกวนตัวอย่าง ทำให้สามารถวิเคราะห์สารละลายซึ่งละลายอยู่ในน้ำได้

โดยทั่วไปเมื่อแสงทำปฏิกิริยากับตัวอย่างอาจจะเกิดได้ทั้งการดูดซับ การส่งผ่านและการกระเจิงของแสง ซึ่งเทคนิค Raman Spectroscopy จะใช้พื้นฐานในการตรวจวัดการกระเจิงของแสง แสงที่เกิดการกระเจิงซึ่งถูกกระตุ้นโดยแสงเลเซอร์ซึ่งมีความเข้มและเป็นแสงความยาวคลื่นเดียว พลังงานรังสีอาจเกิดการกระเจิง ซึ่งไม่มีผลให้ความยาวคลื่นของแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงเรียกว่า Rayleigh scattering ในทางกลับกันรังสีอาจเกิดการกระเจิงโดยมีผลให้ความยาวคลื่นแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยถ้าแสงเกิดการสูญเสียพลังงานเกิด Stoke radiation และถ้าแสงได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเกิด Anti-Stoke radiation ซึ่งแสงที่เกิด Stoke radiation และ Anti-Stoke radiation นั้นจะสอดคล้องกับการสั่นของโมเลกุลสาร สเปกตรัมในช่วง Stoke radiation จะมีความเข้มสูงซึ่งเป็นช่วงที่สนใจนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ส่วนสเปกตรัมของ Anti-Stoke radiation นั้นจะไม่ได้ให้ข้อมูลใหม่

ๆ ที่สำคัญมากนักเราจึงไม่สนใจสเปกตรัมในช่วงนี้ เช่นเดียวกับกับ Infrared Spectroscopy สารแต่ละตัวจะให้ข้อมูลสเปกตรัมเฉพาะสารซึ่งสามารถใช้ระบุชนิดของสารได้หรือที่เรียกว่า finger print โดยการสั่นของพันธะที่จะสามารถตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้จะต้องเกิดการ polarize ของแสงได้ ซึ่งสารที่มีพันธะแบบสมมาตรพวก symmetric bond g ได้แก่ C=C, S=S หรือสาร aromatic จะให้ peak ที่ชัดเจน เทคนิค Dispersive Raman จะใช้ grating ซึ่งจะมีข้อเสียเนื่องจากสเปกตรัมแยกกระจายไปยัง CCD detector ในรูปแบบเส้นตรงซึ่งจะต้องเลือกระหว่างการใช้ low dispersive grating จะให้สเปกตรัมช่วงกว้างแต่ให้ resolution ต่ำ หรือถ้าใช้ high dispersive grating จะให้ resolution สูงแต่เห็นสเปกตรัมจำนวนน้อยและอีกแบบหนึ่งก็คือการใช้ scanning และ stitching ซึ่งจะทำให้ได้ resolution ที่สูงได้แต่ต้องใช้เวลานานและสเปกตรัมแต่ละส่วนนั้นได้จากการวิเคราะห์ที่เวลาต่างกัน ด้วยเหตุนี้บริษัทเพอร์คินเอลเมอร์จึงได้ใช้ Echelle spectrograph เข้ามาใช้ในเครื่อง Dispersive Raman โดยจะใช้ grating 2 อันในการใช้ให้แสงแยกกระจายไปยัง CCD detector ในรูปแบบสองมิติทำให้สามารถเก็บแสงทั้งหมดได้พร้อม ๆ กับการให้ resolution ที่ดีได้



รูปที่ 2.23 เส้นทางเดินทางของแสงในเครื่อง Raman Spectroscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 70 ปีมานี้ นักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มนำเทคนิค Raman spectroscopy มาใช้ในงานวิจัยพื้นฐานเพื่อหาโครงสร้างของวัสดุสารจากการวัดสเปกตรัมที่เลื่อนไปของ Raman ( Raman shift) และตำแหน่งสเปกตรัม ซึ่งสัมพันธ์กับคุณลักษณะของพันธะอย่างมีนัยสำคัญที่แน่นอน โดยสารแต่ละชนิดจะมีสเปกตรัมเฉพาะเป็นของตัวเอง เทคนิค Raman spectroscopy นี้มีหลักการสำคัญคือ การใช้การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Raman scattering) และการสั่นของโครงสร้าง เมื่อฉายแสงสีเดียวให้ความเข้มกับวัสดุสาร จะเกิดการแผ่รังสีจากวัสดุสารด้วยความยาวคลื่นที่สั้นหรือยาวกว่าแสงที่ใช้ในการกระตุ้น (exciting light) โดยกลไกการกระเจิงของแสงนี้สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการรวมกันของการโพลาไรส์ (polarization) ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนดังสมการ (2.13) ทำให้เกิดภาวะไม่สมดุล ระบบจึงพยายามเข้าสู่สมดุลโดยการแผ่รังสี

$$P = \alpha E \quad (2.13)$$

เมื่อ P คือ โมเมนต์สนามเหนี่ยวนำ

$\alpha$  คือ polarizability (r

E คือ สนามไฟฟ้า (นิวตัน/คูลอมบ์)

การสั่นของ โครงสร้างผลึกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบ โพลาไรส์ จะเป็นการกระตุ้นแบบ Raman โฟตอนบางตัวจะถูกปล่อยออกจากการสั่นของไคโพล ซึ่งมีทั้งมีความถี่เหมือนกับลำแสงตกกระทบ (Elastic Rayleigh scattering) หรือเป็นความถี่ที่เลื่อนออกไปโดยมีค่าความถี่การสั่นของ โครงสร้างเป็น  $\nu_0 \pm \nu_m$  เมื่อ  $\nu_m$  คือ ความถี่ของการสั่นของโมเลกุลดังรูปที่ 2.24 โดยที่  $\nu_0 - \nu_m$  และ  $\nu_0 + \nu_m$  จะถูกเรียกว่า Stokes และ Anti-strokes scattering ตามลำดับ เมื่อใช้อินทรมเทย์เลอร์สามารถเขียนสมการ (2.13) ใหม่ได้เป็น

$$p = \alpha_0 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_0 q_0 E_0 [\cos 2\pi(\nu_0 + \nu_m)t + \cos 2\pi(\nu_0 - \nu_m)t] \quad (2.14)$$

เมื่อ  $E_0$  คือ สนามไฟฟ้าของลำแสงตกกระทบ

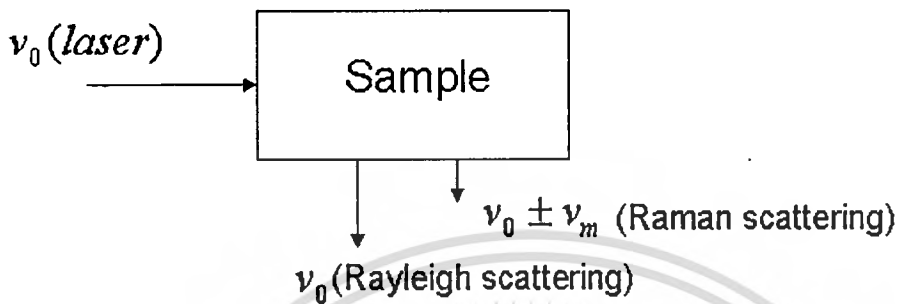
$\nu_0$  คือ ความถี่ของแสงตกกระทบ

$\nu_m$  คือ ความถี่ของโฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\alpha_m$  คือ การโพลาไรส์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการสั่น

$t$  คือ เวลา



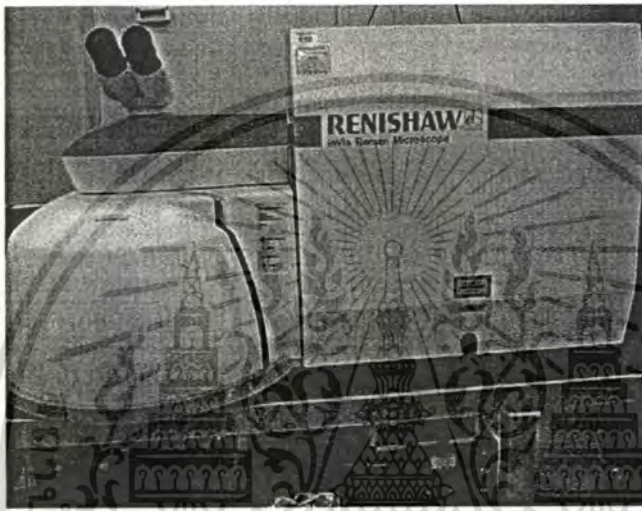
รูปที่ 2.24 กลไกของเครื่อง Raman spectroscope

การเลื่อนไปของความถี่เป็น Raman scattering ซึ่งตั้งชื่อเป็นเกียรติแก่ Sir. C.V. Raman ผู้ค้นพบผลนี้ในปี 1928 Stokes scattering (ผลของ Raman ชนิดปกติ) เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำแสงแล้วเกิดการสั่น ขณะที่ Anti-stokes scattering เกิดจากการทำลาชของความร้อนที่กระตุ้นการสั่น โหมดการสั่นขึ้นอยู่กับพันธะของอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman spectrum จึงถูกแปลเป็น โครงสร้างของของแข็งได้ และเนื่องจากความถี่  $\nu$  คือ จำนวนคลื่นที่เคลื่อนที่ได้ใน 1 วินาที มีหน่วยเป็น  $s^{-1}$  หรือ เฮิร์ตซ์ (Hertz) ในการตรวจวัดการสั่น โดยปกติทั่วไปจึงนิยามพารามิเตอร์ใหม่ขึ้นมาเรียกว่าเลขคลื่น (wave number ; ) ซึ่งมีหน่วยที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมีแผนภาพโคอะแกรมของ Raman spectroscope

Raman scattering ใช้ประโยชน์ในการศึกษาทางเคมีและฟิสิกส์ของคาร์บอน โดยเฉพาะฟิล์มเพชร CVD ซึ่งจะมีความไวต่อธรรมชาติของพันธะคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถแยกชนิดของคาร์บอนได้เป็น เพชร แกรไฟต์ อัญมณี หรือ hydrogenated carbon ยอดความเข้ม Raman สำหรับเพชรมี 2 ค่าคือที่  $1,332\text{ cm}^{-1}$  และ  $2,458\text{ cm}^{-1}$  ส่วนแกรไฟต์มียอดความเข้มอยู่ที่  $1,580\text{ cm}^{-1}$  และ  $3,240\text{ cm}^{-1}$  Microcrystalline graphite ซึ่งมีขนาดเล็ก มียอดความเข้มอยู่ที่  $1,355\text{ cm}^{-1}$  ส่วนอัญมณีคาร์บอนมีลักษณะเป็นแถบกว้างอยู่ 2 แถบ ที่ประมาณ  $1,550\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,355\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งถ้าอัญมณีคาร์บอนมีลักษณะเป็นแถบกว้างจะอยู่ที่  $1,335\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นไหล่ของแถบ  $1,550\text{ cm}^{-1}$  ด้วยเหตุที่ประสิทธิภาพการกระเจิงของ Raman สำหรับแกรไฟต์มากกว่าเพชรจึงสามารถตรวจวัดพบแกรไฟต์จำนวนน้อยที่อยู่บนฟิล์มเพชร CVD ได้ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจอย่างยิ่งเพราะมีความไว และเป็นการทดสอบที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณภาพของฟิล์ม ในเทอมของชนิดพันธะ ยิ่งไปกว่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดส่วนใหญ่ สภาวะความเค้นและความสมบูรณ์ของโครงสร้างสามารถหาได้ โดยใช้ ความกว้างและการเคลื่อนที่ของยอดความเข้มเป็นตัวบอก อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีส่วน  $SP^2$  หรือพันธะ  $\pi$  เป็นส่วนระกอบในฟิล์มจำนวนน้อยก็ตามแต่ก็อาจทำลายลักษณะความเป็นเพชรลงได้เนื่องจากเกิดความแตกต่างอย่างมากในภาคตัดขวางของการกระเจิง



รูปที่ 2.25 เครื่อง Raman spectrum ของบริษัท Renishaw

สำหรับ Raman Spectrum ของเพชรที่สร้างขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ก็จะมี Raman Spectrum ที่แตกต่างกันไปด้วย สำหรับฟิล์มที่มีโครงสร้างที่ผลึกที่สุดจะมียอดแหลมที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงความเป็นผลึกเพชร ส่วนแถบกว้างที่ประมาณ  $1500\text{ cm}^{-1}$  ที่สังเกตพบเพิ่มจากยอด  $1332\text{ cm}^{-1}$  คือการเกาะกันภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ได้คืนซึ่งเป็นลักษณะของอสัณฐานคาร์บอนที่มีการยึดเหนี่ยวพันธะกันด้วยพันธะ  $SP^2$  ซึ่งถ้าฟิล์มมีลักษณะเพชรเท่านั้นจะมียอดแหลมที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  น้อยลง

เทคนิค Raman Spectroscopy ใช้ได้อย่างดีเยี่ยมในการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มคาร์บอนที่มีทั้งพันธะ  $SP^2$  และ  $SP^3$  โดยถ้ารู้ความแรงของการกระเจิงสัมพันธ์ก็จะทำให้รู้ว่าฟิล์ม DLC นั้นเป็นเพชรหรือแกรไฟต์มากกว่ากันโดยสมมุติให้ความแรงของทั้งสองนี้สัมพันธ์กับสัดส่วนโดยปริมาตรของเพชรและแกรไฟต์ พบว่าแกรไฟต์จะมีการดูดกลืนแสงสีขาได้ดี ซึ่งผลของความแตกต่างในการดูดกลืนเป็นสิ่งสำคัญเมื่อขนาดของบริเวณที่ดูดกลืน แกรไฟต์เท่ากับหรือใหญ่กว่าความยาวของการ

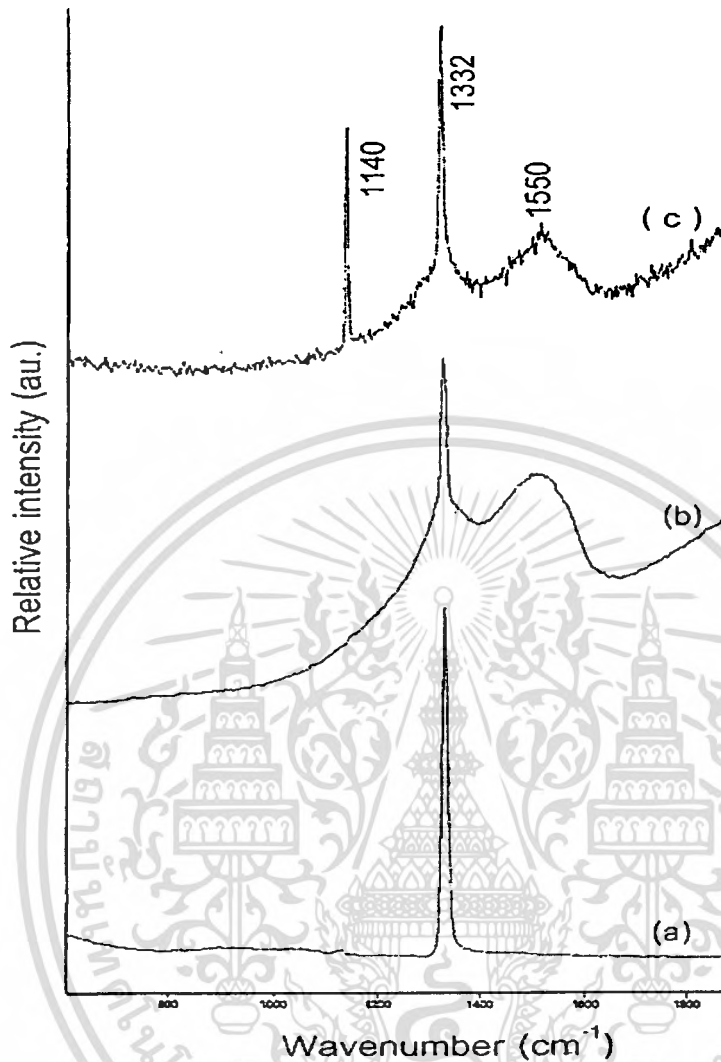
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูคลื่นในแกรไฟต์ (~20 nm) ดังนั้นทั้งความเข้มข้นและขนาดของผลึกของแกรไฟต์จึงมีผลต่อสเปกตรัมของ Raman

ตารางที่ 2.1 ยอดกราฟหลักๆ จากการวัดเพชรด้วยเครื่อง Raman Spectroscope

ตำแหน่งพีก	ชนิดของคาร์บอน	รายละเอียด
$\approx 1,140 \text{ cm}^{-1}$	Small size (<0.1 $\mu\text{m}$ ) cubic diamond	พบในฟิล์มเพชรที่มีเกรนขนาดเล็ก (<0.1 $\mu\text{m}$ )
$1,315\text{-}1,326 \text{ cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	เป็นแถบกว้างพบในการสังเคราะห์เป็น Shock wave
$1,332 \text{ cm}^{-1}$	Cubic diamond	พีกอันดับที่ 1 ของเพชรธรรมชาติที่มีความกว้าง ที่ครึ่งหนึ่งของความสูงเป็น $1.9 \text{ cm}^{-1}$
$1,345 \text{ cm}^{-1}$	อสังฐานคาร์บอน	แถบกว้างเมื่อถูกไฮโดรเจนตจะเป็นไหล ของแถบ $1,550 \text{ cm}^{-1}$
$1,355 \text{ cm}^{-1}$	Microcrystalline graphite	พบในวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็ก
$1,550 \text{ cm}^{-1}$	อสังฐานคาร์บอน หรือ Diamond like carbon	แถบกว้าง
$1,580 \text{ cm}^{-1}$	แกรไฟต์	พีกอันดับที่ 1
$2,458 \text{ cm}^{-1}$	Cubic diamond	พีกอันดับที่ 2
$2,710 \text{ cm}^{-1}$	Microcrystalline graphite	พีกอันดับที่ 2
$3,240 \text{ cm}^{-1}$	แกรไฟต์	พีกอันดับที่ 2

ตำแหน่งพีกที่ได้ Raman spectrum ในรูปที่ 2.26 เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตาราง 2.1 พบว่า ตำแหน่งพีกที่  $1,132 \text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งของคาร์บอนชนิด Small size cubic diamond ที่ตำแหน่ง  $1,332 \text{ cm}^{-1}$  ตรงกับตำแหน่งพีกของ Cubic diamond ของเพชรธรรมชาติ และตำแหน่ง  $1,550 \text{ cm}^{-1}$  นั้น เป็นตำแหน่งของแกรไฟต์ ซึ่งหากพบว่าพีกที่ตำแหน่งอื่นๆก็สามารถนำมาเทียบกับค่ามาตรฐานจากตารางได้เช่นกัน



รูปที่ 2.26 Raman spectrum ของเพชรที่สร้างขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน

## 2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของ Reflxtrometer

### 2.6.1 ทฤษฎีพื้นฐานทางแสงของเครื่อง Reflxtrometer

Reflxtrometer เป็นเครื่องมือวัดค่าระดับการสะท้อนแสงที่สะท้อนกลับมาจากวัสดุที่เราต้องการศึกษาโดยอาศัยหลักการที่ว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกันจะให้ค่าระดับการสะท้อนแสงที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ความหนาต่างกัน, คุณสมบัติของฟิล์มต่างกัน ก็จะทำให้ค่าระดับการสะท้อนของแสงต่างกันด้วย ซึ่งเครื่อง Reflxtrometer จะทำการแยกค่าระดับการสะท้อนแสงตามค่าความยาวคลื่นแสงในย่านต่างๆ คือตั้งแต่ NIR (near infrared) จนถึง DUV (Deep Ultraviolet) และเครื่อง Reflxtrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางรุ่นอาจจะสามารถวัดระดับการสะท้อนแสงลงไปได้ถึงระดับ VUV (Very Deep Ultraviolet) โดยมีหลายตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าระดับการสะท้อนแสงคือ

1. ความหนาของฟิล์ม
2. ดัชนีการหักเหของแสง (Index of refraction,  $n$ )
3. ค่าการดูดกลืนแสง (Extinction Coefficient,  $k$ )
4. Energy Bandgap,  $E_g$
5. ค่าความขรุขระ (Interface Roughness,  $\sigma$ )

### ดัชนีหักเห

เนื่องจากอัตราเร็วแสงในตัวกลางต่างๆ มีค่าแตกต่างกันไป และเป็นสมบัติเฉพาะของตัวกลางนั้น ๆ ด้วยเหตุนี้ อัตราส่วนของอัตราเร็วแสงในสุญญากาศต่ออัตราเร็วแสงในตัวกลางใด ๆ ก็จะมีค่าคงที่และเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสมบัติของตัวกลาง ที่เกี่ยวข้องกับอัตราเร็วแสง เรียกว่า ดัชนีหักเห ถ้าให้  $n$  เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางใด ๆ  $c$  คืออัตราเร็วแสงในสุญญากาศ และ  $v$  คืออัตราเร็วแสงในตัวกลางนั้น ๆ จะได้ว่า

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.15)$$

ค่าอัตราเร็วแสงในตัวกลางใด ๆ จะมีค่าน้อยกว่าอัตราเร็วแสงในสุญญากาศเสมอ ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของตัวกลางต่าง ๆ จะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ ดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ค่า ดัชนีหักเหของแสงสีต่าง ๆ กันในตัวกลางเดียวกันจะมีค่าไม่เท่ากัน แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีดัชนีหักเหน้อย แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีค่าดัชนีหักเหมาก ดังตารางที่ 2.3 ดังนั้น การกำหนดค่าดัชนีหักเหของตัวกลางใด ๆ จึงต้องบ่งบอกด้วยว่าเป็นดัชนีหักเหของแสงสีใด (มีความถี่เท่าใด) ในทางทัศนศาสตร์โดยมากจะบอกค่าดัชนีหักเหของแสงสีเหลืองจากหลอด โซเดียม ( $\lambda = 589.3$  นาโนเมตร) ซึ่งเป็นย่านกลาง ๆ ของสเปกตรัมของแสงที่ตามองเห็น

ตารางที่ 2.2 ดัชนีหักเหของตัวกลางต่าง ๆ สำหรับแสงโซเดียม , 589.3 nm (D-line)

วัสดุ	ดัชนีหักเหของแสงสี
Vacuum	1
Air	1.0003
Water	1.333
Spectacle crown , C-1	1.523
Carbon disulfide	1.63
Extra-dense flint, EDF-3	1.72
Methylene iodide	1.74
Diamond	2.42

ทฤษฎีวิธีการวัดค่าความหนาที่รู้จักกันเป็นอย่างดี คือ ทฤษฎี  $n$  &  $k$  ทฤษฎีนี้ใช้ประโยชน์จากสมการการกระจายของ Forouhi กับ Bloomer และ กลุ่มแถบสีการสะท้อน คือช่วง 1900 อังสตรอม ถึง 10000 อังสตรอม Forouhi กับ Bloomer ได้ข้อมูลรูปแบบทางกายภาพของค่าดัชนีการหักเห ( $n$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย ( $k$ ) ของวัสดุแต่ละชนิด มาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $n$  และ  $k$  กับค่าความยาวคลื่นและคุณสมบัติของวัสดุ ทฤษฎีนี้สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางกับอุปกรณ์กึ่งตัวนำและฟิล์มบางกึ่งตัวนำ รูปแบบของ Forouhi กับ Bloomer ใช้ได้กับค่าความยาวคลื่นในช่วง อัลตราไวโอเลต ไปจนถึง ไกลอินฟราเรด สมการของ Forouhi กับ Bloomer จะเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับความยาวคลื่นช่วงอัลตราไวโอเลตถึงไกลอินฟราเรด และยังต้องการตัวแปรบางตัวดังแสดงดังสมการด้านล่าง

$$k(E) = \sum_{i=1}^g \frac{A_i(E - E_g)^2}{E^2 + B_i E + C_i} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า —  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n(E) = n(\infty) + \sum_{i=1}^q \frac{B_{0i}E + C_{0i}}{E^2 + B_iE + C_i} \quad (2.17)$$

จากสมการด้านบน  $E$  คือ ค่าพลังงานของโฟตอน ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่น ดังสมการ  $E = \frac{hc}{\lambda}$  เมื่อ  $h$  คือค่าคงที่ของพลังค์ และ  $c$  คือ ค่าความเร็วแสงในสุญญากาศ  $E_0$  คือค่าพลังงานในแต่ละช่วง และ  $A, B, C$  คือค่าตัวแปรที่นำไปใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางไฟฟ้าของวัสดุ และปริมาณ  $B_0$  และ  $C_0$  จะขึ้นอยู่กับ ค่า  $A, B, C$  และ  $E_0$  จากสมการที่ 2.16 ดังนั้น  $n(E)$  สามารถหาได้จากสมการที่ 2.17 และค่า  $k(E)$  เนื่องจากความสัมพันธ์แบบ Kramers-Kronig

สำหรับวัสดุอะนินฐาน หรือวัสดุที่ไม่มีผลึก ก็สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.6.2 และสมการที่ 2.17 โดยมีเทอมผลรวมเพียงแค่เทอมเดียว โดยการกำหนด  $q$  ให้เท่ากับ ศูนย์ แต่สำหรับวัสดุกึ่งผลึกหรือวัสดุที่มีผลึก จะมีเทอมผลรวมตั้งแต่สองเทอมเป็นต้นไป โดยกำหนด  $q$  ให้เท่ากับ สองเป็นต้นไป

ทฤษฎี  $n$  &  $k$  พิจารณาหลายส่วนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ 1. รูปแบบของ Forouhi กับ Bloomer สำหรับค่า  $n(\lambda)$  และ  $k(\lambda)$  2. สมการ Fresnel 3. ตัวแปรทางโครงสร้างต่างของวัสดุ เช่น ความหนาของฟิล์ม ( $t$ ) ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ( $\sigma$ ) (เมื่อได้ทั้งสามส่วนแล้วจะสามารถคำนวณหาแถบสีกการสะท้อน  $R_{cal}$  [ $n_f(\lambda), k_f(\lambda), t_f, \sigma_f, n_s(\lambda), k_s(\lambda), \sigma_s, t_s, \dots$ ] ซึ่ง  $f$  และ  $s$  แทน ฟิล์มและ ซับสเตรท ตามลำดับ ค่า  $R_{cal}$  ที่คำนวณได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง  $R_{exp}$  โดยสามารถใช้ได้กับแถบสีในช่วงกว้าง การเปรียบเทียบจะใช้วิธีการ nonlinear least squares ในขณะที่เปรียบเทียบรูปกราฟ ตัวแปรทางโครงสร้างและตัวแปร  $F-B$  ( $n(\infty), A, B, C$  และ  $E_0$ ) จะถูกเปลี่ยนไปเรื่อยๆ จนได้ค่าความผันแปรที่น้อยที่สุด จุดที่เปรียบเทียบกราฟได้ดีที่สุดหรือใกล้เคียงที่สุด จะถูกกำหนดโดย  $1-\infty$  โดยปกติจะใช้เวลาในการเปรียบเทียบประมาณ 1-3 วินาที และเมื่อการเปรียบเทียบกราฟเสร็จสิ้นแล้วจะทราบค่าตัวแปรต่างๆที่เราต้องการเช่น ความหนาฟิล์ม แถบสีกการสะท้อน ค่า  $n$  และ ค่า  $k$

### 2.6.1.1. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ในปัจจุบันได้มีการนำทฤษฎีที่มีประโยชน์มาใช้ในการหาค่าคุณสมบัติ ของฟิล์ม ซึ่งประกอบไปด้วย ความหนาฟิล์ม, ค่าดัชนีหักเห  $n$  และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย  $k$  ในช่วงค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 นาโนเมตร ถึง 1000 นาโนเมตร , ระดับชั้นพลังงาน, ความละเอียดของผิวฟิล์ม นอกจากนั้นชิ้นงานตัวอย่างที่มีฟิล์มเคลือบอยู่ 6 ชนิดก็สามารถที่จะวิเคราะห์ให้ได้เช่นกัน ถ้าเราทราบค่า

$n$  และ ค่า  $k$  ของฟิล์มทั้ง 5 ชนิด เราจะสามารถหาค่า  $n$  และค่า  $k$  ของฟิล์มที่เหลือได้ ดังนั้นเราก็จะสามารถหาค่าความหนาฟิล์มได้เช่นเดียวกัน เพื่อที่จะให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ เราจะต้องกรอกข้อมูลของฟิล์มหรือชิ้นงานตัวอย่างที่เราต้องการวัดให้โปรแกรมทราบ ข้อมูลต่างๆ เหล่านั้นได้แก่ จำนวนชั้นของฟิล์มที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับ ,ชนิดของฟิล์ม ในแต่ละชั้น ในจำนวนทั้งหมดของชั้นฟิล์มนั้น จะต้องมีฟิล์มเพียงชั้นเดียวหรือชนิดเดียวเท่านั้นที่เราไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  ส่วนฟิล์มชั้นอื่นๆ ทั้งหมดรวมทั้งชิ้นงานรองรับต้องทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  แถบสีแสดงค่า  $n$  และค่า  $k$  ของวัสดุพื้นฐานทั่วไปจะถูกเตรียมมาพร้อมกับเครื่องมือวัดอยู่แล้ว รายการของค่า  $n$ และค่า  $k$  ของวัสดุพื้นฐานทั่วไปจะถูกนำไปใส่ไว้ใน Library/n&k (Fixed table) สำหรับชั้นฟิล์มที่เราไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  เราต้องกำหนดจุดเริ่มต้นที่ดีสำหรับการวัดด้วย และถ้าเราทราบค่าประมาณความหนาฟิล์มที่เราต้องการหา เราก็ควรจะระบุให้โปรแกรมทราบเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ด้วย

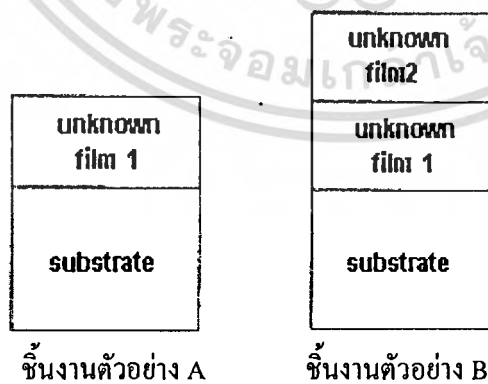
ข้อมูลโครงสร้างของฟิล์มพื้นฐานทั่วไปจะถูกเตรียมมาพร้อมกับเครื่องมือวัดอยู่แล้ว ข้อมูลโครงสร้างฟิล์มถูกจัดเรียงออกเป็นหลายกลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีความแตกต่างกัน และจะถูกนำไปใส่ไว้ใน Library/Default film structure ดังนั้นเราสามารถเลือกฟิล์มที่เราต้องการได้จากส่วนนี้ เพื่อที่จะเลือกข้อมูลโครงสร้างฟิล์มให้ถูกต้องเราจะต้องเลือกข้อมูลโครงสร้างฟิล์มนั้นๆและเลือกปุ่ม close เพื่อยืนยัน โครงสร้างฟิล์มแต่ละแบบถูกสร้างขึ้นมาเพื่อชิ้นงานรองรับแต่ละชนิดที่แตกต่างกันซึ่งทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  นอกจากความแตกต่างของชิ้นงานรองรับแล้ว ข้อมูลโครงสร้างฟิล์มแต่ละแบบถูกสร้างขึ้นมาเพื่อชั้นฟิล์มแต่ละชั้นที่แตกต่างกันอีกด้วย ค่าเริ่มต้นของค่าความหนาฟิล์มและค่าความหยาบของพื้นผิวจะเริ่มต้นที่ ศูนย์ นอกจากนั้น เราจะต้องกำหนดจุดเริ่มต้นของค่า  $n$  และค่า  $k$  ด้วย โครงสร้างฟิล์มบางโครงสร้างอาจจะต้องการให้ผู้ใช้งานระบุความหนาและความหยาบของชั้นฟิล์มนั้นๆเพื่อให้ง่ายต่อโปรแกรมในการคำนวณ หลังจากเปรียบเทียบข้อมูล โครงสร้างฟิล์มที่มีมากับเครื่องกับข้อมูลจากผลการทดลองแล้ว ปรากฏว่า ไม่มีข้อมูลโครงสร้างฟิล์มใดที่เข้ากันได้กับแถบสีสะท้อนของฟิล์มที่ได้จากการทดลองหรือของฟิล์มที่เราต้องการวิเคราะห์ ดังนั้นเราจะต้องสร้างโครงสร้างฟิล์มชนิดใหม่ขึ้นมา ดังจะดูได้จากตัวอย่าง B ที่จะกล่าวต่อไป

ในการวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างที่มีชั้นฟิล์มมากกว่าสองชั้นที่ไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมชิ้นงานใหม่ เนื่องจากเครื่องมือวัดสามารถวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างที่มีชั้นฟิล์มที่ไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  เพียงชั้นฟิล์มเดียวเท่านั้น ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการวิเคราะห์ชั้นฟิล์มสองชั้นที่มีโครงสร้างต่างกัน และไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  ของชั้นฟิล์มทั้งสองชั้นนี้ ดังนั้นเราจึงต้องมีการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างขึ้นมาใหม่อีกหนึ่งชิ้น ดังรูปที่ 2.27 และ รูปที่ 2.28 ชิ้นงานตัวอย่างที่เราต้องทำเพิ่มคือ ชิ้นงานตัวอย่าง A ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ก็ต้องมีเพียงชั้นฟิล์มเดียวเท่านั้นที่ไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  ใน

ที่นี้จะเรียกชั้นฟิล์มนี้ว่า ฟิล์มชนิดที่ 1 ดังนั้นเราจะสามารถวัดแถบสเปกตรัมสะท้อนจากชิ้นงานตัวอย่าง A ได้ และผลแถบสเปกตรัมสะท้อนที่ได้มาก็จะเป็นข้อมูลโครงสร้างของฟิล์มชนิดที่ 1 และผลค่า  $n$  และค่า  $k$  ที่ได้จะถูกนำไปเก็บที่  $n \& k$  (Fixed table) หลังจากนั้นเราจะนำข้อมูลโครงสร้างของฟิล์มชนิดที่ 1 ไปใช้ในระบุนค่า  $n$  และค่า  $k$  ของฟิล์มชนิดที่ 1 ในชิ้นงานตัวอย่าง B ดังนั้นชิ้นงานตัวอย่าง B จะเหลือเพียงชั้นฟิล์มเดียวที่เราไม่ทราบข้อมูลโครงสร้าง ในที่นี้คือ ชั้นฟิล์มชนิดที่ 2 ดังแสดงดังรูป ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาข้อมูลโครงสร้างของฟิล์มชนิดที่ 2 ในชิ้นงานตัวอย่าง B ได้โดยง่าย วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ได้กับชิ้นงานตัวอย่างที่มีฟิล์มเคลือบอยู่มากกว่าสองชั้น แต่ไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  ของชั้นฟิล์มแต่ละชนิด



รูปที่ 2.27 ชิ้นงานตัวอย่างที่มีชั้นฟิล์มเคลือบอยู่สองชั้นและไม่ทราบค่าข้อมูล โครงสร้างของฟิล์มทั้งสองชนิด ไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  ของฟิล์มทั้งสองชนิด ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมชิ้นงานเพิ่มดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ชิ้นงานตัวอย่าง A จะนำไปหาค่า  $n$  และค่า  $k$  ของฟิล์มชนิดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลแถบสีสะท้อนค่า  $n$  และค่า  $k$  ของฟิล์มชนิดที่ 1 จะถูกนำไปเก็บไว้ใน ตาราง n&k ดังนั้นค่าที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ชั้นงานตัวอย่าง B เมื่อทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  ของฟิล์มชนิดที่ 1 แล้ว ชั้นงานตัวอย่าง B ก็เหลือเพียงฟิล์มเพียงชั้นเดียวเท่านั้นที่ไม่ทราบ ค่า  $n$  และค่า  $k$  นั่นก็คือ ฟิล์มชนิดที่ 2 นั่นเอง

เพื่อที่จะทำความเข้าใจขั้นตอนการวิเคราะห์ของเครื่องมือวัด ในการวิเคราะห์ชั้นงานแต่ละแบบที่แตกต่างกันออกไป หัวข้อที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็น การแบ่งหัวข้อการวิเคราะห์และวิธีการแต่ละแบบที่ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ ซึ่งแบ่งออกเป็นสามหัวข้อด้วยกันคือ 1. ชั้นงานตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลโครงสร้างฟิล์มที่มีมากับเครื่องมือวัดอยู่แล้ว 2. ชั้นงานตัวอย่างที่มีชั้นฟิล์มเพียง 1 ชั้นซึ่งไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$  และไม่สามารถเข้ากันได้กับข้อมูลโครงสร้างฟิล์มที่มีมากับเครื่องมือวัด 3. ชั้นงานตัวอย่างที่มีชั้นฟิล์มตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปที่เราไม่ทราบค่า  $n$  และค่า  $k$

ตารางที่ 2.3 ดัชนีหักเหของแก้วคราวน์ (crown) และแก้วฟลินท์ (flint) ที่ความถี่แสงต่าง ๆ กัน

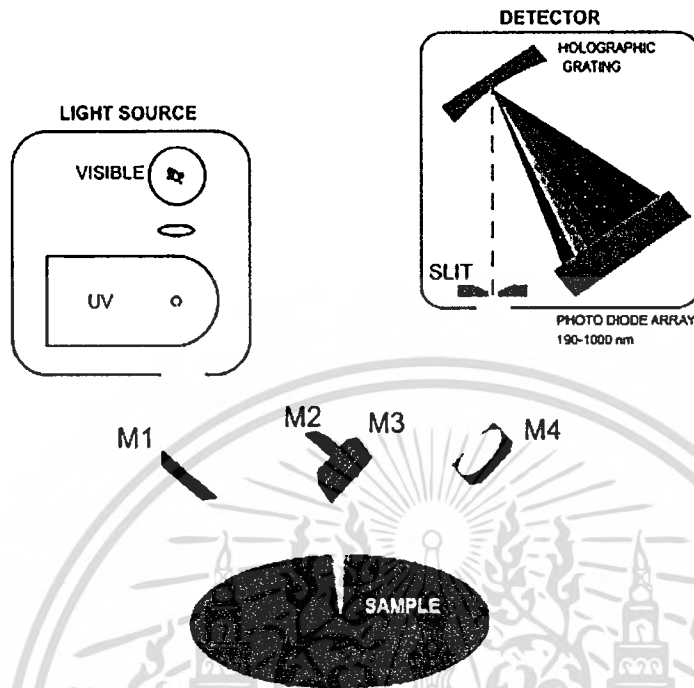
Fraunhofer line	Color	Wavelength (nm)	Spectacle crown	Extra-dense flint
			Refractive index	
F	Blue	486.1	1.5293	1.7378
D	Yellow	589.3	1.5230	1.7200
C	Red	656.3	1.5204	1.7130

โดยดัชนีการหักเหของแสง (Index of refraction,  $n$ ) และค่าการดูดกลืนแสง (Extinction Coefficient,  $k$ ) จะแตกต่างกันในแต่ละความยาวคลื่นแสง โดยวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหมากจะสะท้อนแสงได้มากกว่าวัสดุที่มีดัชนีหักเหน้อยและในกรณีที่เป็นวัสดุที่มีดัชนีหักเหน้อยค่าการดูดกลืนของแสง (Extinction Coefficient,  $k$ ) จะมีผลอย่างมากต่อค่าการสะท้อนแสง

### 2.6.2 หลักการทำงานของเครื่อง Reflextrometer

ในปัจจุบันได้มีการนำเครื่อง Reflextrometer มาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเครื่องส่วนใหญ่ก็จะ มีองค์ประกอบหลักๆ ที่คล้ายคลึงกัน โดยเครื่องเหล่านี้จะมีองค์ประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 2.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 องค์ประกอบหลักของเครื่อง Reflexometer

โดยองค์ประกอบหลักๆจะมีด้วยกัน

1) แหล่งกำเนิดแสง ทำการสร้างแสงในย่านที่ต้องการวัดซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีแหล่งกำเนิดแสงอยู่สองชนิดด้วยกันคือ แหล่งกำเนิดแสงขาวหรือ visible lamp สองคือแหล่งกำเนิดแสงย่านอัลตราไวโอเล็ตหรือ UV ซึ่งเมื่อนำแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองชนิดนี้มาใช้รวมกันจะทำให้เราสามารถสร้างแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 นาโนเมตรถึง 1000 นาโนเมตร

2) ชุดฐานรองชิ้นงาน ซึ่งทำหน้าที่ปรับตำแหน่งของชิ้นงานให้ตรงกับตำแหน่งที่เราต้องการจะทำการวัด ซึ่งอุปกรณ์ชุดนี้จะช่วยให้การวัดมีความรวดเร็ว และถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

3) ชุดรับสัญญาณ (Detector) ชุดนี้จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบย่อย 3 ชิ้นส่วนคือ 1 ชุดรูเข็มที่ให้แสงลอดผ่าน (slit) โดยชิ้นส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการกำจัดสัญญาณรบกวนต่างที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อม ชิ้นที่สองคือ Grating ซึ่งจะทำหน้าที่แยกแสงที่ได้รับออกมาเป็น ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันคือ ตั้งแต่ 190 นาโนเมตร จนถึง 1000 นาโนเมตร และชิ้นส่วนสุดท้ายคือ ชุดวัดค่าความเข้มแสง (CCD Detector) โดยชุดนี้จะทำหน้าที่ในการตรวจวัดค่าระดับความเข้มแสงในแต่ละความยาวคลื่นว่ามีความเข้มอยู่ที่เท่าไร

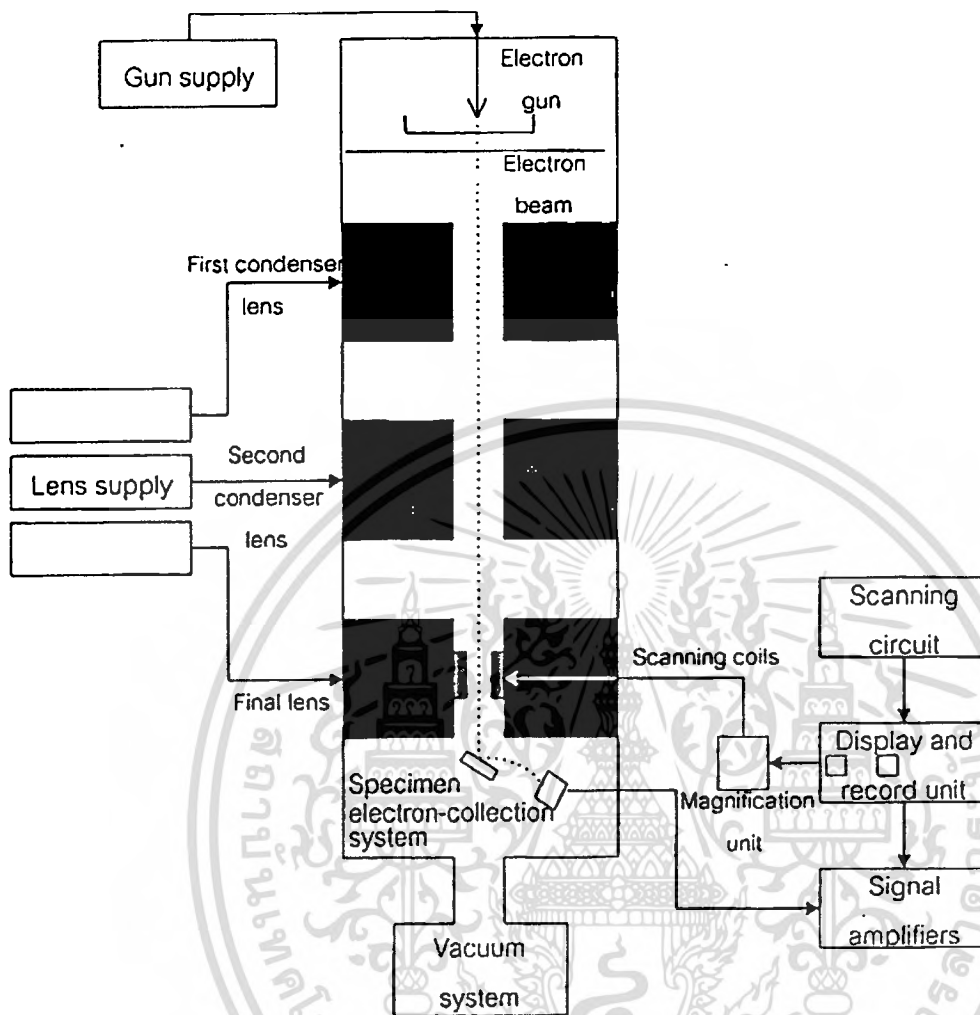
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

## 2.7 เครื่องมือในการวิเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ทางกายภาพ

### 2.7.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดด้วย SEM

Scanning Electron Microscopy (SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ดูลักษณะของพื้นผิวของผลึกที่มีขนาดระดับไมครอน เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการดูลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของผลึกเพชร ทำงานด้วยการยิงลำอิเล็กตรอนให้ไปโฟกัสตกเป็นจุดเล็กๆบนเป้า ซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง แล้วเก็บรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กตรอนิกส์ ซึ่งปล่อยออกมาโดยวัสดุที่ใช้เป้าแล้วขยายเป็นภาพบนหลอดรังสีแคโทด (Cathode-Ray Tube; CRT) ดังแผนภาพแสดงการทำงานของ SEM ในรูปที่ 2.30 ซึ่งแสดงรายละเอียดการทำงานโดยเริ่มจากปืนอิเล็กตรอนจะผลิตอิเล็กตรอนในช่องว่างขนาด 10-20 nm แล้วควบคุมให้พุ่งมากระทบเป้า ขดลวดแอสกนจะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพพื้นที่เล็กๆของพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับด้วยมุมเล็กๆจะทำอันตร-กิริยา (Interact) กับส่วนที่หนูนของพื้นผิว และทำให้เกิดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับลำดับที่สอง เพื่อสร้างสัญญาณของอิเล็กตรอน ความสว่างหรือความเข้มของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สองจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง และอิเล็กตรอนลำดับที่สองนี้จะเป็นตัวสัญญาณทำให้เกิดภาพขึ้น

SEM มีข้อได้เปรียบกว่ากล้องจุลทรรศน์ทั่วไปอยู่มากเนื่องจากมีกำลังขยายที่สูงกว่ามาก ปกติอยู่ในช่วง 40-50,000 เท่า (มีความละเอียดสูง 10-2.5 nm มีความลึกสนามมากกว่า 500เท่า) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเทคนิค TEM (Transmission Electron Microscopy) ซึ่งต้องใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีความบางพอเพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM ใช้ได้แม้กับชิ้นงานที่เป็นก้อนแข็ง ชิ้นงานที่มีความน่าจะถูกวิเคราะห์ได้ด้วยเงื่อนไขตามปกติ ส่วนชิ้นงานที่ไม่มีความน่าโดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องมีการเคลือบด้วยวัสดุที่มีความนำเช่น ทองหรือคาร์บอนบางๆก่อน ยกตัวอย่างฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นบนซิลิกอนไดออกไซด์จำเป็นต้องเคลือบด้วยทองคำก่อน ขณะที่ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นบนซิลิกอนสามารถดูได้โดยตรงทันทีโดยไม่ต้องมีการเคลือบ อย่างไรก็ตามการใช้แรงดันและกระแสค่าต่ำจะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม



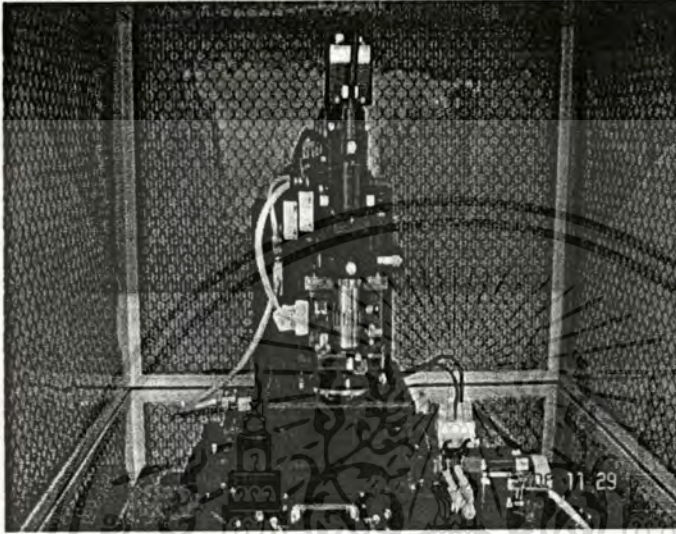
รูปที่ 2.30 แผนภาพการทำงานของ Scanning Electron Microscope (SEM)

### 2.7.2 การวิเคราะห์ด้วย Atomic Force Microscope (AFM)

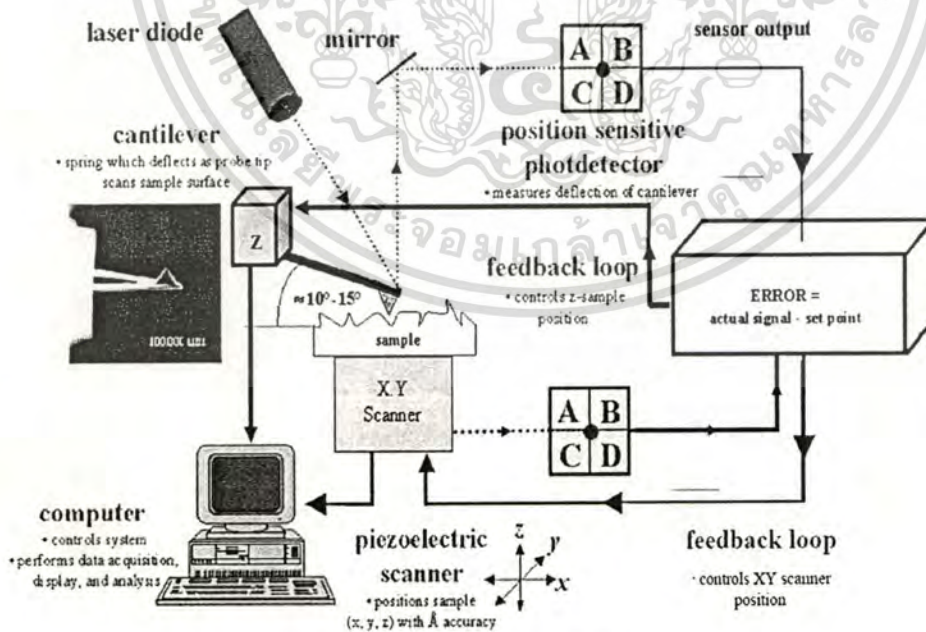
AFM เป็นชนิดหนึ่งของ Scanning Probe Microscope ซึ่งสามารถสร้างภาพได้ในสามมิติและทำงานในสุญญากาศที่มี Scanning Probe, เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (piezoelectric ceramics) วงจรไฟฟ้าป้อนกลับ และคอมพิวเตอร์สำหรับสร้าง และแสดงภาพเป็นส่วนประกอบ Force Sensor มีลักษณะดังรูปที่ 2.31 วัดการหักเหของคานกระเดื่อง (Cantilever) ซึ่งมีเข็ม (Tip) คิดอยู่ที่ปลาย เมื่อคานกระเดื่องเคลื่อนที่ต่ำแสงจากเลเซอร์จะเคลื่อนที่ตกคร่อมบริเวณทั้งสี่ส่วนของโฟโตดีเทคเตอร์ การเคลื่อนที่ของคานกระเดื่องนี้สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างของความเข้มแสงบนแต่ละส่วนของโฟโตดีเทคเตอร์ตามกฎของ Hooke ( $F=-kx$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระเดื่อง ( $x$ ) และแรงที่ใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ( $F$ ) ของการกระเดื่องนี้สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างของความเข้มแสงบนแต่ละส่วนของโฟโตดีเทคเตอร์ตามกฎของ Hooke ( $F=-kx$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของคานกระเดื่อง ( $x$ ) และแรงที่ใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ( $F$ )



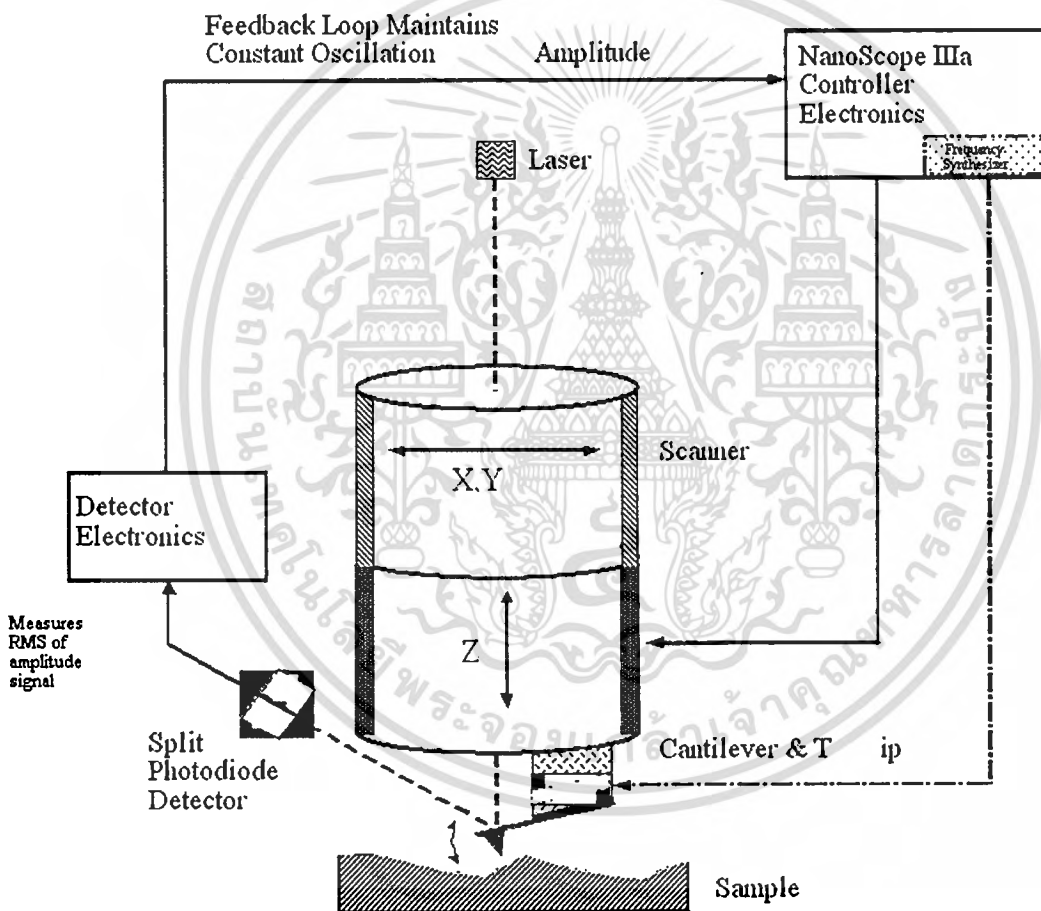
รูปที่ 2.31 เครื่องมือวัด AFM



รูปที่ 2.32 แผนภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วย AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

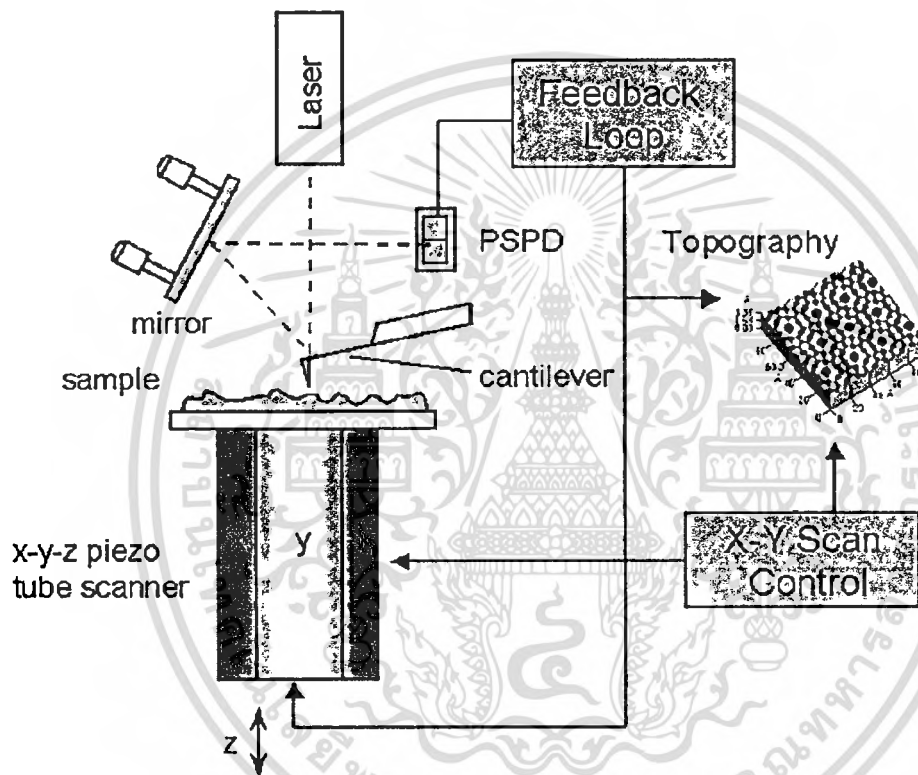
เป็นไปได้ที่จะให้คานกระเดื่องมีค่าคงที่ของแรง  $k$  เป็น  $N/m$  สำหรับการเคลื่อนที่ที่น้อยกว่า 1 อังสตรอม ที่สามารถวัดได้จะใช้แรงน้อยกว่า  $0.1 \times 10^{-9}$  N เปียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics) ถูกสร้างขึ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดได้เมื่อสัคย์ไฟฟ้า ยกตัวอย่างทรงกระบอก เปียโซอิเล็กทริกเซรามิกในรูปที่ 2.33 จะมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดเมื่อมีการให้ สัคย์ไฟฟ้าและทำให้ตัวคานกระเดื่องเคลื่อนที่ลงไปทำการวัดชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่างๆที่ต้องการทำการ วัด



รูปที่ 2.33 การเปลี่ยนแปลงเปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric ceramics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

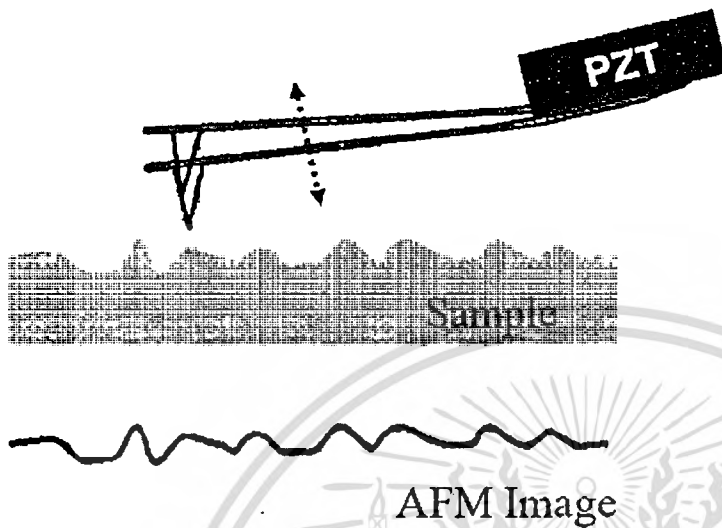
เซรามิกที่ใช้จะมีรูปร่างต่างๆ โดยแต่ละชนิดจะมีสัมประสิทธิ์การขยาย (Expansion coefficient) เฉพาะ ตัวซึ่งจะยอมให้เกิดการผิดรูปร่างไปตามศักย์ที่ให้ สัมประสิทธิ์นี้จะอยู่ในช่วงจาก 1 ถึง 3,000 A/V จะมีการเคลื่อนที่ 0.1 A เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดศักย์ 100 mA วงจรอิเล็กทรอนิกส์ป้อนกลับ ประกอบด้วย โพรบ/ เซนเซอร์ และเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกเป็นวงจรถูกกำหนดตำแหน่งของเซนเซอร์ ดังรูปที่ 2.34



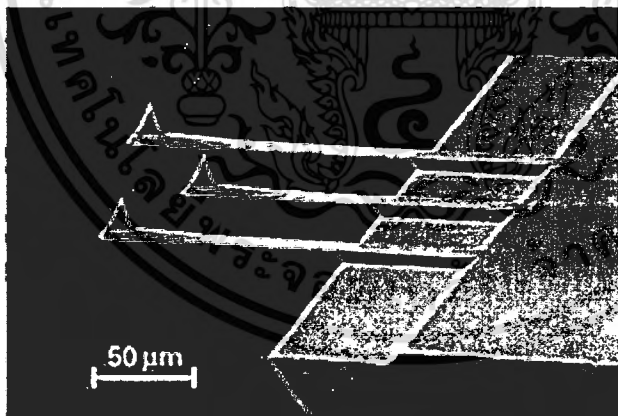
รูปที่ 2.34 วงจรป้อนกลับ (Feedback circuit) ของ AFM

เมื่อเซนเซอร์เคลื่อนที่เข้าหาพื้นผิวที่ผิวขรุขระ สัญญาณของเซนเซอร์จะเพิ่มขึ้น differential amplifier จะเปรียบเทียบเทียบค่าที่เพิ่มจากเซนเซอร์กับค่าอ้างอิง ( $V_s$ ) และได้สัญญาณที่ถูกต้องแปรตามการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดหรือการเลื่อนเฟสจากการออสซิลเลทของโพรบโกสขรุขระซึ่งจะไปกระตุ้นเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก จนกระทั่งเซนเซอร์ถูกดึงออกจากพื้นผิวระบบของ AFM เป็นดังรูปที่ 2.35 มีการเพิ่มเซรามิกเข้าไปสองชิ้นเพื่อให้เซนเซอร์สแกนได้ในระนาบ x-y ภาพของพื้นผิวเกิดจากการจับสัญญาณผิดพลาดจากเซนเซอร์เหนือผิวและสัญญาณจาก piezodriver ที่รวบรวมจากคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



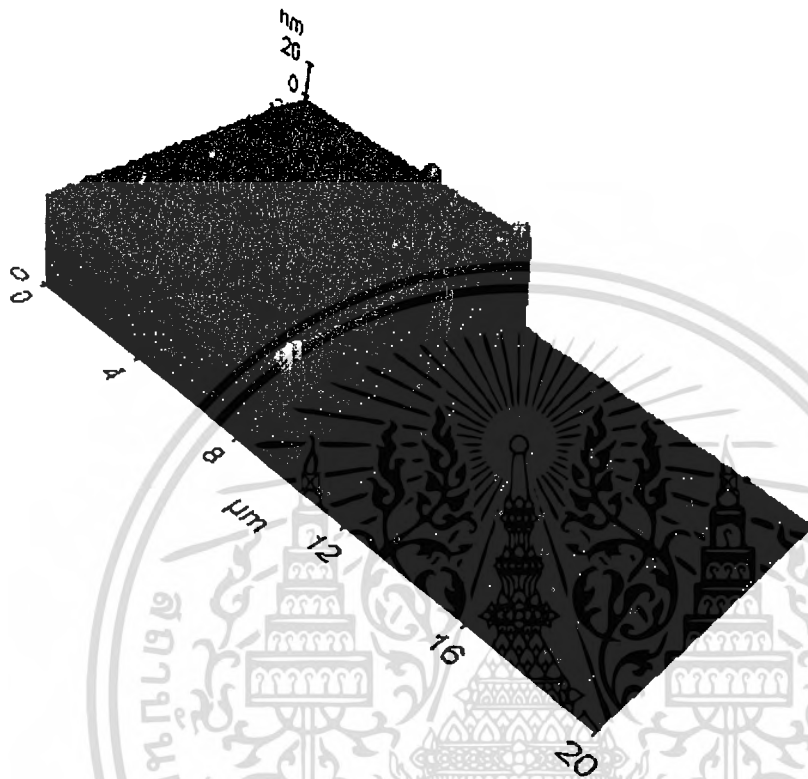
รูปที่ 2.35 แผนภาพของ Scanning Probe Microscope (SPM)



รูปที่ 2.36 หัววัด (Cantilever) ของเครื่อง AFM ซึ่งถ่ายภาพจาก SEM

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความเรียบและความหนาฟิล์มได้แม่นยำโดยเสนอภาพเป็นแบบสามมิติแสดงดังตัวอย่างดังรูปที่ 2.37 ดังนี้ เป็นการวิเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 ภาพสามมิติจากการวิเคราะห์ด้วย AFM

### 2.7.3 Ellipsometry

Ellipsometry เป็นการวัดความเปลี่ยนแปลงของ polarization เช่น แสงสะท้อนกลับหรือ ทะลุผ่านจากวัตถุ(material structure) การเปลี่ยนแปลงของ polarization จะถูกแทนด้วย amplitude ratio ( $\Psi$ ) และ phase difference ( $\Delta$ ) การวัดค่าการตอบสนองเหล่านั้นซึ่งขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติทางแสง(optical property) และความหนาของวัสดุแต่ละชนิด ดังนั้น ellipsometry จึงมักใช้ในการหาค่าความหนาของฟิล์มและ ค่าคงที่ทางแสงต่างๆ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังนำมาประยุกต์ใช้ในการหาส่วนประกอบของฟิล์ม , ความขรุขระ และคุณสมบัติด้านอื่นๆของสารที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสง

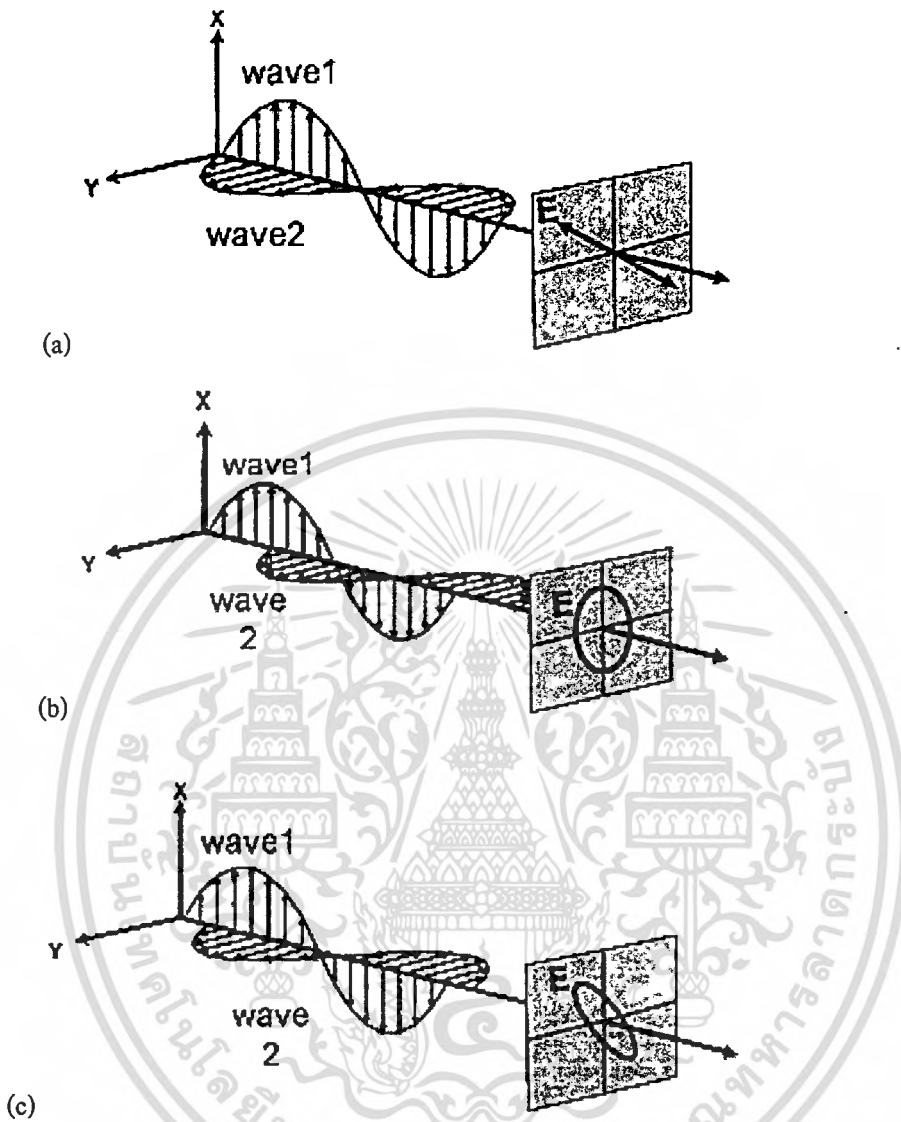
ในปี 1960 (2503) ขณะที่ ellipsometry ถูกพัฒนาเพื่อให้มีความไว (sensitivity) ที่จำเป็นในการวัด ชั้นของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ในหน่วยนาโนเมตร ความสนใจใน ellipsometry เพิ่มขึ้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับลงที่ ทุกวันนี้การประยุกต์ใช้เครื่องมือชิ้นนี้ได้ขยายวงกว้างไปสู่การใช้ในการวิจัยพื้นฐานทางฟิสิกส์, semiconductor และการจัดเก็บข้อมูล, โครงข่ายการติดต่อสื่อสาร, และการเคลือบเส้นส์ และการที่ ellipsometry มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจาก ในงานหลายชนิดนั้นจำเป็นต้องใช้ ฟิล์มบางเป็นส่วนประกอบ อีกทั้งเครื่องมือชนิดนี้มีความยืดหยุ่น สามารถใช้วัดกับวัสดุได้เกือบทุกชนิดไม่ว่าจะเป็น ตัวนำ, สารกึ่งตัวนำ, เหล็ก, สารอินทรีย์, สารที่เคลือบด้วยวัสดุชีวภาพ, และ วัสดุที่มีองค์ประกอบผสม

### 2.7.3.1 แสง และ การเกิด polarization

แสงสามารถกล่าวได้ว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่วิ่งผ่านที่ว่าง จุดประสงค์ของ ellipsometry คือ การพิจารณาลักษณะของคลื่นในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงของเวลา และ space ที่เราเรียกว่า polarization สนามไฟฟ้าของคลื่นจะเปลี่ยนแปลงแบบตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่เสมอ ดังนั้นคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามแนวแกน z จะสามารถทราบได้จากส่วนประกอบของมันในแกน x และ แกน y (x- and y-components) เมื่อแสงอยู่ในภาวะที่ทิศทางและเฟสเป็นไปแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely random orientation and phase) นั่นคือจะอยู่ในภาวะ unpolarized สำหรับหลักการของ ellipsometry เราสนใจชนิดของสนามไฟฟ้าที่เกิดในทิศทางจำเพาะและรูปร่างที่แตกต่างไปในแต่ละจุด ที่เรารู้จักกันในชื่อ polarized light เมื่อ 2 คลื่นอยู่ในเฟสเดียวกัน (in-phase) แสงที่เกิดขึ้นจะเป็นแสงที่ polarized ในแนวเส้น (linearly polarized) ดังแสดงในรูปที่ 2.38a relative amplitudes จะบอกถึงทิศทางที่เกิดขึ้น (resulting orientation) แต่ถ้า orthogonal waves ตั้งฉากกัน แต่มี amplitude ที่เท่ากัน แสงที่เกิดขึ้นจะเป็น circularly polarized ดังแสดงในรูปที่ 2.38b ส่วนแสง polarized ที่พบบ่อยที่สุดคือแบบวงรี (elliptical) ซึ่งเกิดจากการที่ orthogonal waves มีเฟส และ amplitude ที่ arbitrary กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.38c นี่คือที่มาของชื่อ ellipsometry



รูปที่ 2.38 ตัวอย่างการเกิด Polarization แบบต่างๆ

a การเกิด polarized ในแนวเส้น; b การเกิด polarized แบบวงกลม; และ c การเกิด polarized แบบวงรี elliptical.

มีค่า 2 ค่าที่ใช้บอกคุณสมบัติทางแสง (electrical properties) ว่าแสงทำปฏิกิริยากับวัสดุนั้นๆ อย่างไร ส่วนใหญ่มักจะอยู่ในรูปของตัวเลขที่ซับซ้อน (complex number) the complex refractive index ประกอบด้วย ดัชนีการหักเห Index ( $n$ ) และค่าคงที่การดูดกลืนแสง extinction coefficient ( $k$ )

$$\tilde{n} = n + ik \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ อีกแบบหนึ่งเราสามารถแสดงคุณสมบัติทางแสง (Electrical properties) โดยแสดงในรูปของ complex dielectric function คือ

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.19)$$

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง Conventions คือ

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{n}^2 \quad (2.20)$$

ค่า (index) ที่บอกถึงความเร็วเฟส (phase velocity) ของแสง ในขณะที่มันผ่านวัสดุเทียบกับความเร็วแสง ในสุญญากาศคือ  $c$

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.21)$$

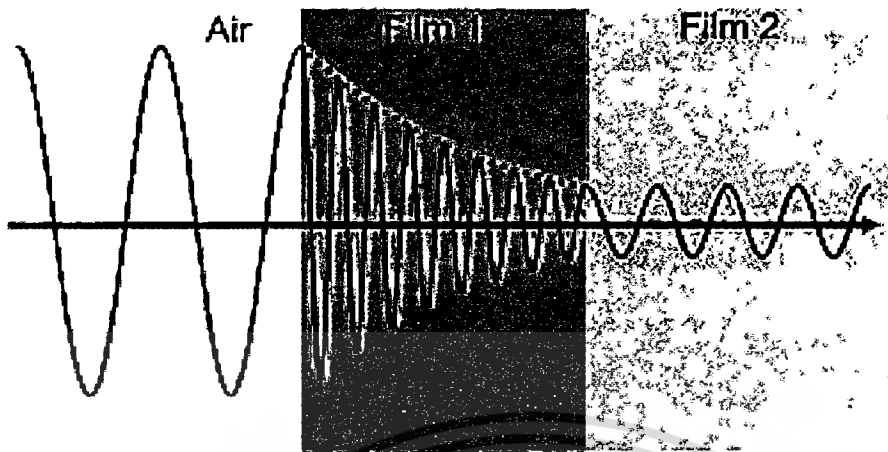
แสงจะเดินทางช้าลงในขณะที่มันผ่านวัสดุที่มีค่า index สูง เนื่องจากความถี่ของคลื่นแสงยังคงมีค่าคงที่ แต่ความยาวคลื่นลดลง ส่วน extinction coefficient ( $k$ ) บอกถึงพลังงานของคลื่นที่สูญเสียไปให้กับวัสดุ ที่ผ่าน ซึ่งจะสัมพันธ์กับ absorption coefficient ( $\alpha$ ) ดังนี้

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.22)$$

แสงจะมีการสูญเสียความเข้มแสง (Intensity) ไปในขณะที่ผ่านวัสดุที่ดูดกลืนแสง (absorbing materials) ตามกฎของBeer (Beer's Law)

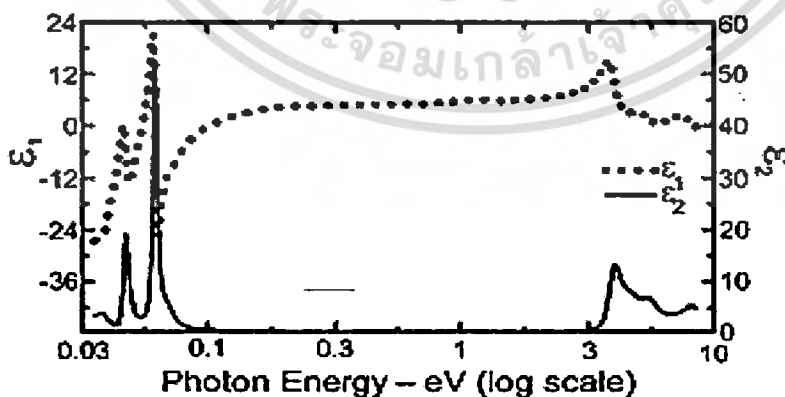
$$I(z) = I(0)e^{-\alpha z} \quad (2.23)$$

ดังนั้น Extinction coefficient ( $k$ ) จะขึ้นกับว่าแสง vanish ในวัสดุนั้น ได้เร็วแค่ไหน ดังแสดงใน รูป 2.40 แสงเดินทางผ่านวัสดุ 2 ชนิดที่ต่างกันก่อนจะกลับออกไปสู่ ambient



รูปที่ 2.39 ปรากฏการณ์ที่แสงเปลี่ยนแปลงความเร็วในวัสดุต่างชนิดกัน

ค่าคงที่ทางแสง (Optical constants) ของ  $\text{TiO}_2$  จากช่วง ultraviolet (UV) ไปจนถึง infrared (IR) แสดงในรูป 2.40 ค่าคงที่ทางแสงนั้นจะถูกกำหนดโดยความยาวคลื่นที่ดูดกลืน ( $k > 0$ ) ที่เกิดขึ้นในทั้ง UV และ IR เนื่องจากกลไกที่ต่างกันที่จะดูดพลังงานจากคลื่นแสง การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (IR absorption) ส่วนใหญ่เกิดจากการสั่นของโมเลกุล (molecular vibration), การสั่นของโฟตอน (photon vibration), หรือ free carriers การดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet absorption) โดยทั่วไปจะเกิดจาก electronic transitions เนื่องจากแสงเป็นตัวให้พลังงานเพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอน (excite an electron) ให้ไปอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น (elevated state) แสดงในรูป 2.40 แสดงค่าคงที่ทางแสงโดยแสดงให้เห็นว่า real and imaginary optical constant ต่างเป็นอิสระต่อกัน และรูปร่างของมันจะเป็น mathematically coupled through Kramers-Kronig consistency

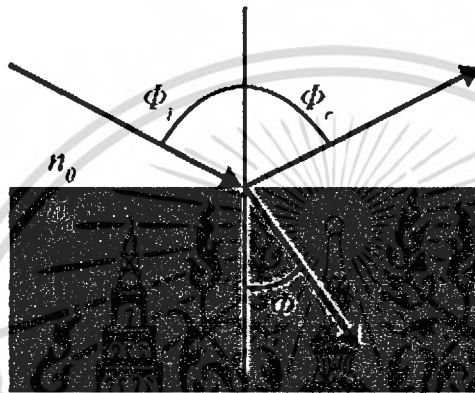


รูปที่ 2.40 ค่าคงที่ทางแสงของ  $\text{TiO}_2$  จากย่าน ultraviolet (UV) ไปจนถึง infrared (IR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของ Maxwell (Maxwell's equation) ยังเป็นที่น่าเชื่อถือเมื่อแสงตกกระทบบนวัสดุ ซึ่งจะทำให้เกิด แสงที่ตกกระทบบจะสะท้อนและหักเหที่ผิวของวัสดุ ดังแสดงใน 2.41 มุมระหว่างรังสีตกกระทบบ กับชั้นงาน จะมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนกลับ โดยแสงที่ผ่านในวัสดุจะหักเหเป็นมุม ( $\theta$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับมุมตกกระทบบ

$$n_0 \sin(\phi_i) = n_1 \sin(\phi_r) \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.41 เส้นทางการเดินของแสงหลังจากตกกระทบบกับชั้นงาน

ที่แต่ละพื้นผิวก็จะเป็นไปในทางเดียวกันคือจะมีแสงส่วนหนึ่งที่สะท้อนกลับและส่วนที่เหลือก็จะผ่าน(transmit) ไปในผิววัสดุด้วยมุมหักเห ดังแสดงใน 2.42 ทำให้เกิดผลที่แตกต่างกันของสนามไฟฟ้าที่ขนานและตั้งฉากกับผิววัสดุนั้นคือ แสงสามารถแยกเป็น orthogonal components ที่สัมพันธ์กับพื้นผิวที่แสงตกกระทบบ (plane of incidence) สนามไฟฟ้าที่ขนานและตั้งฉากกับพื้นผิวที่แสงตกกระทบบจะกำหนดให้เป็น  $p$ - และ  $s$ - polarized ตามลำดับ ซึ่งส่วนประกอบทั้งสองนี้เป็นอิสระต่อกันและสามารถนำมาแยกคำนวณได้ โดยปริมาณของแสงที่สะท้อนและผ่านไปทีในระหว่างชั้นของวัสดุ ดังแสดงในสมการ

$$r_s = \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right) = \frac{n_t \cos(\phi_i) - n_i \cos(\phi_r)}{n_t \cos(\phi_i) + n_i \cos(\phi_r)} \quad (2.25a)$$

$$r_p = \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right) = \frac{n_t \cos(\phi_r) - n_i \cos(\phi_i)}{n_t \cos(\phi_r) + n_i \cos(\phi_i)} \quad (2.25b)$$

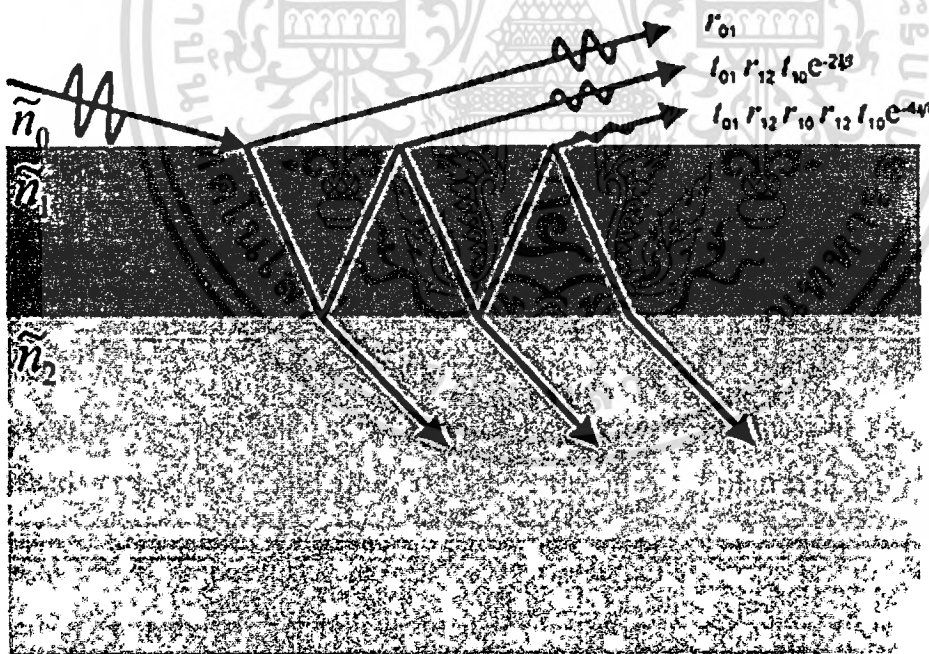
$$t_s = \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right) = \frac{2n_1 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \quad (2.25c)$$

$$t_p = \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right) = \frac{2n_1 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \quad (2.25d)$$

ฟิล์มชนิดบางและโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นหลายชั้น (thin film and multilayer structures) จะมีพื้นผิวหลายพื้นผิว (interface) และมีค่าคงที่ของแสงสะท้อนและแสงที่ผ่าน ของแต่ละพื้นผิวนั้น มันมีความจำเป็นที่จะต้องตาม relative phase ของแต่ละส่วนประกอบของแสงนั้นเพื่อจะบอกถึงปริมาณแสงที่สะท้อนและแสงที่ผ่านวัสดุทั้งหมดได้อย่างถูกต้อง โดยเราจะหาค่าความหนาของฟิล์มได้จาก

$$\beta = 2\pi \left( \frac{t_1}{\lambda} \right) n_1 \cos(\theta_1) \quad (2.26)$$

The superposition ของความยาวคลื่นแสงหลายๆค่า นั้น ทำให้เกิด interference โดยจะขึ้นอยู่กับ relative phase ของแต่ละความยาวคลื่น โดยในรูปที่ 2.43 แสดงถึงการรวมกันของความยาวคลื่นแสงที่สะท้อน และค่าจากการคำนวณตามสมการของ Fresnel



รูปที่ 2.42 เส้นทางารเดินของแสงหลังจากตกกระทบกับชั้นงาน

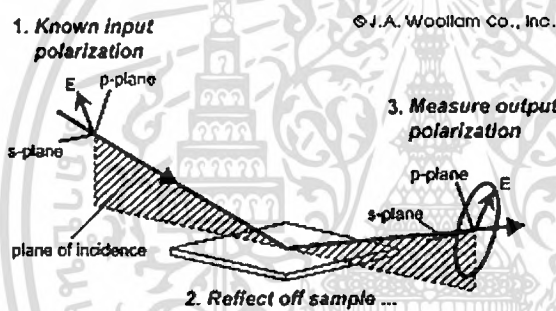
### 2.7.3.2 หลักการทำงานของเครื่อง Ellipsometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ellipsometry คือการสนใจว่าส่วนประกอบ *p*- และ *s*- ของแสง จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยสะท้อนหรือผ่านเป็นจำนวนเท่าใดของอีกรงค์ประกอบหนึ่ง ในตัวอย่างนี้ แสงที่อ้างอิงจะเป็นส่วนหนึ่งในการทดลองนี้ด้วย แสง polarize ที่ทราบค่าจะสะท้อนและผ่านจากชิ้นงาน และ แสงสะท้อนจะถูกวัด การเปลี่ยนแปลงของ polarization คือการวัดโดย ellipsometry ซึ่งเขียนเป็นสมการดังนี้

$$\rho = \tan(\Psi)e^{i\Delta} \quad (2.27)$$

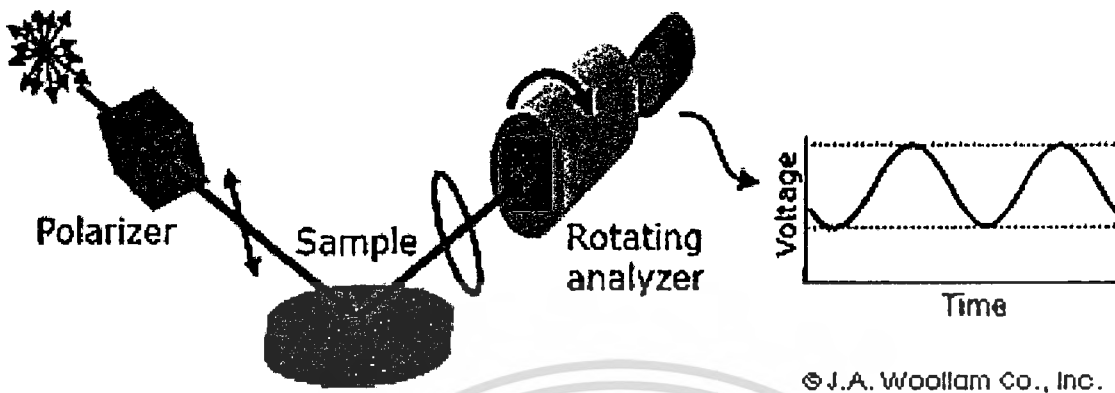
รูปที่ 2.43 แสดงให้เห็นตัวอย่างของการวัดโดย Ellipsometry ของแสงที่ตกกระทบจะ linear กับทั้ง *p*- และ *s*-components แสงที่สะท้อนทั้ง *p*- และ *s*- components จะมีขนาดและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป ellipsometry คือการวัดความเปลี่ยนแปลงดังกล่าว



รูปที่ 2.43 รูปแบบพื้นฐานของการวัด Ellipsometer

เครื่องมือเบื้องต้นในการเก็บข้อมูลสำหรับการวัดโดย ellipsometry คือ แหล่งกำเนิดแสง , ชุดสร้างแสงโพลาไรด์ (Polarization generator), ชิ้นงาน, ชุดวิเคราะห์การเกิดโพลาไรด์ (polarization analyzer) และตัวรับแสง (detector) ชุดสร้างแสงโพลาไรด์ จะเป็นตัวสร้างองค์ประกอบทางแสง เพื่อที่จะกำหนด polarization นั่นคือจะมี polarizer, compensators และ phase modulators ส่วนประกอบทั่วไปใน ellipsometer จะประกอบด้วย rotating analyzer(RAE) และ phase modulation (PME)

โดย RAE configuration แสดงใน รูปที่ 2.44 แหล่งกำเนิดแสงจะสร้าง unpolarized light แล้วจะส่งผ่านมาทาง polarizer polarizer จะให้แสงผ่านที่ preferred electric field orientation ผ่าน แกนของ polarizer จะอยู่ระหว่าง *p*- และ *s*-planes ซึ่งก็คือจุดที่ทั้งสององค์ประกอบมาถึงพื้นผิวของ sample



รูปที่ 2.44 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง Ellipsometer

แสง polarize ที่เป็นแนวเส้นจะสะท้อนจากพื้นผิวของ sample กลายเป็น elliptical polarized และเดินทางผ่าน polarizer โดยปริมาณแสงที่ยอมให้ผ่านจะขึ้นอยู่กับ polarizer orientation ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าที่ออกมาเป็นวงรีจาก sample หลังจากนั้น detector จะแปลงแสงไปเป็นสัญญาณ electronic เพื่อหา reflected polarization และข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ input polarization ที่รู้ค่าเพื่อหาว่า polarization เปลี่ยนไปเท่าใดจากการสะท้อนกับ sample

### 2.7.3.3 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่อง Ellipsometer

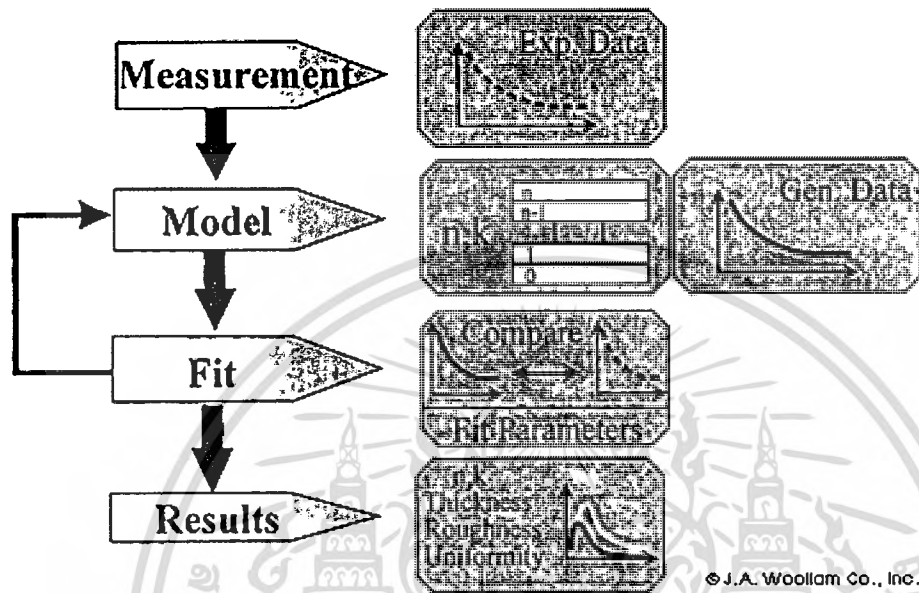
Ellipsometry เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของ light polarization เพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุที่สนใจ เช่น ความหนาของฟิล์ม และค่าคงที่ทางแสง (optical constants) ในกรณีที่เป็น bulk material ในสมการของ การสะท้อนครั้งเดียว single reflection) สามารถแปลงโดยตรงเพื่อหา pseudo optical constants จากการวัด ellipsometry

$$\langle \tilde{\epsilon} \rangle = \sin^2(\varnothing) \left[ 1 + \tan^2(\varnothing) \left( \frac{1-\rho}{1+\rho} \right) \right] \quad (2.28)$$

สมการนี้กำหนดให้ไม่มี ชั้นสิ่งปลอมปน อย่างไรก็ตาม ในทุกวัสดุมักจะมี ชั้นของฟิล์มออกไซด์ หรือ ความขรุขระ และการแปลงโดยตรงนี้จะรวมค่านี้เป็นส่วนหนึ่งของ bulk optical constants ด้วย วิธีการที่มักจะใช้เพื่อ คำนวณค่าจากการวัด ellipsometry แสดงใน รูปที่ 2.45 เนื่องจากว่าเราไม่สามารถเขียนสมการที่ถูกต้องได้จึงต้องใช้ regression analysis บ่อยครั้งที่คำตอบจะ over-determined จากข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายร้อยที่ได้จากการทดลองเพื่อหาค่าที่ต้องการเพียงไม่กี่ค่า regression analysis จะช่วยนำข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมดมาใช้ในการหาค่าตอบ



รูปที่ 2.45 ขั้นตอนการทำงานของเครื่อง Ellipsometer

การวิเคราะห์ข้อมูลจะดำเนินดังนี้ คือหลังจากขึ้นงานถูกวัด จะมีการสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบาย แบบจำลองของชั้นงาน ก็จะถูกใช้ในการคำนวณ ค่าที่ควรจะเป็นจากสมการของ Fresnel ซึ่งอธิบายวัตถุแต่ละชนิดจากความหนา และ ค่าคงที่ทางแสงที่รู้ค่า ถ้าหากค่าที่คำนวณได้เป็นค่าที่ไม่รู้จัก ก็จะได้เป็นค่าประมาณเพื่อใช้คำนวณเบื้องต้น (preliminary calculation) ค่าที่คำนวณได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง ค่าคุณสมบัติของสารที่เราต้องการทราบจะนำไปกระจาย เพื่อจับคู่ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลองได้ดียิ่งขึ้น จำนวนของคุณสมบัติที่ไม่ทราบไม่ควรเกินกว่าจำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ตัวอย่างเช่น single-wavelength ellipsometer จะให้ค่า 2 จุด ( $\Delta, \psi$ ) ทำให้สามารถหาค่าคุณสมบัติของสารได้มากที่สุด 2 ค่า การหาจุดที่เหมาะสมกันที่สุดระหว่างmodel และการทำการทดลองนั้นสามารถทำได้โดยการใช้ regression การประมาณค่าเช่น การใช้ the mean squared error(MSE) จะใช้ในการหาปริมาณความแตกต่างระหว่าง curves และ unknown parameter สามารถ vary ได้จนถึง minimum MSE

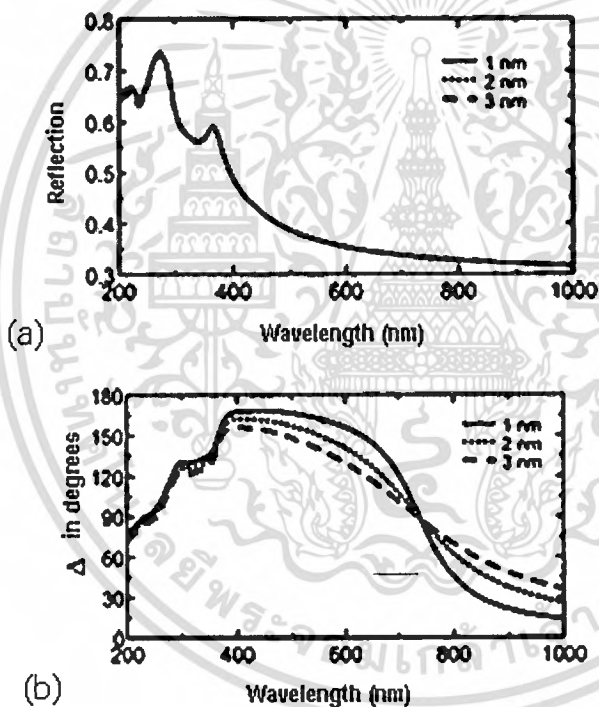
คำตอบที่ดีที่สุดจะเป็นไปตามค่า MSE ที่ค่าที่สุด ซึ่งคำนึงถึงค่าความหนาของฟิล์มที่ถูกต้องการ อาจมีความเป็นไปได้ว่า regression algorithm อาจให้ค่าที่ผิดและตกอยู่ใน local minima ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาเริ่มต้นและ MSE structure conditions เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ด้วยตาของค่า MSE ต่ำสุด กับ local minima จะทำให้เราสามารถแยกแยะค่า minima ที่แท้จริงได้ง่ายขึ้น

### 2.7.3.3 การวัดความหนาของฟิล์ม

ความหนาของฟิล์มจะถูกบอกได้จากการแทรกสอดระหว่างแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวและแสงที่เดินทางผ่านแผ่นฟิล์ม เมื่อพิจารณาตามเฟสที่มาถึงพื้นผิว การแทรกสอดสามารถแบ่งได้เป็น constructive หรือ destructive การแทรกสอดหมายถึงทั้ง amplitude และเฟส จากความต่างที่เกิดจากความหนาของฟิล์ม และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มของแสงสะท้อน และ ellipsometry ของ ฟิล์ม ในขณะที่การสะท้อนของแสง มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าของ  $\Delta$  มีความหลากหลายมาก



รูปที่ 2.46 a ระดับการสะท้อนแสงของ SiO<sub>2</sub> ที่มีความหนาต่างกัน ที่มีความหนาต่างกัน,

b ค่าความแตกต่างทางเฟสของ SiO<sub>2</sub> ที่มีความหนาต่างกัน

Ellipsometry มักจะใช้สำหรับฟิล์มที่มีความหนาตั้งแต่ระดับ sub-nanometers ไปจนถึง 2-3 ไมครอน ถ้าฟิล์มมีความหนามากกว่า several tens of microns การสั่นของการแทรกสอด (interference oscillations) จะเพิ่มขึ้นทำให้ยากแก่การ resolve ยกเว้นในกรณีของความยาวคลื่นที่ยาวกว่าอินฟราเรด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นในกรณีเช่นนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาความหนาแน่นต้องรู้แสงที่เดินทางผ่านไปในฟิล์มและแสงที่กลับมาที่พื้นผิว ( return to the surface) ถ้าวัตถุนั้นดูดกลืนแสง การวัดความหนาโดย optical instruments จะถูกจำกัดโดย thin, semi-opaque layer การจำกัดนี้สามารถ circumvented โดย targeting การวัดให้อยู่ในช่วงสเปกตรัมที่มีการดูดกลืนแสงน้อย ตัวอย่างเช่น an organic film สามารถดูดกลืนแสง UV และ IR ได้ดี แต่ก็ยังคงโปร่งใสที่ mid-visible wavelengths, เหล็กสามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่ทุกความยาวคลื่น ดังนั้น the maximum layer for thickness ส่วนใหญ่จะถูกกำหนดไว้ที่ 100 นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบการทดลอง และ ผลการทดลอง

##### 3.1 การออกแบบการทดลองเพื่อสร้าง DLC พิล์ม

ระบบค้ำสุญญากาศที่ใช้ในกระบวนการสร้าง DLC พิล์มได้ใช้ระบบของบริษัท Commonwealth โดยใช้เครื่องจักรรุ่น DLC Loadlock RF ซึ่งจะสร้างฟิล์ม DLC ด้วยวิธีการยิงลำไอออนโดยตรงไปที่ชิ้นงาน (DIRECT ION BEAM DEPOSITION) โดย DLC พิล์มจะถูกสร้างลงบนแผ่นซิลิกอน ขนาด  $0.5 \times 1.0$  cm หลังจากระบบเข้าสู่ระดับความดันที่ระดับ  $5 \times 10^{-6}$  torr หลังจากนั้นแผ่นซิลิกอนจะถูกทำความสะอาดก่อนประมาณ 5 นาทีด้วยไอออนของอาร์กอน ที่มีพลังงาน RF เท่ากับ 280 W หลังจากนั้น DLC พิล์มจะถูกสร้างจากพลัสมาของ  $C_2H_4$  และ  $CH_4$  โดยมีพลังงาน RF เท่ากับ 250 W จนกระทั่งได้ฟิล์ม DLC ที่มีความหนาประมาณ 60 นาโนเมตร โดยในการทดลองนี้จะทำการเพิ่มอัตราส่วนของ  $C_2H_4$  ต่อ  $CH_4$  จาก 0/35 sccm/min ถึง 30/5 sccm/min ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของ  $C_2H_4$  ต่อ  $CH_4$  ในแต่ละการทดลอง

Run Number	$CH_4$ sccm/min	$C_2H_4$ sccm/min
1	0.00	35
2	1.00	34
3	5.00	30
4	10.00	25
5	15.00	20
6	20.00	15
7	25.00	10
8	30.00	5

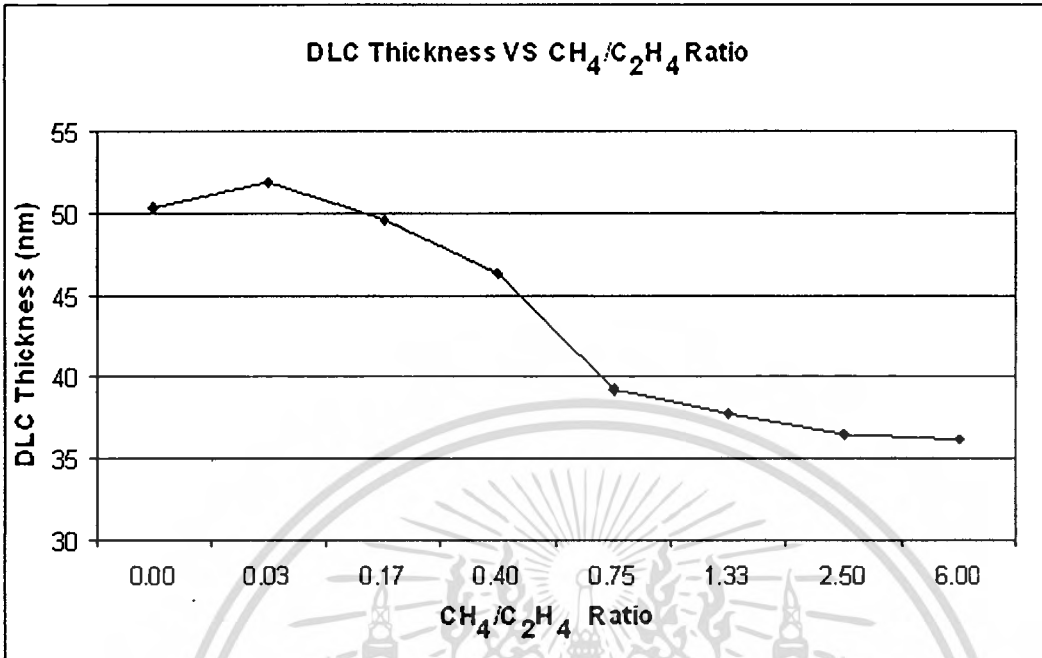
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ความหนาของ DLC फिल्मที่ได้จากการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างมีเทนต่อเอทิลีน จาก 0/35 ถึง 30/5 และทำการการปลูกฟิล์มเป็นเวลา 20 นาทีเท่ากันในทุกการทดลอง

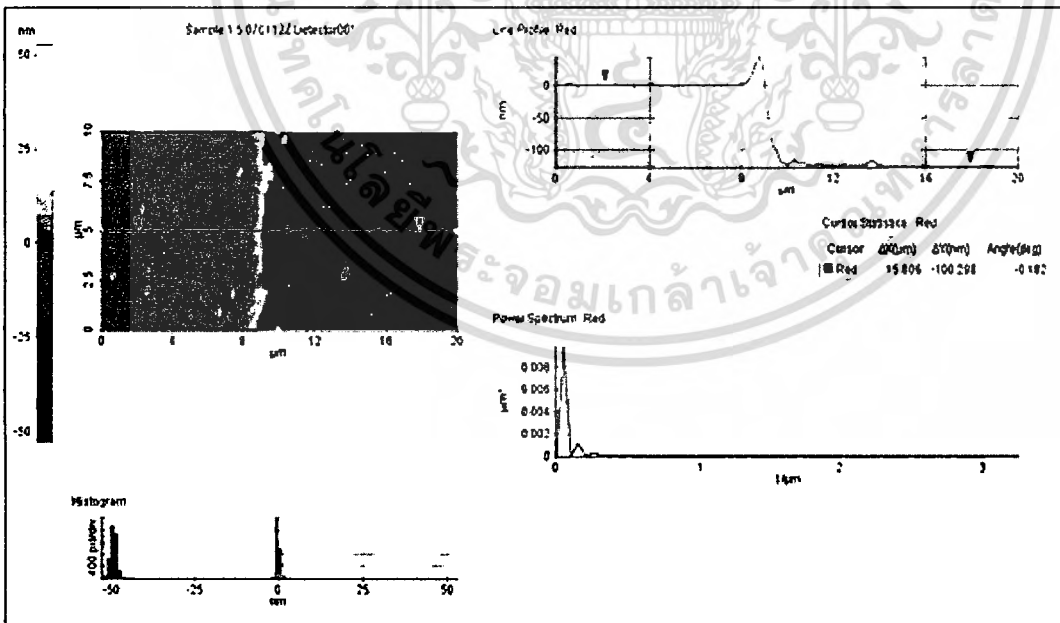
ในแต่ละการทดลองจะใช้เวลาในการปลูกฟิล์มในเวลาเท่ากัน เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นจะใช้เครื่อง AFM ของบริษัท PSIA โดยใช้เครื่องจักรรุ่น XE-HDD ในการวัดความหนาของ DLC फिल्म ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งแต่ละการทดลองจะให้อัตราการปลูกฟิล์มที่แตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ รูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 ความหนาของ DLC फिल्मที่ได้ในแต่ละการทดลองที่เวลา 20 นาที

Run Number	CH <sub>4</sub> sccm/min	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> sccm/min	DLC film Thickness (nm)
1	0	35	50.298
2	1	34	51.842
3	5	30	49.536
4	10	25	46.352
5	15	20	39.239
6	20	15	37.791
7	25	10	36.489
8	30	5	36.126



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ DLC ฟิล์มกับอัตราส่วนของ  $\text{C}_2\text{H}_4$  ต่อ  $\text{CH}_4$



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างผลการวัดความหนาของ DLC ฟิล์มด้วยเครื่อง AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

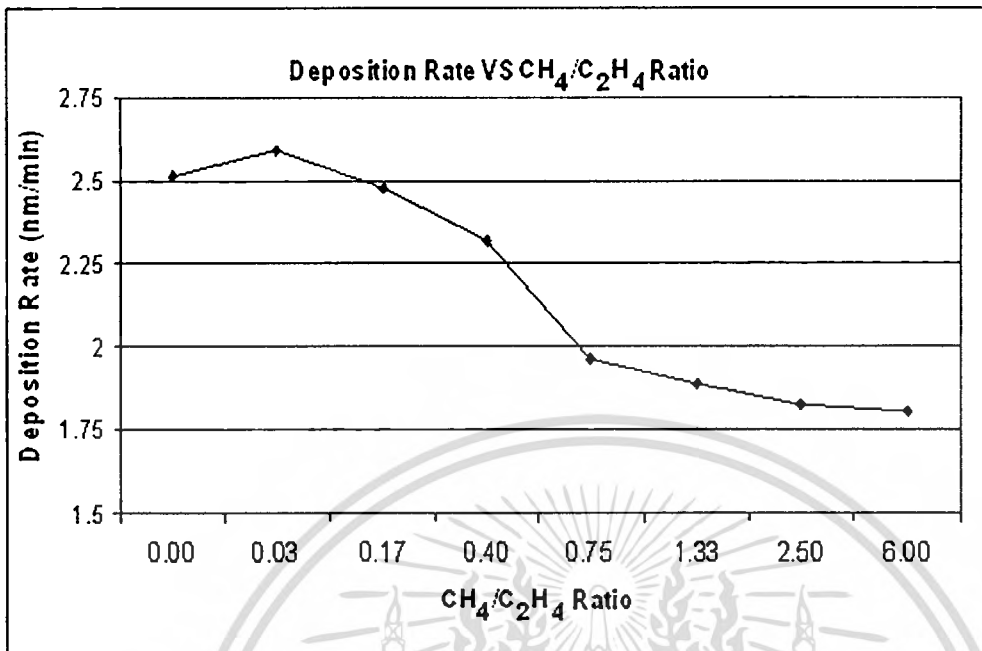
อัตราการปลูกฟิล์มเทียบกับ อัตราส่วนของมีเทนต่อเอทิลีนจาก 0/35 ถึง 30/5

หลังจากได้ค่าความหนาของ DLC ฟิล์มจาก ตารางที่ 3.2 แล้วก็ทำการหาอัตราการปลูกฟิล์มเทียบกับ อัตราส่วนของมีเทนต่อเอทิลีนจาก 0/35 ถึง 30/5 ก็จะได้อัตราการปลูก DLC ฟิล์มดัง แสดงในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มเทียบกับ อัตราส่วนของมีเทนต่อเอทิลีน

Run Number	CH <sub>4</sub> sccm/min	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> sccm/min	Deposition rate nm/min
1	0	35	2.5149
2	1	34	2.5921
3	5	30	2.4768
4	10	25	2.3176
5	15	20	1.96195
6	20	15	1.88955
7	25	10	1.82445
8	30	5	1.8063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มเทียบกับ อัตราส่วนของมีเทนต่อเอทิลีน

การออกแบบการทดลองเพื่อสร้าง DLC ฟิล์มที่มีความหนา 100 นาโนเมตร

หลังจากได้อัตราการปลูกฟิล์ม ในแต่ละอัตราส่วนของมีเทนต่อเอทิลีนแล้ว ก็จะนำค่าที่ได้มาทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะสร้าง DLC ฟิล์มที่มีความหนาเท่ากันประมาณ 100 นาโนเมตร โดยแต่ละการทดลองจะมีรายละเอียดและผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เวลาในการปลูกฟิล์มและค่าความหนาของฟิล์มในแต่ละการทดลอง

Run Number	CH <sub>4</sub> sccm/min	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> sccm/min	Deposition time (min)	DLC film thickness (nm)
1	0.00	35	19.9	100.54
2	1.00	34	19.3	100.30
3	5.00	30	20.2	99.85
4	10.00	25	21.6	100.24
5	15.00	20	25.5	100.68
6	20.00	15	26.5	99.54
7	25.00	10	27.4	101.12
8	30.00	5	27.6	99.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

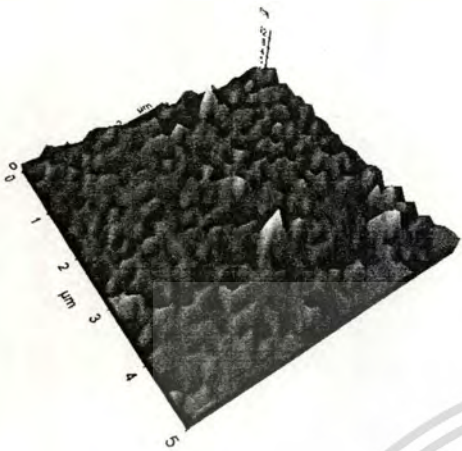
### ค่าความขรุขระของ DLC ฟิล์มในแต่ละการทดลอง

หลังจากทำการปลูกฟิล์ม DLC จนมีความหนา 100 นาโนเมตร เท่ากันทุกการทดลองแล้วก็จะนำชิ้นงานที่ได้ ไปทำการวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงาน (Roughness) โดยใช้เครื่อง Atomic force microscope หรือ AFM ทำการวัดค่าความขรุขระ ซึ่งจะทำการสุ่มตัวอย่างบนชิ้นงานแต่ละชิ้นที่ขนาด 5 ไมโครเมตร x 5 ไมโครเมตร แล้วนำรูปภาพที่ได้มาทำการหาค่าความเลียบดังแสดงดังในตารางที่ 3.5

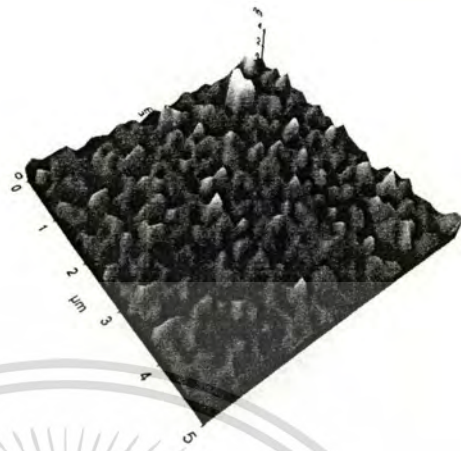
ตารางที่ 3.5 ค่าความขรุขระของฟิล์ม DLC ในแต่ละการทดลอง

Run Number	CH <sub>4</sub> sccm/min	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> sccm/min	Roughness Average (nm)
1	0	35	0.569
2	1	34	0.471
3	5	30	0.447
4	10	25	0.529
5	15	20	0.646
6	20	15	0.502
7	25	10	0.496
8	30	5	0.464

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



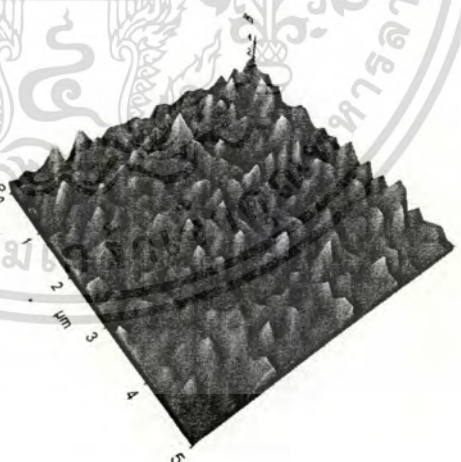
รูปที่ 3.4 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 1



รูปที่ 3.5 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.6 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 3

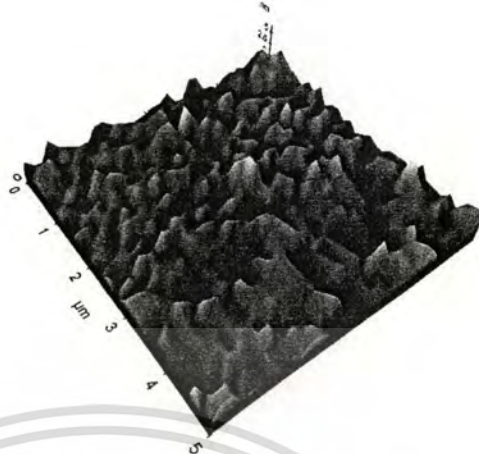


รูปที่ 3.7 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 5



รูปที่ 3.9 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 6



รูปที่ 3.10 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 7



รูปที่ 3.11 ภาพพื้นผิวที่ได้จากการทดลองที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

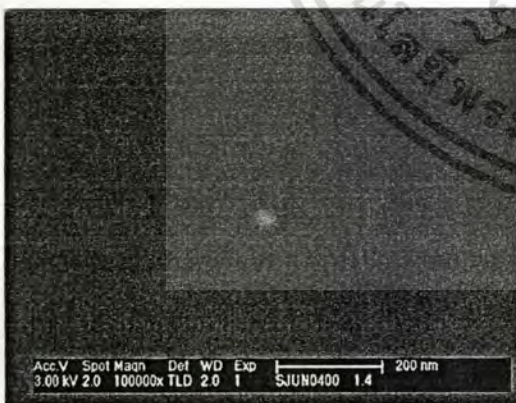
### 3.1.5 ภาพถ่ายพื้นผิวของ DLC ฟิล์มด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)

เมื่อนำชิ้นงานที่ได้ ไปทำการถ่ายภาพพื้นผิวชิ้นงาน โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope หรือ SEM เพื่อทำการศึกษาลักษณะ โครงสร้างของพื้นผิว ในแต่ละการทดลองจะพบว่าไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของสภาพพื้นผิวของ DLC ฟิล์มด้วยวิธีนี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ถึง 3.19



รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 1

รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 3

รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 4

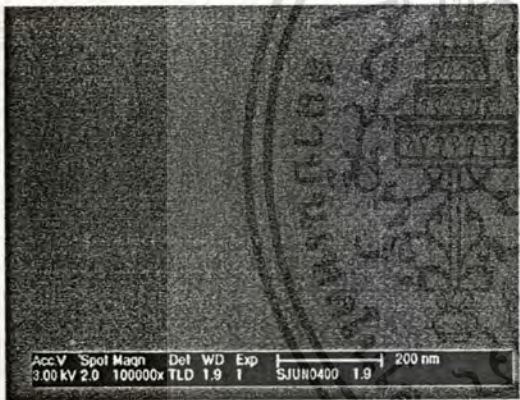
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 5



รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 6



รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 7



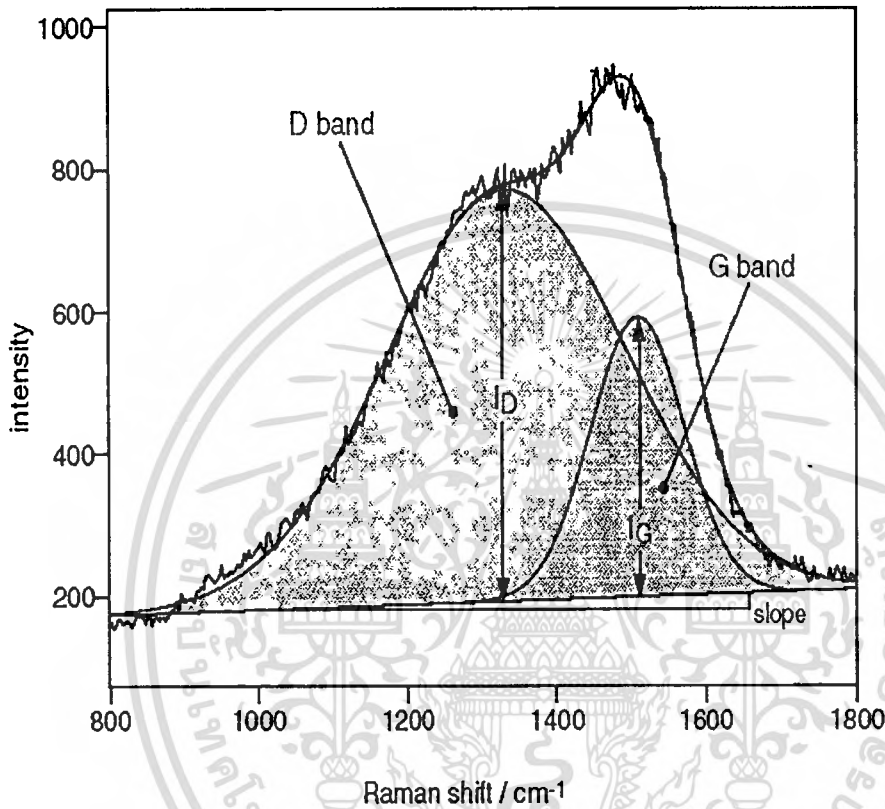
รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองที่ 8

### 3.2 การออกแบบ วิธีการวัดค่าสัญญาณ Raman ของ DLC พิล์ม

นำ DLC พิล์มที่ได้ไปวัดค่า Raman โดยใช้เครื่อง Raman Spectroscopy ของบริษัท Renishaw รุ่น Inviareflex โดยใช้เลเซอร์สีเขียว ของอาร์คอนไอออนที่มีความยาวคลื่น 514 nm ได้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50X และควบคุมค่าพลังงานของเลเซอร์ให้คงที่ที่ 20 mW เป็นเวลา 10 วินาที โดยทำการวัดค่า Raman ในช่วง  $1130\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $1800\text{ cm}^{-1}$  หลังจากนั้นนำค่าสัญญาณที่ได้ไปแยกเป็นสองพีค คือ G-Band หรือพีคที่แทนโครงสร้างของแกรไฟต์หรือ  $\text{sp}^2$  ให้ Raman band อยู่ที่ประมาณ  $1580\text{ cm}^{-1}$  และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีคที่สองซึ่งใช้แทนโครงสร้างของแกรไฟต์แบบผลึกหลายรูปจะอยู่ที่  $1360\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นดิสออร์เดอร์ จากโหมดการสั่นที่ขอบเขตเกรนของแกรไฟต์ให้เข้าสู่โครงสร้าง  $sp^3$  ถูกเรียกว่า D-Band ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างตำแหน่ง D-Band และ G-Band

โดยค่าที่ได้จากสัญญาณ Raman จะแยกออกเป็น 7 ค่าย่อยๆคือ

- 1  $I_D$  Position แทนค่าตำแหน่งกึ่งกลางของ D-Band
- 2  $I_G$  Position แทนค่าตำแหน่งกึ่งกลางของ G-Band
- 3  $I_D$  Intensity แทนค่าความสูงของตำแหน่งกึ่งกลางของ D-Band
- 4  $I_G$  Intensity แทนค่าความสูงของตำแหน่งกึ่งกลางของ G-Band
- 5  $A_D$  Area แทนค่าพื้นที่ใต้กราฟของพีค D-Band
- 6  $A_G$  Area แทนค่าพื้นที่ใต้กราฟของพีค G-Band
- 7 Slope แทนค่ามุมของเส้นฐาน (Baseline)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 ผลการวัดค่าสัญญาณ Raman ต่างๆของ DLC พิล์มในแต่ละการทดลอง

โดยผลการทดลองนำค่าสัญญาณ Raman มาวิเคราะห์จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่

3.6 และ ตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.6 ค่าสัญญาณ Raman ต่างๆของ DLC พิล์มในแต่ละการทดลอง

$\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_4$ (sccm/min)	$I_G$ Position (Raman shift $\text{cm}^{-1}$ )	$I_D$ Position (Raman shift $\text{cm}^{-1}$ )	$I_D / I_G$ Ratio	$A_D/A_G$ Ratio
0	1544.21	1353.81	0.428	0.99192
1/35'	1544.5	1359.65	0.422	0.9527
5/30'	1543.65	1351.74	0.402	0.8864
10/25'	1543.31	1353.49	0.406	0.88781
15/20'	1542.53	1359.39	0.426	0.91962
20/15'	1541.72	1358.06	0.427	0.92271
25/10'	1539.59	1353.61	0.441	1.01513
30/5'	1538.29	1348.96	0.436	1.07061

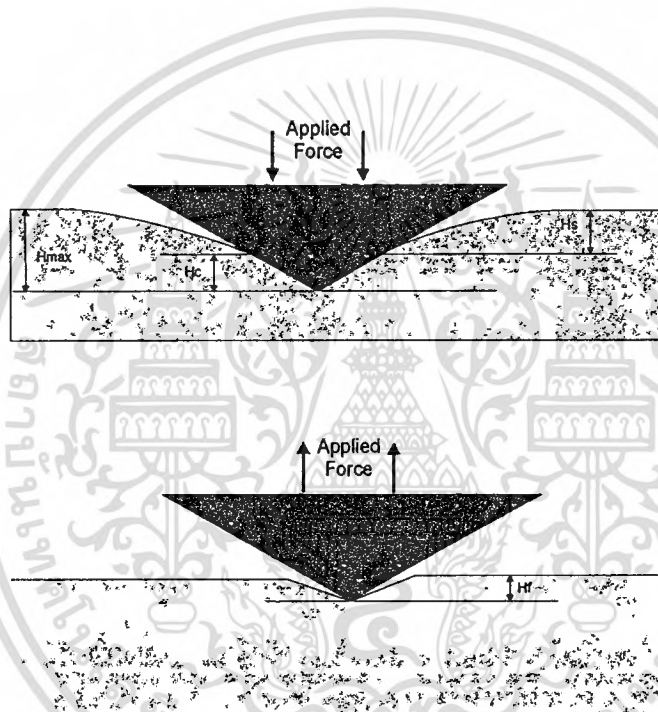
ตารางที่ 3.7 ค่าสัญญาณ Raman ต่างๆของ DLC พิล์มในแต่ละการทดลอง

$\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_4$ (sccm/min)	$I_G$ Intensity (Count)	$I_D$ Intensity (Count)	Slope (Degree)
0	16096	6884	2.715
1/35'	15222	6430	2.714
5/30'	13733	5526	2.8145
10/25'	13959	5663	2.9395
15/20'	20250	8634	3.1425
20/15'	20337	8678	3.3174
25/10'	19386	8546	3.612
30/5'	19019	8301	3.8646

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

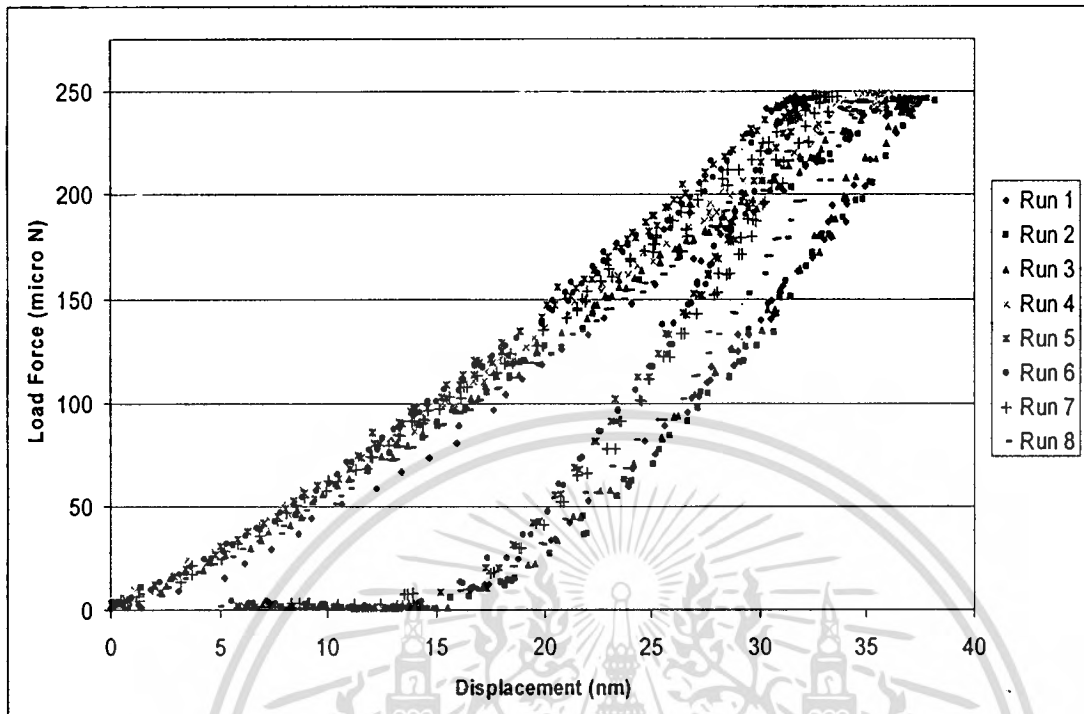
### 3.3 การออกแบบวิธีการวัดค่าความแข็งของ DLC ฟิล์ม

นำ DLC ฟิล์มที่ได้ไปทำการวัดค่าความแข็ง (Hardness) โดยใช้วิธีนาโนอินเด้นเตชัน (Nanoindentation) ในการวัดค่าความแข็งของ DLC ฟิล์ม โดยในการทดลองนี้จะใช้เครื่องวัดค่าความแข็งของบริษัท Hysitron รุ่น Triboscope 3.6FL โดยใช้แรงในการกดที่ 600 ไมโครนิวตันเป็นเวลา 22 วินาที และใช้หัวกดที่ทำจากเพชรในการ วัดค่าความแข็ง(Hardness) จะทำการคำนวณหาค่าความแข็ง จากกราฟในช่วงที่หัวเข็มเริ่มลดแรงกดและยกหัวขึ้นจากชิ้นงาน (Unload)



รูปที่ 3.21 ลักษณะการกดของหัววัดค่าความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงค่า load curve ซึ่งได้จากการวัดค่าความแข็งในแต่ละการทดลอง

### 3.3.1 ค่าความแข็งของ DLC ฟิล์มในแต่ละการทดลอง

ผลจากการทดลองและนำ DLC ฟิล์ม มาวัดและวิเคราะห์ด้วย วิธินาโนอินเด้นชั่น (Nanoindentation) จึงได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.8

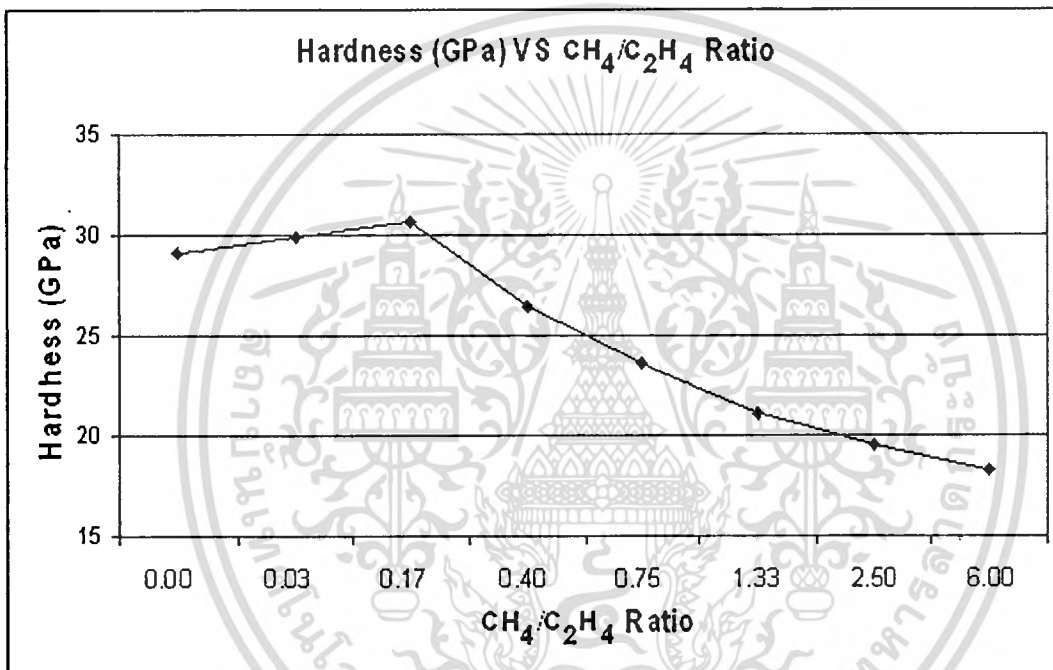
ตารางที่ 3.8 ผลการวัดค่าความแข็งของ DLC ฟิล์มด้วยวิธินาโนอินเด้นชั่น

Run Number	CH <sub>4</sub> sccm/min	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> sccm/min	Hardness (GPa)
1	0	35	29.12
2	1	34	31.11
3	5	30	32.14
4	10	25	25.99
5	15	20	24.25
6	20	15	23.39
7	25	10	22.11
8	30	5	18.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแข็งกับอัตราส่วนระหว่างมีเทนต่อเอทิลีน

เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแข็งกับอัตราส่วนระหว่างมีเทนต่อเอทิลีนจะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูป 3.23 จะเห็นว่าค่าความแข็งจะแปรผกผันกับการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างมีเทนต่อเอทิลีน

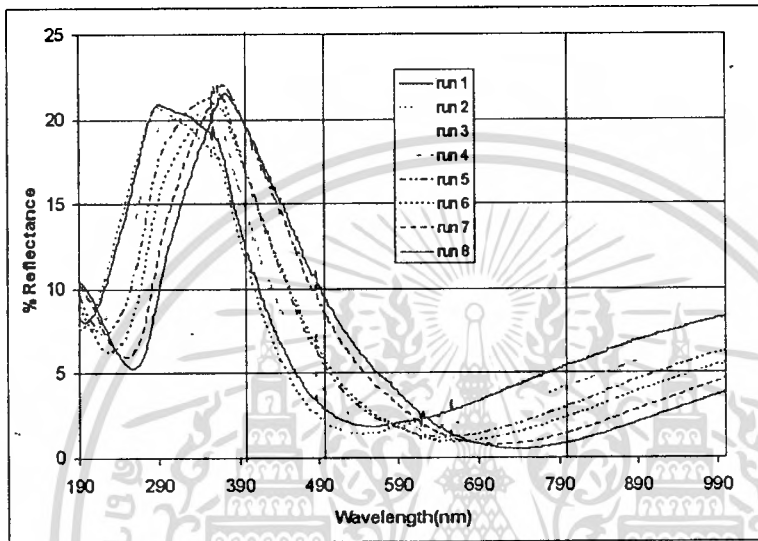


รูปที่ 3.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแข็งกับอัตราส่วนระหว่างมีเทนต่อเอทิลีน

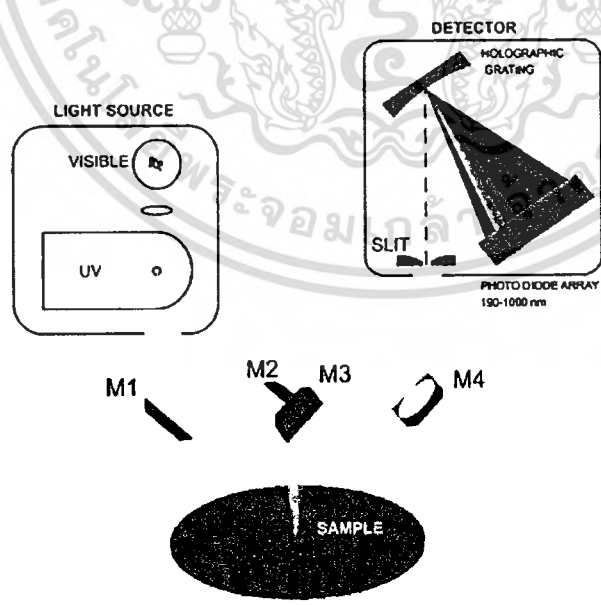
### 3.4 การออกแบบ วิธีการวัดค่าการสะท้อนแสง (Light Reflection) ของ DLC ฟิล์ม

การศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าการสะท้อนแสง โดยการนำ DLC ฟิล์มที่ได้ไปวัดค่าการสะท้อนแสง (Light Reflection) โดยใช้เครื่อง Reflxtrometer ของบริษัท N&K Technology Inc. รุ่น N&K 1500 โดยทำการวัดค่าการสะท้อนของแสงตั้งแต่ความยาวคลื่น 190 นาโนเมตร ถึง 1000 นาโนเมตรหลังจากนั้นนำค่าเปอร์เซ็นต์ การสะท้อนแสงที่ได้จาก DLC ฟิล์มแต่ละการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ซึ่งเราจะพบว่า DLC ฟิล์มในแต่ละการทดลอง

มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนของระดับเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง ในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร และในช่วงความยาวคลื่น 800-1000 นาโนเมตร และเมื่อเรานำค่าเฉลี่ยของค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของ DLC ฟิล์มในแต่ละการทดลองในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตรและช่วงความยาวคลื่น 800-1000 นาโนเมตร



รูปที่ 3.24 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของ DLC ฟิล์มในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 3.25 เส้นทางเดินของแสงในเครื่อง Reflectometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 ค่าการสะท้อนแสง (Light Reflection) ของ DLC พิล์มในแต่ละการทดลอง

เมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้งมาวัดค่าระดับสะท้อนแสง (Light Reflection) ของ DLC พิล์มด้วยเครื่องวัดระดับการสะท้อนแสงได้ดังแสดงในตารางที่ 3.9 โดยทำการแบ่งช่วงในการคำนวณออกเป็นสองช่วงคือในช่วงความยาวคลื่น 400-500 โนเมตรและช่วงความยาวคลื่น 800-1000 นาโนเมตร

ตารางที่ 3.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของ DLC พิล์มแต่ละการทดลอง

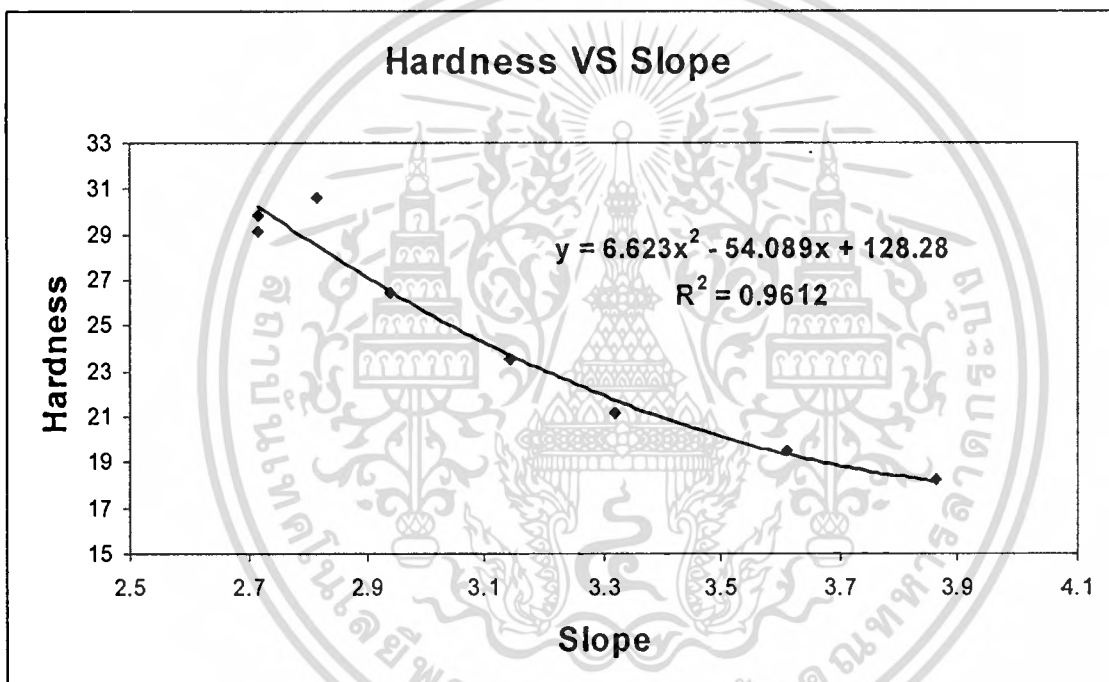
การทดลอง ที่	Average % reflectance at wavelength 400-500nm	Average %reflectance at wavelength 800-1000nm	Ratio R800-1000/ R400-500
1	7.30	9.00	1.23
2	6.62	8.80	1.33
3	5.44	9.50	1.75
4	9.23	7.76	0.84
5	10.52	6.29	0.59
6	11.74	5.93	0.51
7	14.40	4.46	0.31
8	15.88	3.55	0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

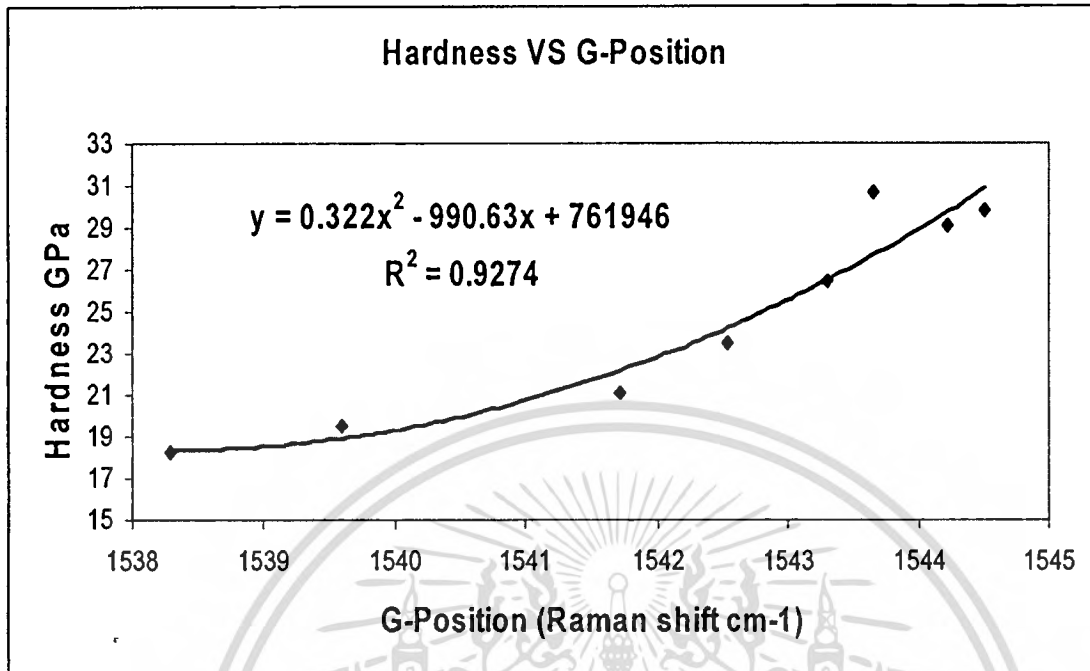
### 3.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าสัญญาณต่างๆของ DLC ฟิล์ม

#### 3.5.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าสัญญาณ Raman ต่างๆของ DLC ฟิล์ม

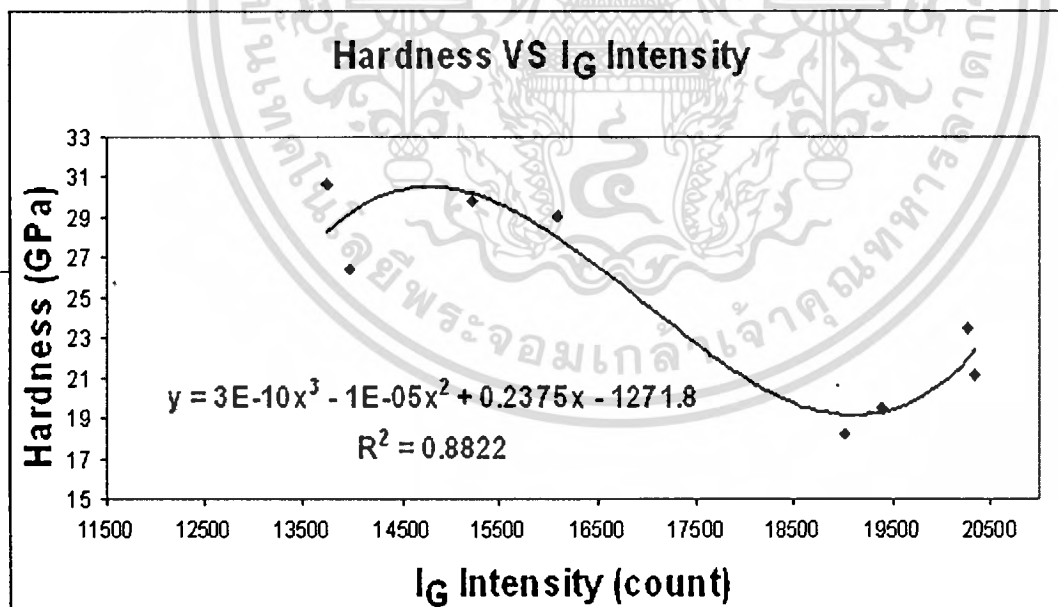
เมื่อนำผลการทดลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและค่าสัญญาณ Raman ต่างๆเรา จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าสัญญาณ Raman ต่างๆ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.26 ถึง รูปที่ 3.32 ดังจะเห็นว่าค่าความแข็งมีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับค่าความชันของเส้นฐาน (Slope) ค่า ตำแหน่งศูนย์กลางของพีคจี (G-Position) และค่าสูงสุดของพีคจี (IG-Intensity) ดังเห็นได้จากค่า R-square ซึ่งสถิติมีค่าเข้าใกล้ 1



รูปที่ 3.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความชันของเส้นฐาน กับ ค่าความแข็ง

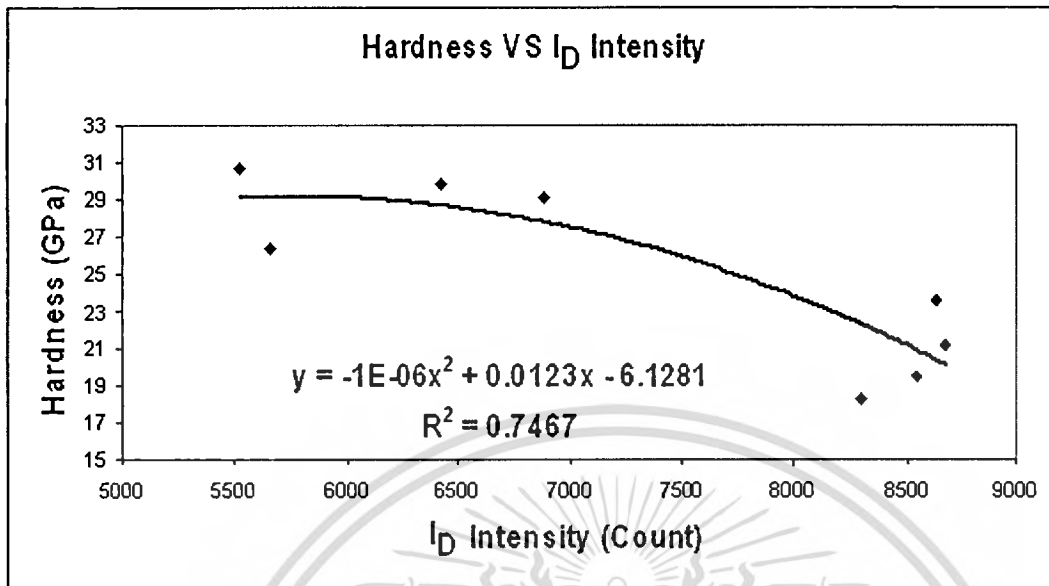


รูปที่ 3.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตำแหน่งศูนย์กลางของพีคจี กับ ค่าความแข็ง

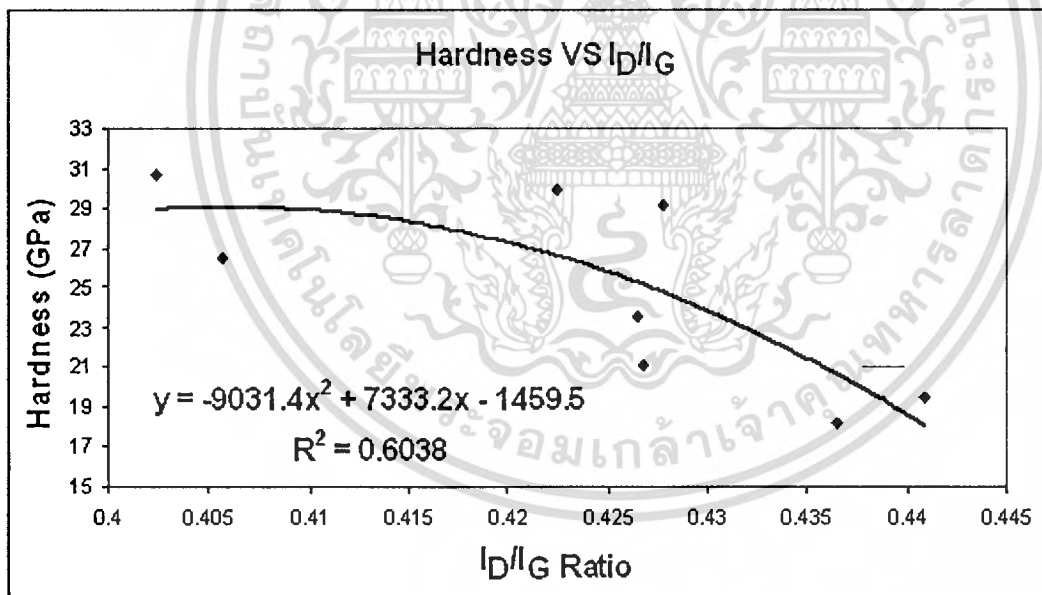


รูปที่ 3.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของพีคจี กับ ค่าความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

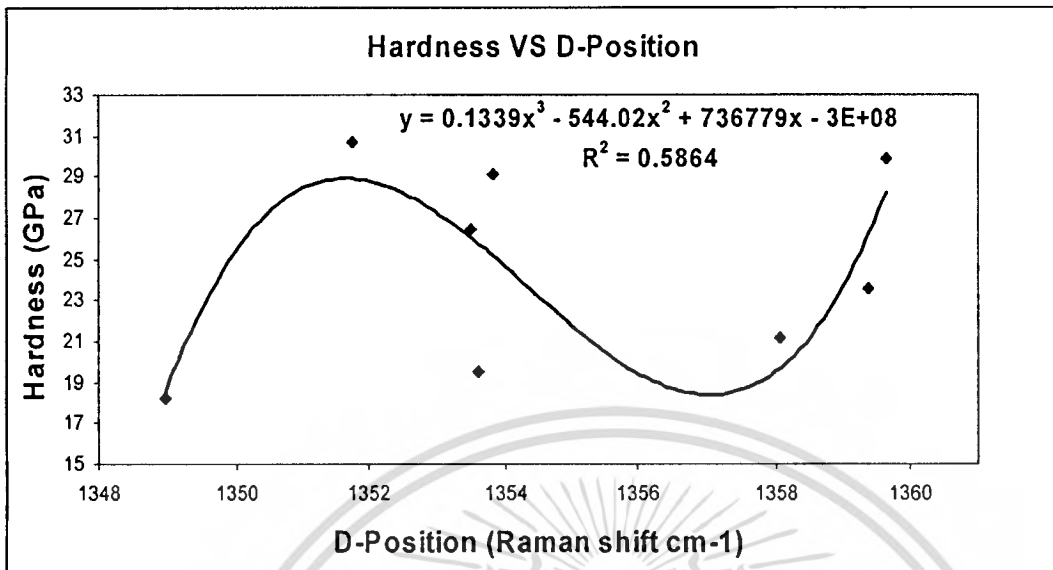


รูปที่ 3.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูงสุดของพีคดี กับ ค่าความแข็ง

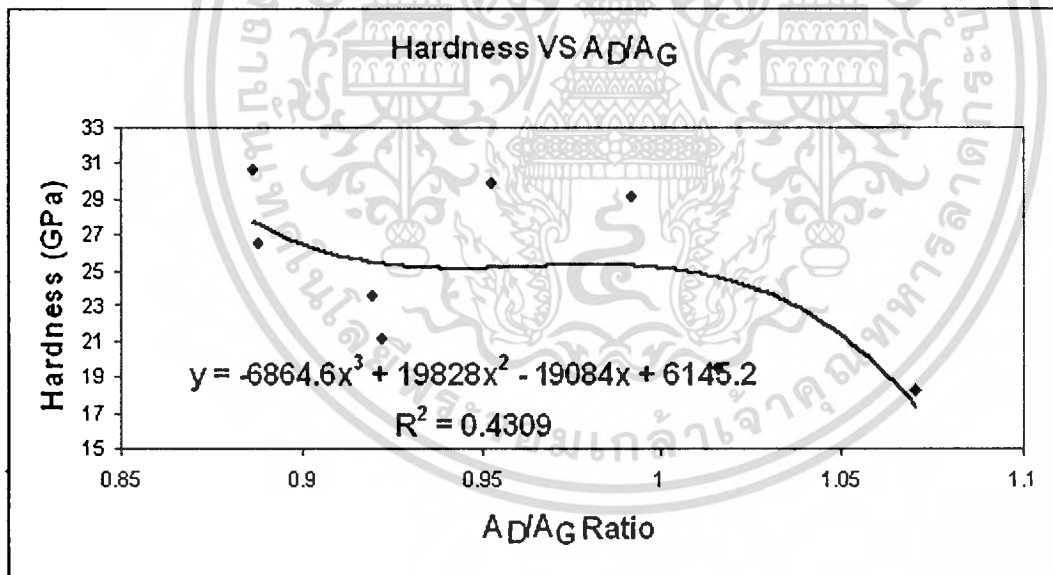


รูปที่ 3.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน  $I_D$  ต่อ  $I_G$  กับ ค่าความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตำแหน่งศูนย์กลางของพีคดี กับ ค่าความแข็ง

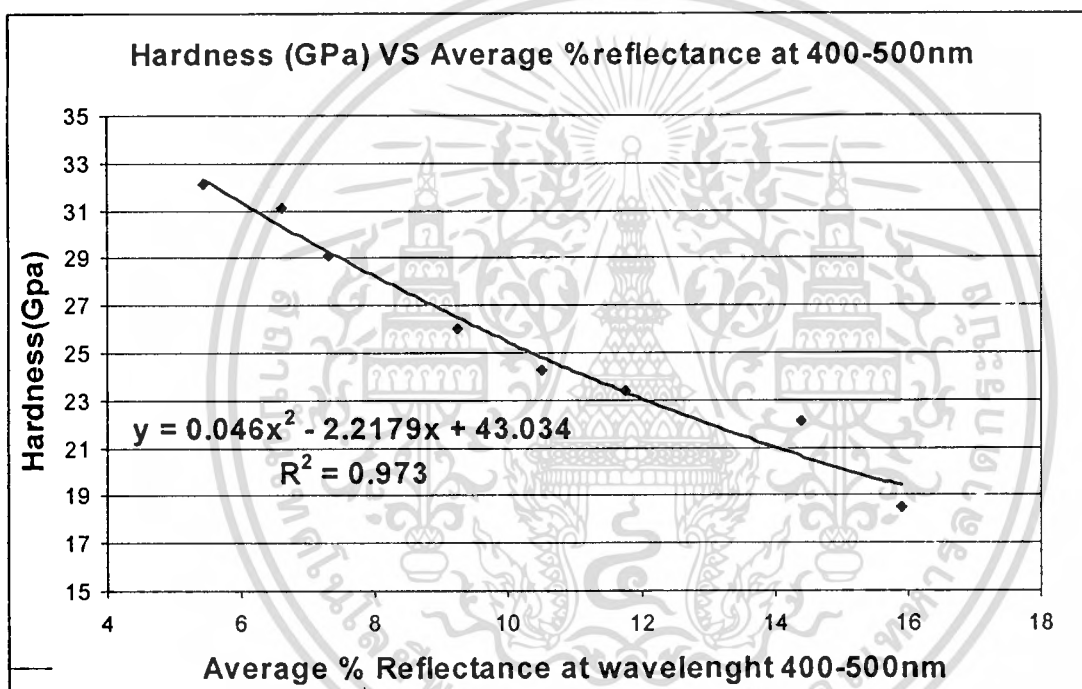


รูปที่ 3.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน AD ต่อ AG กับ ค่าความแข็ง

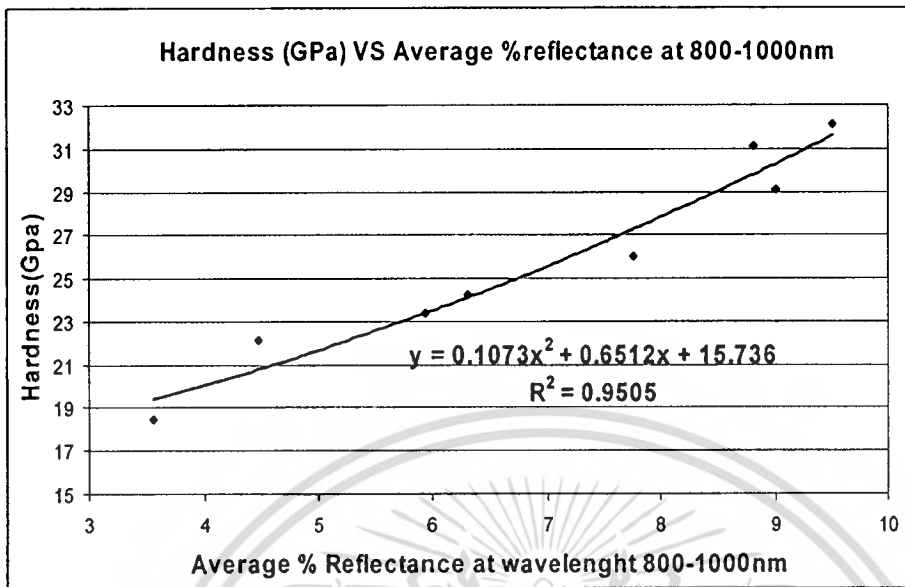
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าการสะท้อนแสงของฟิล์ม DLC

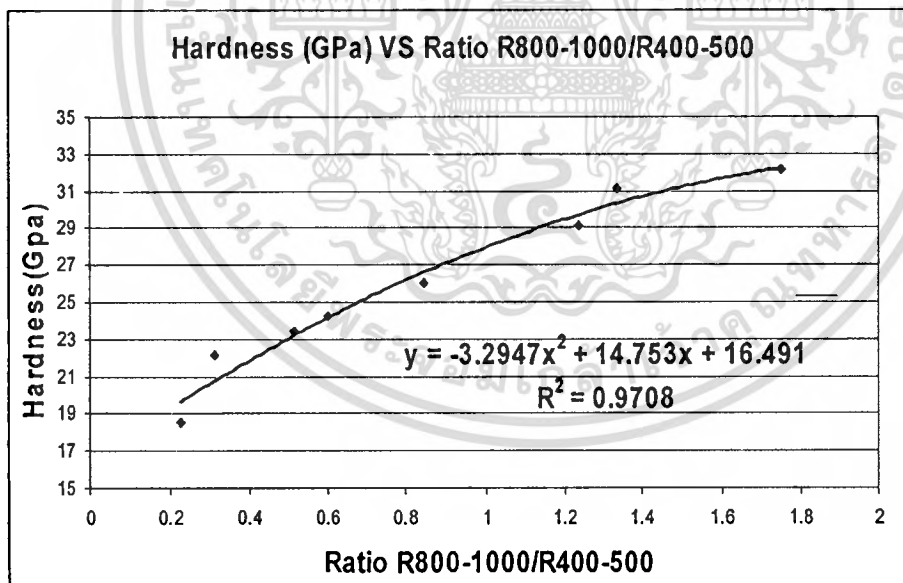
เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ การสะท้อนแสงของ DLC ในแต่ละการทดลองเราจะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับ ค่าค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.33 ถึงรูปที่ 3.35 ดังจะเห็นว่าค่าความแข็งมีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในย่านความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร และย่านความยาวคลื่น 800-1000 นาโนเมตรดังเห็นได้จากค่า R-square ซึ่งสถิติที่มีค่าเข้าใกล้ 1



รูปที่ 3.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร



รูปที่ 3.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 1000 นาโนเมตร



รูปที่ 3.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 1000 นาโนเมตร ต่อ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง

### 4.1 การวิเคราะห์ค่าความแข็งด้วยการวัดค่าการกระเจิงของแสงแบบรามาน

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าสัญญาณ Raman ต่างๆจะพบว่า ค่าตำแหน่งศูนย์กลางของพีคจี (G-Position) และค่าความชันของเส้นฐาน (Slope) มีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจนกับค่าความแข็ง ซึ่งดูได้จากค่าการที่มีค่า R-square เชิงสถิติเข้าใกล้ 1 ทำให้สามารถ นำความสัมพันธ์ ที่ได้ นี้ มาใช้ใน การคำนวณกลับเพื่อหาค่าความแข็งโดยอ้อมได้ และด้วยวิธีนี้ทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าความแข็งของฟิล์ม DLC ได้โดยไม่ต้องทำลายชิ้นงานและใช้เวลาในการวัดที่สั้นกว่าการวัดค่าความแข็งด้วยวิธีนาโนอินเด้นเตชัน (Nanoindentation)

### 4.2 การวิเคราะห์ค่าความแข็งด้วยการวัดค่าระดับการสะท้อนแสง

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการสะท้อนแสงของฟิล์ม DLC จะพบว่าค่าเฉลี่ยของระดับการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร , 800-1000 นาโนเมตร และค่าอัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 800 -1000 นาโนเมตร ต่อ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตรของฟิล์ม DLC นั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจนกับค่าความแข็งของ ฟิล์ม DLC ซึ่งดูได้จากค่าการที่มีค่า R-square เชิงสถิติเข้าใกล้ 1 ทำให้สามารถนำความสัมพันธ์ ที่ได้ นี้ มาใช้ใน การคำนวณกลับเพื่อหาค่าความแข็งโดยอ้อมได้

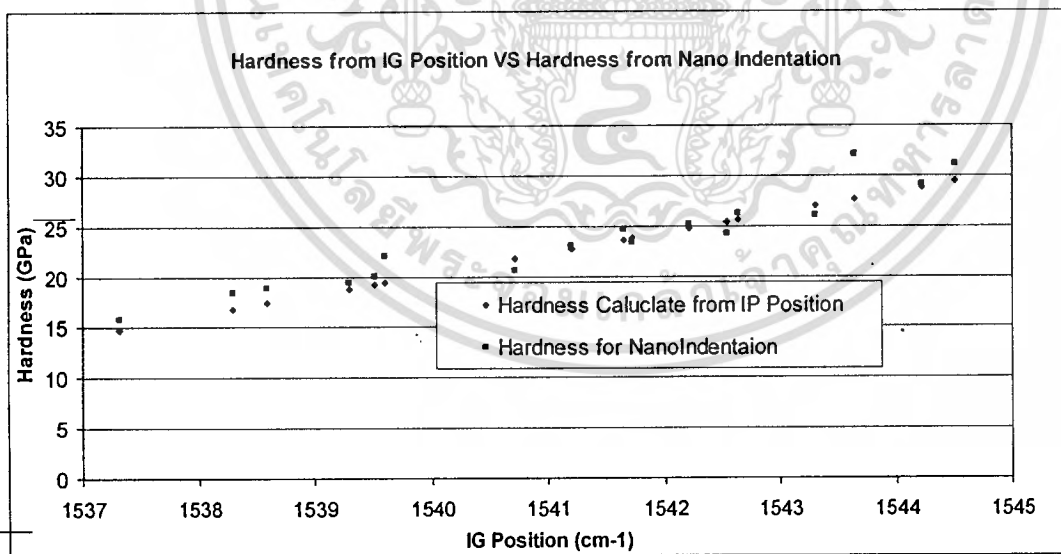
และด้วยวิธีการวัดค่าความแข็งของฟิล์มDLCในรูปของไฮโดรเจนเนอเรท อะมอฟัส คาร์บอน ด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าระดับการสะท้อนแสง นี้ทำให้เราสามารถวัดค่าความแข็งของ ฟิล์มDLCในรูปของไฮโดรเจนเนอเรท อะมอฟัส คาร์บอน นี้ได้โดยที่ไม่ต้องทำลายชิ้นงาน และใช้เวลาในการวัดที่สั้นกว่า การวัดค่าความแข็งของฟิล์ม DLC ด้วยวิธีนาโนอินเด้นเตชัน

#### 4.3 ข้อจำกัดของการวัดค่าความแข็งของฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคทางแสง

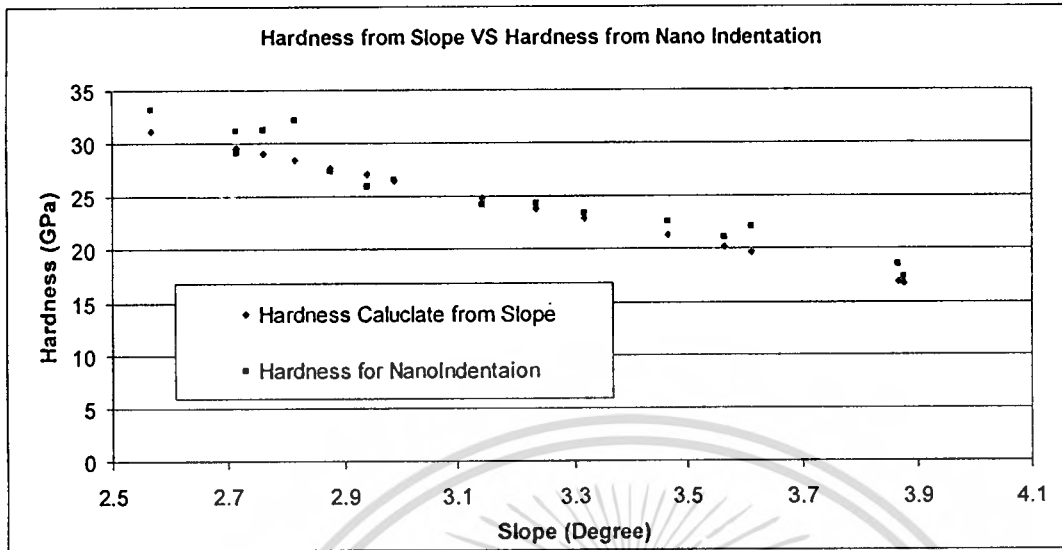
จากการศึกษาการวัดค่าความแข็งของฟิล์ม DLC ด้วยการวัดค่าการกระเจิงของแสงแบบรามาน และการวิเคราะห์ค่าความแข็งด้วยการวัดค่าระดับ การสะท้อนแสงนี้มีข้อจำกัดที่เราต้องทำการควบคุมค่าความหนาของฟิล์ม DLC ให้มีความหนาเท่ากับ 100 นาโนเมตรจึงจะทำให้ได้ค่าความแข็งของฟิล์ม DLC ที่ถูกต้องแม่นยำ เนื่องจาก DLC ค่าสัญญาณการกระเจิงของแสงแบบรามาน และ ค่าระดับการสะท้อนแสง นั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อระดับความหนาของ ฟิล์ม DLC เปลี่ยนแปลงไป

#### 4.4 การตรวจสอบผลการทดลอง

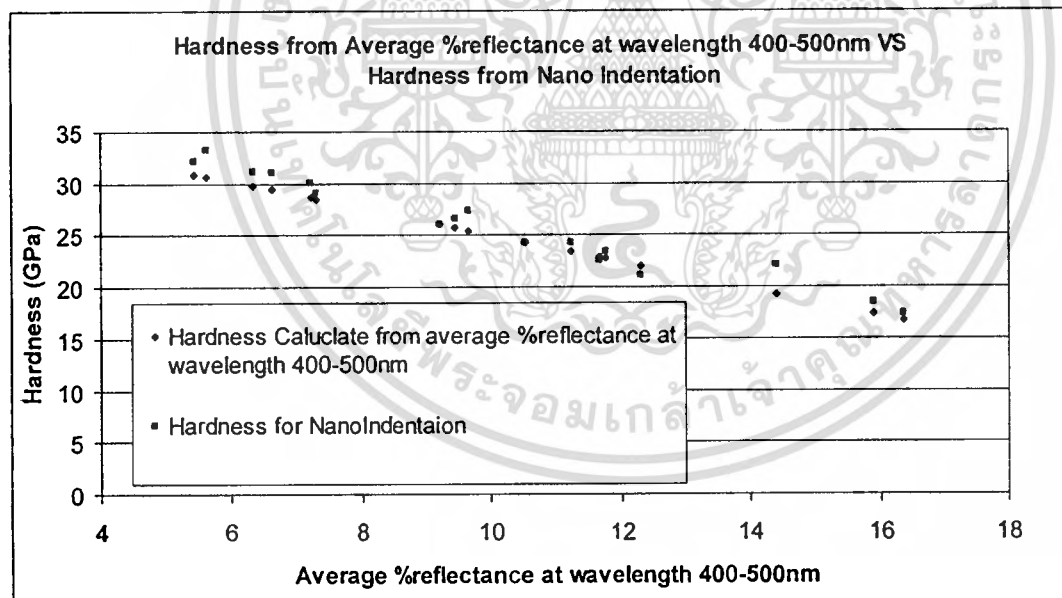
หลังจากที่ได้ค่าความสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการหาค่าความแข็งของฟิล์ม DLC แล้ว คือค่าตำแหน่งศูนย์กลางของพีคจี (G-Position) และค่าความชันของเส้นฐาน (Slope) ของค่าสัญญาณ Raman และความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร , 800-1000 นาโนเมตร และค่าอัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 800 -1000 นาโนเมตร ต่อ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตรของฟิล์ม DLC กับค่าความแข็งแล้วจึงทำการนำสมการที่ได้ไปทำการทดลองวัดค่าความแข็ง และนำค่าความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยวิธีนาโนอินเด้นเตชันตั้งแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.5



รูปที่ 4.1 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชัน และการคำนวณจากค่าตำแหน่งศูนย์กลางของพีคจี

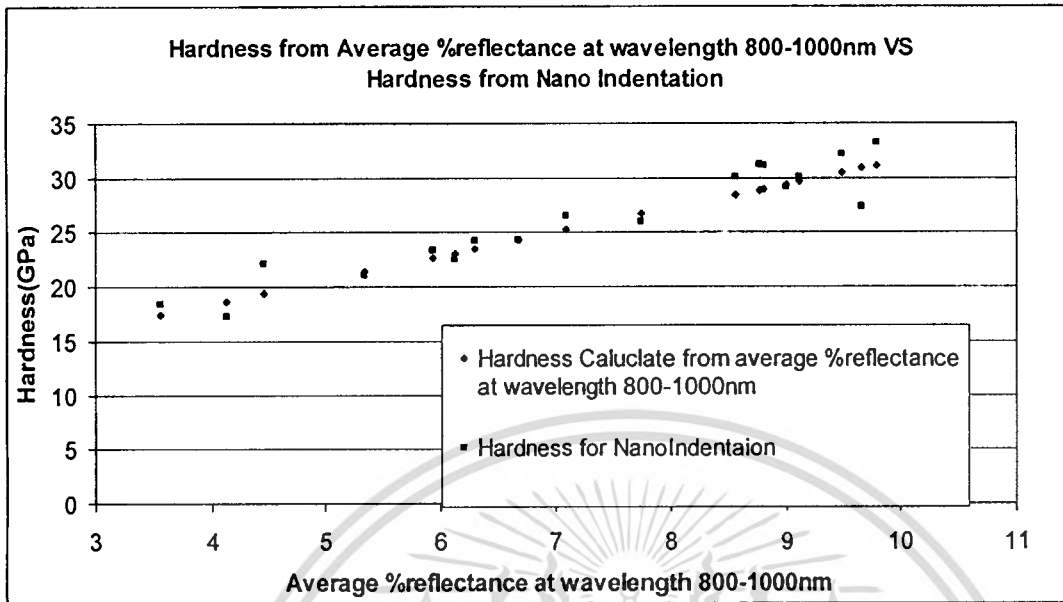


รูปที่ 4.2 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชั่น และการคำนวณจากค่าความชันของเส้นฐาน

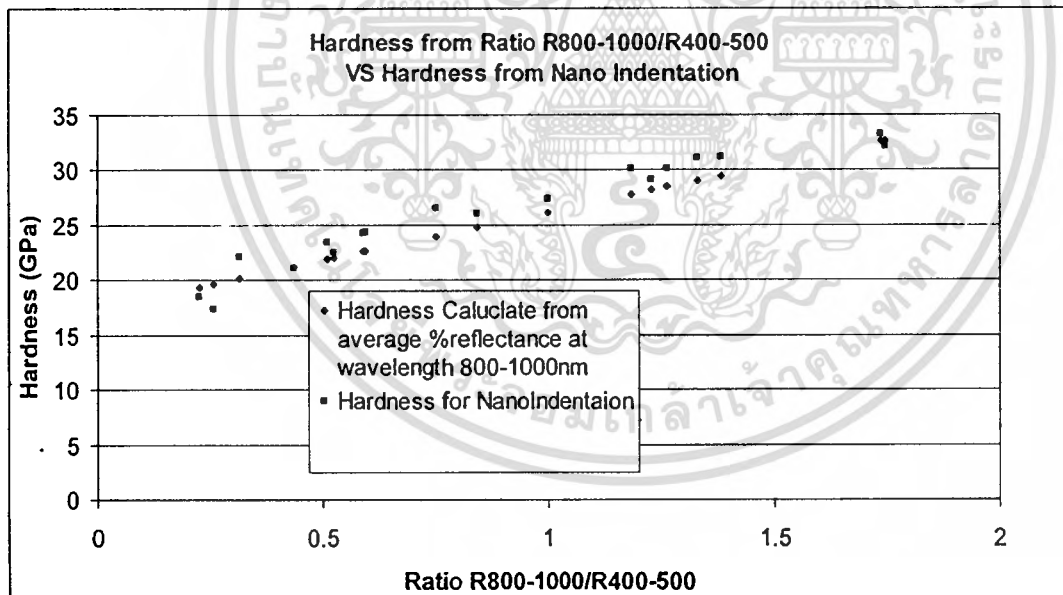


รูปที่ 4.3 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชั่น และการคำนวณจากค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชัน และการคำนวณจากค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 800นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 1000 นาโนเมตร



รูปที่ 4.5 รูปภาพเปรียบเทียบค่าความแข็งที่ได้จากวิธีนาโนอินเด้นเตชัน และการคำนวณจากอัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 1000 นาโนเมตร ต่อ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ถึงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้จากการวัดค่าความแข็งด้วยวิธีนาโนอินเด้นเตชัน และค่าความแข็งที่ได้จากการคำนวณจากค่าตำแหน่งศูนย์กลางของพีคจี (G-Position), ค่าความชันของเส้นฐาน (Slope) ของค่าสัญญาณ Raman, ค่าเฉลี่ยของระดับการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร, ค่าเฉลี่ยของระดับการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 800-1000 นาโนเมตร และค่าอัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 800 -1000 นาโนเมตร ต่อ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตรของฟิล์ม DLC มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากจนสามารถนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาใช้แทนการวัดค่าความแข็งด้วยวิธีนาโนอินเด้นเตชันได้ โดยเฉพาะในช่วงความแข็ง 20 GPa ถึง 30 GPa จะมีความแม่นยำสูงมากกว่า 90% ส่วนในช่วงความแข็งช่วงอื่นจะมีความแม่นยำลดลงไปอยู่ในระดับ 75% โดยเฉพาะในช่วงความแข็ง 30 GPa ถึง 35 GPa จะมีความแม่นยำต่ำกว่า 70% ดังนั้นเราจึงสามารถนำวิธีการนี้มาใช้ในการวัดค่าความแข็งด้วยวิธีการทางแสงในช่วง 20 GPa ถึง 30 GPa ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] David, R. F. 1993. **Diamond Film and Coating Development, Properties, and Applications.**  
New Jersey : Noyes Publication.
- [2] Mort, J. 1986. **Plasma Deposited Thin Films.** Florida : CRC Press LLC.
- [3] Druz, B. Ostan, E. Distefano, S. Hayes, A. Kanarov, V. Polyakov, V. Rukovishnikov, A. Rossukanyi, N. Khomich, A. 1998. "Diamond-like carbon films deposited using a broad, uniform ion beam from an RF inductively coupled CH<sub>4</sub>-plasma source." **Diamond and Related Materials.** 7(7): 965-972.
- [4] Druz, B. Polyakov, V. I. Ostan, E. Hayes, A. Rukovishnikov, A. I. Rossukanyi, N.M. Khomich, A.V. 1987. "Characterization of the Thin Diamond like Carbon Films Deposited Using rf Inductively Coupled CH<sub>4</sub>-Plasma Source." **Mikroelektronika.** 16: 326.
- [5] Lifshitz, Y. 1999. "Diamond-like carbon—present status." **Diamond and Related Materials.** 8(8-9): 1659-1676.
- [6] Druz, B. Zaritskiy, I. Hoehn, J. Polyakov, V. I. Rukovishnikov, A. I. Novotny, V. 2001. "Direct ion beam deposition of hard (>30 GPa) diamond-like films from RF inductively coupled plasma source." **Diamond and Related Materials.** 10(3-7): 931-936.
- [7] Smith, D. L. 1995. **Thin-Film Deposition Principles and Practice.** New York : McGraw-Hill.
- [8] Kailer, A. Nickel, K.G. Gogotsi, Y.G. 1999. "Raman microspectroscopy of nanocrystalline and amorphous phases in hardness indentations." **Journal of Raman Spectroscopy.** 30(10): 939-946.
- [9] Amer, M.S. Busbee, J. Leclair, S.R. Maguire, J.F. Johns, J. Voevodin, A. 1999. "Non-destructive, in situ measurements of diamond-like-carbon film hardness using Raman and Rayleigh scattering." **Journal of Raman Spectroscopy.** 30(10): 947-950.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

ตารางที่ 1 ยอดกราฟหลักๆ จากการวัดเพชรด้วยเครื่อง Raman Spectroscope

ตำแหน่งทีก	ชนิดของคาร์บอน	รายละเอียด
$\approx 1,140 \text{ cm}^{-1}$	Small size ( $<0.1 \mu\text{m}$ ) cubic diamond	พบในฟิล์มเพชรที่มีเกรนขนาดเล็ก ( $<0.1 \mu\text{m}$ )
$1,315-1,326 \text{ cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	เป็นแถบกว้างพบในการสังเคราะห์เป็น Shock wave
$1,332 \text{ cm}^{-1}$	Cubic diamond	พีกอันดับที่ 1 ของเพชรธรรมชาติที่มีความกว้าง ที่ครึ่งหนึ่งของความสูงเป็น $1.9 \text{ cm}^{-1}$
$1,345 \text{ cm}^{-1}$	อสังฐานคาร์บอน	แถบกว้างเมื่อถูกไฮโดรเจนจะเป็นไฮล์ ของแถบ $1,550 \text{ cm}^{-1}$
$1,355 \text{ cm}^{-1}$	Microcrystalline graphite	พบในวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็ก
$1,550 \text{ cm}^{-1}$	อสังฐานคาร์บอน หรือ Diamond like carbon	แถบกว้าง
$1,580 \text{ cm}^{-1}$	แกรไฟต์	พีกอันดับที่ 1
$2,458 \text{ cm}^{-1}$	Cubic diamond	พีกอันดับที่ 2
$2,710 \text{ cm}^{-1}$	Microcrystalline graphite	พีกอันดับที่ 2
$3,240 \text{ cm}^{-1}$	แกรไฟต์	พีกอันดับที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางต่าง ๆ สำหรับแสงโซเดียม , 589.3 nm (D-line)

วัสดุ	ดัชนีหักเหของแสงสี
Vacuum	1
Air	1.0003
Water	1.333
Spectacle crown , C-1	1.523
Carbon disulfide	1.63
Extra-dense flint, EDF-3	1.72
Methylene iodide	1.74
Diamond	2.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นาย อรรถพร สุพลจิต
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 27 มกราคม 2525
สถานที่เกิด	ชัยนาท
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2548



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้