

การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเจือหายพื้นที่ ด้วยวิธี CVD แบบความถี่

A STUDY ON SELECTIVE-AREA DEPOSITION OF  
DIAMOND FILMS BY THERMAL CVD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622-342-9

การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน

A STUDY ON SELECTIVE-AREA DEPOSITION OF  
DIAMOND FILMS BY THERMAL CVD



กอบศักดิ์ ศรีประภา

KOBSAK SRIPRAPHA



T031947

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่..... 31947 .....

ปี..... 14 ส.ค. 2542 .....

พ.ศ. 2541

ISBN 974-622-342-9

**A STUDY ON SELECTIVE-AREA DEPOSITION OF  
DIAMOND FILMS BY THERMAL CVD**



**KOB SAK SRIPRAPH A**

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

**1998**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ ISBN 974-622-342-9 นี้ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1998**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

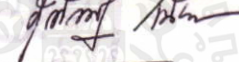
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน  
A STUDY ON SELECTIVE – AREA DEPOSITION OF DIAMOND FILMS BY THERMAL CVD

ชื่อนักศึกษา นายกอบศักดิ์ ศรีประภา รหัสประจำตัว 39061045

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุกเดช	
อาจารย์สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ผศ.สมศักดิ์	เชียรศิริกุล	
ผศ.ดร.สุริภณ	สมควรวาณิชย์	

ค่าระดับคะแนนที่ผ่านเป็นเอกฉันท์จากคณะกรรมการสอบ GOOD

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 ตุลาคม 2541 เวลา 10.00 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

หมายเหตุ การวัดผลวิทยานิพนธ์ให้ใช้ค่าระดับคะแนนดังนี้

ค่าระดับคะแนน

ผลการศึกษา

O

Outstanding (ดีเยี่ยม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

G

Good (ดี)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และดัดแปลงอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P

Pass (ผ่าน)

F

Fail (ไม่ผ่าน)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน
นักศึกษา	นายกอบศักดิ์ ศรีประภา
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2541

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการศึกษาถึงการนำสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่เพื่อใช้งานแทนสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ เพชรซึ่งอยู่ในรูปหนึ่งของคาร์บอนได้รับการสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์หลายอย่าง อาทิเช่น เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม ( $E_g$ ) สูงถึง 5.5 eV. มากที่สุดในบรรดาสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน ทำให้เหมาะสมสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีความคล่องตัวของประจุพาหะ แรงดันพังทลายและความนำความร้อนสูง ดังนั้นเพชรจึงมีข้อดีหลายอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้ จึงได้มีการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากเพชรขึ้น แต่ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมจำเป็นต้องมีการกำหนดขนาดและพื้นที่ในการสร้างฟิล์มเพชรให้แน่นอน

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอถึง การศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรให้เกิดขึ้นตามพื้นที่ที่ต้องการ เพื่อเป็นแนวทางเริ่มต้นในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากเพชรต่อไป ฐานรองซิลิกอนจะถูกเตรียมพื้นผิวด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน ซึ่งจะมีผลถึงการนิเวศลิเอชันของเพชรที่เกิดขึ้นด้วย ลวดลายของฟิล์มเพชรจะถูกออกแบบเพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นในการออกแบบวงจรเบื้องต้น สำหรับการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชร จะใช้เทคนิคในการสร้างต่าง ๆ กัน เช่นการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากักป้องกันในการเกิดฟิล์มเพชร หรือเทคนิคการใช้ผิวกระจกของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการขัดมัน (Mirror-polished Si) เป็นพื้นที่ป้องกันการเกิดฟิล์มเพชร ฟิล์มเพชรถูกสร้างด้วยวิธีการ Chemical Vapour Deposition (CVD) แบบความร้อน ซึ่งเป็นวิธีสร้างที่ได้รับการยอมรับว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง อุปกรณ์มีราคาถูกและมีความปลอดภัยสูง ชิ้นงานที่สร้างขึ้นสามารถตรวจสอบลักษณะพื้นผิวได้จากภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) และกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ในส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มเพชรจะศึกษาจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และ

Raman Spectroscopy ผลการทดลองพบว่าสลายของฟิล์มเพชรที่เกิดจากการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากปกป้องกันจะได้ผลดีเมื่อเทียบกับวิธีการใช้ผิวกระจกของแผ่นซิลิกอนเป็นพื้นที่ป้องกันการเกิดฟิล์มเพชร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	A Study on Selective-Area Deposition of Diamond Films by Thermal CVD
<b>Student</b>	Mr.Kobsak Sriprapha
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Electrical Engineering
<b>Year</b>	1998

### ABSTRACT

Nowadays, the other semiconducting materials are studied for using instead of Si and GaAs. Diamond is one of the most interesting material because of the better physical properties such as high charge-carrier mobility, high breakdown voltage and high thermal conductivity. Furthermore, wide energy band of diamond (5.5 eV) is suitable for operating in high temperature. So synthesized semiconducting diamond is developed for electronic devices. In some case, the structure of some electronic devices are very complex or being integrated circuit. So it is necessary to determine the area of pattern form of synthesized diamond films.

In this thesis, a study on selective deposition of semiconducting diamond films is presented for leading to develop diamond electronic devices. Surface preparation of silicon substrate that effects to the diamond nucleation, is varied the different conditions. The important parameters of fundamental circuit design are studied by designing patterns of diamond films. For the pattern fabrication, fabrication techniques are used differently such as silicon dioxide mask technique or Mirror-polished technique in order to protect diamond films generation. With the low cost and high safety of thermal (Chemical vapor deposition) CVD, the synthesized diamond films has high purity as well known that can be studied its surface by microscope and Scanning Electron Microscopy (SEM). With respect to structure and properties, can be characterized by X-ray diffraction and Raman spectroscopy. From the experiments were found that the best method for fabricating diamond film patterns are using silicon dioxide mask technique compared with using mirror-polished Si for synthesized diamond films protection.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ เกิดขึ้นได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ในการให้ความรู้ แนวความคิด การแก้ไขปัญหาและสนับสนุนงานวิจัยนี้มาด้วยดี ตลอด ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์อย่างสูง ขอขอบพระคุณ ผศ.พรศักดิ์ อรรถวนิช แห่งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้ SEM ขอขอบคุณ คุณอัจฉรา แสงอริยวนิช จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติในการอนุเคราะห์การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Raman spectroscopy ขอขอบคุณ คุณนริศ จันทร์แดง ที่ให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนการแก้ปัญหาระหว่างทำการวิจัย ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ขอบคุณพี่ ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่ช่วยทำให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากมูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร และทุนงบประมาณเพื่อการศึกษาในระดับบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณย่า คุณยาย คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำเนิดและสนับสนุนทางการเรียน กำลังใจและการเงินมาโดยตลอด

กอบศักดิ์ ศรีประภา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
ศัพท์เทคนิค.....	XVI
สัญลักษณ์.....	XXI
คำนำ.....	XXII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่างๆ.....	2
1.2.1 Thermal Enhanced CVD Methods.....	3
1.2.1.1 Filament-Assisted Thermal CVD.....	3
1.2.2 Plasma- Enhanced CVD Methods.....	4
1.2.2.1 DC-Plasma-Assisted CVD.....	4
1.2.2.2 DC-Plasma Jet.....	6
1.2.2.3 RF-Plasma -Assisted CVD.....	7
1.2.2.4 Microwave-Plasma -Assisted CVD.....	8
1.2.2.5 Electron Cyclotron Resonance Microwave Plasma-Assisted CVD.....	9
1.2.3 Combustion Flame-Assisted CVD.....	10
1.3 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร.....	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีของเพชรและหลักการควบคุมการเกิดฟิล์มเพชรเฉพาะที่.....	15
2.1 เพชรและรูปต่างๆของคาร์บอน.....	15
2.1.1 Diamond.....	15
2.1.2 Graphite.....	16
2.1.3 Microcrystalline carbon.....	17
2.1.4 Amorphous carbon.....	18
2.1.5 Lonsdaleite.....	18
2.2 คุณสมบัติต่างๆของเพชร.....	19
2.2.1 คุณสมบัติทางกล.....	19
2.2.2 คุณสมบัติทางแสง.....	20
2.2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	20
2.2.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น.....	22
2.3 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน.....	23
2.4 กลไกการเกิดฟิล์มเพชรของวิธี CVD.....	27
2.4.1 กระบวนการของก๊าซเฟส.....	27
2.4.2 ปฏิกิริยาการเกิดนิวเคลียส.....	32
2.4.3 ผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองและกลไกสนับสนุนการเกิดนิวเคลียส.....	38
2.4.4 เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างสวดลายฟิล์มเพชร.....	43
2.4.5 ลักษณะการเกิดรูปร่างของผลึกเพชร.....	44
บทที่ 3 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	47
3.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM.....	50
3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy.....	56
3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	61

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 กระบวนการทดลอง.....	66
4.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง.....	66
4.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น.....	66
4.1.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร.....	67
4.1.3 การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการอุตราโซนิกด้วยผงเพชร.....	68
4.2 กระบวนการออกแบบลวดลายและผลิตกระจกต้นแบบ.....	69
4.2.1 การศึกษาเกี่ยวกับขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลายฟิล์มเพชร.....	69
4.2.2 การศึกษาเพื่อหาค่าระยะใกล้ที่สุดของลวดลายฟิล์มเพชร.....	70
4.2.3 การผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ.....	71
4.3 กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์.....	71
4.4 กระบวนการโพโตลิโธกราฟี.....	75
4.5 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร.....	77
4.6 การทดลอง.....	79
4.6.1 ศึกษาถึงผลของกระบวนการเตรียมพื้นผิวที่มีต่อการเกิดฟิล์มเพชร.....	79
4.6.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรให้เกิดตามลวดลายที่กำหนด.....	81
4.6.2.1 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายโดยเทคนิคสร้าง หน้ากากป้องกันจากชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์.....	81
4.6.2.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายโดยเทคนิคใช้ ผิวกระจกของแผ่นซิลิกอนป้องกันการเกิดเพชร.....	86
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	89
5.1 ลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยเทคนิคต่างๆ.....	89
5.2 ผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองที่มีต่อการเกิดฟิล์มเพชร.....	91
5.3 ผลของอุณหภูมิฐานรองที่มีต่อการเกิดฟิล์มเพชร.....	102
5.4 ผลการศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายที่กำหนด.....	105

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.1 ผลจากการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร โดยวิธีใช้ซิลิกอน ไดออกไซด์เป็น หน้าการป้องกัน.....	106
5.4.2 ผลจากการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร โดยวิธีใช้ผิวกระจกของแผ่น ซิลิกอนเป็นหน้าการป้องกัน.....	124
5.5 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	126
5.6 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy.....	129
5.7 การวัดผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	132
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์.....	135
บรรณานุกรม.....	139
ภาคผนวก.....	142
ภาคผนวก ก.....	143
ภาคผนวก ข.....	150
ภาคผนวก ค.....	151
ประวัติผู้เขียน.....	154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและ แกเลียมอาร์เซไนด์.....	22
2	แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นการนิวเคลียชันของเพชรจากการเตรียมพื้น ผิวฐานรองด้วยวิธีต่างๆ.....	39
3	แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการเตรียมพื้นผิวฐานรองซิลิกอน ด้วยวิธี ต่างๆ.....	40
4	แสดงการเลือกใช้เทคนิคต่างๆ ในการตรวจสอบและวิเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	48
5	แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน.....	60
6	แสดงความสัมพันธ์ของยอดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกใน ฟิล์มเพชร.....	63
7	แสดงค่า Interplamar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติ (ASTM 6-675).....	65
8	แสดงค่าความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง.....	81
9	แสดงขั้นตอนการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way coat).....	82
10	แสดงขั้นตอนการบวมนการโฟโตลิโธกราฟี.....	82
11	แสดงขั้นตอนการลอกน้ำยาไวแสงชนิดลบ.....	83
12	แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร.....	106
13	แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการเกิดฟิล์มเพชรนอกเหนือจากลวดลายที่ ออกแบบ.....	115
14	แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์ม เพชร.....	116
15	แสดงค่า Interplamar spacing ของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เทียบกับค่ามาตรฐานของ เพชรธรรมชาติ (ASTM 6-675).....	127
16	แสดงเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชร.....	137

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	แสดงแผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD.....	4
2	แสดงแผนภาพระบบ DC Plasma-Assisted CVD.....	5
3	แสดงแผนภาพระบบ DC-Plasma Jet CVD.....	6
4	แสดงแผนภาพระบบ RF-Plasma-Assisted CVD.....	7
5	แสดงแผนภาพระบบ Microwave-Plasma-Assisted CVD.....	8
6	แสดงแผนภาพระบบ Electron Cyclotron Resonance Microwave plasma-Assisted CVD.....	10
7	แสดงแผนภาพระบบ Combustion Flame-Assisted CVD.....	11
8	แสดงการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร (a)ใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับเลเซอร์ไดโอด (b)ตัวเก็บประจุ (c)จอภาพแบบแบน.....	14
9	แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร.....	16
10	แสดงโครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราฟไฟต์.....	17
11	แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่จากการไบอัสฐานรองด้วยเงื่อนไขต่างๆ กัน (a)ไบอัสไปข้างหน้า 150 V (I ~125 mA) (b)ไม่มีการไบอัส (I ~10 $\mu$ A) (c)ไบอัสย้อนกลับ -150 V (I ~ -5 $\mu$ A) (d)ไบอัสย้อนกลับ -180 V (I ~60 mA) .....	26
12	แสดงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของเพชร.....	28
13	แสดงกระบวนการการเกิดกราฟไฟต์และเพชรขณะสังเคราะห์เพชรและการเปลี่ยนกลับไปมาของพันธะแบบ $sp^2$ ไปสู่ $sp^3$ .....	29
14	แสดงกลไกการนิวเคลียชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง..	32
15	แสดงขั้นตอนการเกิดเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร (a)เริ่มเกิดผลึกเดี่ยวๆ ขนาดเล็กขึ้น (b,c)เมื่อเวลาผ่านไปความหนาแน่นของผลึกเดี่ยวๆ บนฐานรองจะเพิ่มขึ้น (d)เริ่มเกิดผลึกเพชรขึ้นและมีการเชื่อมต่อกับผลึกเพชรข้างๆ (e,f)เกิดฟิล์มเพชรอย่าง	34

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดค้านการคัดลอกหรือการนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
16	แสดงกลไกการนิวเคลียเอชันของเพชรบน intermediate layer ของ Diamond-like amorphous carbon..... 35
17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการนิวเคลียเอชันกับขนาดของอนุภาคที่ใช้ (a)เตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร (b)เตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการอุตราโซนิกในผงเพชร..... 42
18	แสดงแผนภาพการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชร ในฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจนและอุณหภูมิฐานรอง..... 45
19	แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่างๆ (a){111} Triangular faces (b){100} Square faces (c)Polycrystalline faces (d)Cauliflower-like or microcrystalline..... 51
20	แสดงภาพถ่าย SEM ของรอยต่อและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรอง (a)ฐานรอง Si (b)ฐานรอง SiO <sub>2</sub> ..... 54
21	แสดงตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่เกิดจากภาพถ่าย SEM ..... 56
22	แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น..... 58
23	แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างๆกัน (a)0.5% CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> (b)2% CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> (c)5% CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> ..... 59
24	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบผลึก..... 62
25	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (a)บนระนาบ{100} (b)บนระนาบ{111}... 64
26	แสดงตัวอย่างครีมเพชรที่ใช้ในการขัดแผ่นซิลิกอน..... 68
27	แสดงลักษณะของผงเพชรและสารผสมระหว่างผงเพชรกับเอททิลแอลกอฮอล์..... 69
28	แสดงการออกแบบเพื่อแปรค่าหาขนาดความกว้างที่ต่ำสุดและระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของลวดลาย..... 70
29	แสดงแผนภาพการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน..... 72
30	แสดงแผนภาพการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง..... 74

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
31	แสดงขั้นตอน Photolithography ของน้ำยาไวแสง (a)ชนิดบวก (b)ชนิดลบ.....	75
32	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร.....	78
33	แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร.....	80
34	แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลาย โดยเทคนิคการสร้างหน้า กากป้องกันจากชั้นซิลิกอนไดออกไซด์.....	84
35	แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลาย โดยเทคนิคใช้ผิวกระจก ของแผ่นซิลิกอนป้องกันการเกิดเพชร.....	87
36	แสดงลักษณะผิวหน้าของแผ่นการเตรียมพื้นผิวด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน.....	90
37	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นการนิวคลีโอชันของเพชรกับขนาด อนุภาคของคริมเพชรที่ใช้ในการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัด.....	92
38	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นการนิวคลีโอชันของเพชรกับขนาด อนุภาคของเพชรที่ใช้การเตรียมพื้นผิวด้วยการอุลตราโซนิค.....	92
39	แสดงค่าความหนาแน่นการนิวคลีโอชันของเพชรบนพื้นผิวที่มีลักษณะเรียบ.....	93
40	แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที.....	94
41	แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที.....	95
42	แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน เมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที.....	96
43	แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที.....	97
44	แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน เมื่อเวลาผ่านไป 75 นาที.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงนิตยสารและห้องวิจัยขององค์กรใดๆทั้งที่มีกรรมสิทธิ์

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
45	แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที.....	99
46	แสดงผลจากการวัดด้วย Raman spectroscopy ของชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมพื้นผิว ฐานรองด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน (ที่เวลาในการสร้างฟิล์มเพชร 15 นาที).....	100
47	แสดงผลที่เกิดขึ้นจากการสร้างฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิฐานรองมีค่า (a) ต่ำเกินไป (ประมาณ 930 °C) และ (b) สูงเกินไป (ประมาณ 980 °C).....	103
48	แสดงฟิล์มเพชรระนาบ {100} ที่สร้างขึ้นได้ (อุณหภูมิฐานรองประมาณ 940 °C)....	104
49	แสดงฟิล์มเพชรระนาบ {111} ที่สร้างขึ้นได้ (อุณหภูมิฐานรองประมาณ 960 °C)....	104
50	แสดงฟิล์มเพชรระนาบ รวม (polycrystalline) ที่สร้างขึ้นได้ (อุณหภูมิฐานรอง ประมาณ 950 °C).....	105
51	แสดงตัวอย่างลวดลายที่ใช้ในการทดลอง.....	106
52	แสดงผลที่เกิดขึ้นหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายกรณีชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน , ความหนาของ SiO <sub>2</sub> 2000 Å , เวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร 30 นาที.....	107
53	แสดงผลที่เกิดขึ้นหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายกรณีชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน , ความหนาของ SiO <sub>2</sub> 5000 Å , เวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร 45 นาที.....	108
54	แสดงผลที่เกิดขึ้นหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายกรณีชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน , ความหนาของ SiO <sub>2</sub> 10,000 Å , เวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร 120 นาที.....	108
55	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร (a) ก่อนการลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (b) ลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกแล้ว.....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
56	ภาพถ่าย SEM แสดงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร (a)ก่อนการลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (b)ลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกแล้ว.....	111
57	แสดงผลที่เกิดกับการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร (ความหนาของ SiO <sub>2</sub> 500 Å , เวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร 15 นาที).....	112
58	แสดงผลที่เกิดกับการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร (ความหนาของ SiO <sub>2</sub> 1000 Å , เวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร 15 นาที) .....	112
59	แสดงผลที่เกิดกับการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร (ความหนาของ SiO <sub>2</sub> 3000 Å , เวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร 15 นาที) .....	113
60	แสดงผลที่เกิดกับการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร (ความหนาของ SiO <sub>2</sub> 5000 Å , เวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร 15 นาที) .....	113
61	แผนภาพแสดงผลของความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีต่อการเกิดลวดลายของฟิล์มเพชร (a) กรณีซิลิกอนไดออกไซด์บาง ๆ (b) กรณีซิลิกอนไดออกไซด์หนา.....	114
62	ภาพถ่าย SEM แสดงระยะห่างระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชรขนาด 5 µm และ 20 µm .....	117
63	ภาพถ่าย SEM แสดงระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชรที่สร้างได้....	117
64	ภาพถ่ายแสดงความคมชัดบริเวณของลวดลายที่สร้างได้.....	118
65	ภาพถ่ายแสดงความหนาของลวดลายฟิล์มเพชร.....	119
66	ภาพถ่าย SEM แสดงขนาดความกว้างต่ำสุดของฟิล์มเพชรที่สร้างได้.....	119
67	ภาพถ่ายแสดงด้านขอบของลวดลายฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้น.....	120
68	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการเกิดฟิล์มเพชร ในลวดลายที่กำหนด.....	121
69	แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้เวลาสร้างฟิล์มเพชรนานเกินไป.....	122
70	แสดงตัวอย่างของลวดลายฟิล์มเพชรที่สร้างในอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม.....	122
71	กรณีใดแสดงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นของลวดลายฟิล์มเพชรอันเกิดจากกระบวนการเตรียมพื้นผิวของฐานารอง.....	123

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
72	แสดงความผิดพลาดเนื่องจากการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ไม่คมชัด.....	123
73	แสดงชิ้นงานที่เตรียมพื้นผิวโดยเทคนิคการใช้ผิวกระจกของแผ่นซิลิกอนเป็นหน้า กากป้องกันก่อนนำไปสร้างฟิล์มเพชร.....	124
74	แสดงชิ้นงานที่เตรียมพื้นผิวโดยเทคนิคการใช้ผิวกระจกของแผ่นซิลิกอนเป็นหน้า กากป้องกันหลังจากผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรแล้ว.....	125
75	แสดงผลจากการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชร (a)ชิ้นงาน A (b)ชิ้นงาน B .....	128
76	แสดงตัวอย่างของ Raman spectrum ที่ได้จากการวัดชิ้นงานตัวอย่าง.....	130
77	แสดงโครงสร้างของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	132
78	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ.....	133
79	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วน $R/R_r$ กับอุณหภูมิ.....	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค

กระตุ้น	Activation
กระเจิง	Scattering
กระจกต้นแบบ	Photomask
กริด	Grid
กราไฟต์	Graphite
การเลี้ยวเบน	Diffraction
การเคลือบ	Deposition
การดูดกลืน	Absorption
การปลูกผลึก	Growth
การแพร่	Diffusion
ก๊าซเฟส	Gas phase
เกรน	Grain
ครีมเพชร	Diamond paste
ความผิดพลาด	Error
ความหนาแน่นการนิวเคลียส	Nucleation density
ความกว้างต่ำสุดของลวดลาย	Minimum line width
ความเข้มสัมพัทธ์	Relative intensity
แคโทด	Cathode
ความเข้มข้น	Concentration
ความคล่องตัว	Mobility
ค่าคงที่แลตทิซ	Lattice constant
ความเร็วเลื่อนลอย	Drift velocity
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
ควอตซ์	Quartz
เจือสาร	Dope

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ฉนวน	Insulator
ซิลิกอนไดออกไซด์	Silicondioxide
เซนเซอร์	Sensor
ฐานรอง	Substrate
ดิสชาร์จ	Discharge
ดัชนีมิลเลอร์	Miller indices
ตัวเก็บประจุ	Capacitor
ตัวต้านทาน	Resistor
ไตรคลอโรเอทิลีน	Trichloroethylene
แถบกว้าง	Broad band
แถบพลังงานต้องห้าม	Forbidden energy band
แถบพลังงาน	Energy band
ทังสเตน	Tungsten
เทอร์มิสเตอร์	Thermistor
น้ำบริสุทธิ์	Deionized water
น้ำยาไวแสงชนิดบวก	Positive photoresist
น้ำยาไวแสงชนิดลบ	Negative photoresist
นิวเคลียชัน	Nucleation
นิวเคลียไอ	Nuclei
ไบอัส	Bias
ไบอัสไปข้างหน้า	Forward bias
ไบอัสย้อนกลับ	Reverse bias
บัฟเฟอร์	Buffer
ประจุพาหะ	Carrier
เป้า	Target

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ผงเพชร	Diamond powder
ผลึกเพชร	Diamond crystal
แผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา	Mirror-polished silicon
ผลึกกระนาบรวม	Polycrystalline
เพชร	Diamond
เพชรธรรมชาติ	Natural diamond
พารามิเตอร์	Parameter
พลาสมา	Plasma
พันธะ	Bond
พันธะโควาเลนต์	Covalent band
พันธะแขวนขาด	Dangling band
พลังงานกระตุ้น	Activation energy
พาสซีฟ	Passive
เฟส	Phase
โฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
ฟิล์มเพชร	Diamond films
ฟลักซ์อิเล็กตรอน	Electron flux
ยูนิตเซลล์	Unit cell
รีแอกเตอร์	Reactor
รีแอกแตนซ์	Reactance
รอยขีด	Scratch
รังสีเอ็กซ์	X-ray
ระนาบ	Plane
ระยะห่างใกล้ที่สุดของลวดลาย	Minimum spacing
รอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน	Homogeneous

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน	Heterogeneous
ลวดลาย	Pattern
ลอกทิ้ง	Etching
แลตทิซ	Lattice
ลำแสงอิเล็กตรอน	Electron beam
เลเซอร์ไดโอด	Laser diode
สนามไฟฟ้าพังทลาย	Breakdown field
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
สารเจือผู้ให้	Donor
สารเจือผู้รับ	Acceptor
สภาพต้านทานทางไฟฟ้า	Resistivity
สเปกตรัม	Spectrum
สปัตเตอร์ริง	Sputtering
สังเคราะห์	Synthesis
แหล่งจ่าย	Source
หน้ากากป้องกัน	Mask
อนุมูล	Species
อิเล็กโทรด	Electrode
อิเล็กตรอน	Electron
อิเล็กตรอนลำดับที่สอง	Secondary Electron
อิ่มตัว	Saturated
ออปโตอิเล็กทรอนิกส์	Optoelectronic
อะตอม	Atoms
อะซิโตน	Aceton

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

อัลตราโซนิก	Ultrasonic
อมอร์ฟัสคาร์บอน	Amorphous carbon
เอทิลแอลกอฮอล์	Ethylalcohol
แอคทีฟ	Active
แอโนด	Anode
โฮล	Hole
ไฮโดรคาร์บอน	Hydrocarbon



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a-C	อมอร์ฟัสคาร์บอน	-
a-Si	อมอร์ฟัสซิลิกอน	-
°C	อุณหภูมิ	Celsius
Cd	อะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าของเพชร	-
Cd'	อะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น	-
d	ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม	Å
Nd	ความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันที่บริเวณพื้นผิว	cm <sup>-2</sup>
Nr	อัตราการนิวคลีเอชันที่บริเวณพื้นผิว	cm <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup>
X	ขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลาย	µm
S	ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลาย	µm
h	ค่าคงที่ของพลังค์	J.s
λ	ความยาวคลื่น	Å
θ	มุม	Degree
W	กำลัง	Watt
V	แรงดัน	Volt
μ	ค่าความคล่องตัว	cm <sup>2</sup> /V.s
ε	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	F/cm
K	อุณหภูมิ	Kelvin
DLC	Diamond-like carbon	-
sccm	ปริมาณการไหลของก๊าซ	cm <sup>-3</sup>
Pa	ความดัน	Pascal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปต่อส่วนอื่น การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำนำ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาถึงการนำฟิล์มเพชรมาเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่แทนซิลิกอน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าหลายประการ อาทิเช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากเพชรสามารถทำงานที่อุณหภูมิและความถี่สูงได้ดีกว่าซิลิกอน อีกทั้งยังมีขนาดของมวลและปริมาตรลดลงจากเดิมมาก อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้ฟิล์มเพชรเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนจำเป็นต้องมีการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรขึ้น เพื่อกำหนดขนาดและพื้นที่ของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการวิจัย การสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรขึ้น โดยเปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้ 2 วิธีด้วยกันคือ ใช้ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการขัดมันเป็นกระจกเงาเป็นพื้นที่ที่ไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรและการใช้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นหน้ากักป้องกันการเกิดฟิล์มเพชร โดยอาศัยหลักการของการนิวคลีเอชันของเพชรที่แตกต่างกันบนสภาพพื้นผิวที่มีลักษณะต่างกัน ฟิล์มเพชรถูกสร้างขึ้นด้วยวิธี CVD แบบความร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่ยอมรับกันว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณภาพดี อุปกรณ์ราคาถูก สะดวก และมีความปลอดภัยสูง รายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยสามารถสรุปเป็นบทได้ดังนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงเทคนิคต่างๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ข้อดี-ข้อเสียของแต่ละกระบวนการ ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานของฟิล์มเพชร

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆของเพชร รูปร่างๆ ของคาร์บอนที่มักพบในการสังเคราะห์เพชร กล่าวถึงกระบวนการเกิดฟิล์มเพชร กลไกของก๊าซเฟส ปฏิกริยาการนิวคลีเอชัน ตลอดจนผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองที่มีต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของนิวคลีเอชัน ซึ่งเป็นหลักการในการควบคุมฟิล์มเพชรให้เกิดตามพื้นที่ที่กำหนดและเทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามต้องการ

บทที่ 3 เกี่ยวกับเทคนิคในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร อธิบายถึงหลักการคร่าวๆ ของแต่ละวิธี และตัวอย่างการวิเคราะห์ชิ้นงาน รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 4 เป็นกระบวนการทดลองทั้งหมดเริ่มตั้งแต่การทดลองเพื่อหาผลของการนิวคลีเอชันที่มีต่อสภาพพื้นผิวที่เตรียมด้วยเงื่อนไขต่างๆ กันเพื่อหาเงื่อนไขการเตรียมพื้นผิวฐานรองที่

เหมาะสมที่สุด ตลอดจนขั้นตอนการสร้างฟิล์มเพชรให้เกิดตามลวดลายที่กำหนด

บทที่ 5 เป็นผลการทดลองทั้งหมด ค่าพารามิเตอร์ของลวดลายฟิล์มเพชรที่สร้างได้ รวมไปถึง  
ถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของชิ้นงานที่สร้างเสร็จ

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

เมื่อประมาณ 200 ปีที่ผ่านมาในปี ค.ศ. 1772 Antoine Lavoisier นักเคมีชาวฝรั่งเศส ได้ทดลองเผาเพชรในภาชนะที่ปิดสนิทด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านเลนส์ ผลที่ได้คือเกิดก๊าซ  $\text{CO}_2$  และผงถ่านเหลืออยู่ อย่างไรก็ตาม Lavoisier ไม่ได้สนใจที่ตีพิมพ์เผยแพร่งานที่พบ ต่อมาในปี ค.ศ. 1972 Tenant นักเคมีชาวอังกฤษได้ทำการทดลองตาม Lavoisier และได้รับผลอย่างเดียวกัน จนกระทั่งเมื่อ Sir. William Henry Bragg และ ลูกชายคือ Sir. William Lawrence Bragg ได้ใช้ X-ray ศึกษาคาร์บอนและพบว่ามียหลายรูปแบบคือ Cubic (เพชร), Hexagonal (กราไฟต์) และ Amorphous ตลอดจนเมื่อนักวิทยาศาสตร์ทราบว่าเพชรมีความหนาแน่น  $3.52 \text{ g/cm}^3$  สูงกว่ากราไฟต์ซึ่งมีค่าเพียง  $2.25 \text{ g/cm}^3$  ทำให้สามารถเปลี่ยนคาร์บอนให้เป็นเพชรได้ จึงเป็นจุดเริ่มต้นในการสังเคราะห์เพชรขึ้น

จนกระทั่งเมื่อปี ค.ศ. 1955 Bundy et al. ได้ทำการสังเคราะห์เพชรเป็นผลสำเร็จที่ General Electric Research Laboratories (GE) ด้วยวิธี High - Pressure High-temperature (HPHT) วิธีการดังกล่าวถูกตรวจสอบว่าสามารถสังเคราะห์เพชรซ้ำได้ ดังเช่นในปี ค.ศ. 1953 นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนอ้างว่าได้ทำการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HPHT สำเร็จแต่ไม่มีการรายงานผลงานออกมา ซึ่งการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HPHT นั้น กระบวนการสร้างสามารถเปลี่ยนคาร์บอน (ส่วนมากอยู่ในรูปของกราไฟต์) เป็นเพชรได้โดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้จึงเป็นอุปกรณ์เฉพาะและมีราคาแพงมาก

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกหนึ่งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สำหรับการสังเคราะห์เพชร ที่ความดันต่ำได้เริ่มต้นที่ Union Carbide Corporation เมื่อปี ค.ศ. 1949 โดย W.G. Eversole et al. ประสบผลสำเร็จสามารถสังเคราะห์เพชรบนผลึกเพชรได้จาก

ก๊าซไฮโดรคาร์บอนในปี ค.ศ. 1952-1953 ทำให้เริ่มมีการศึกษาการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ แพร่หลายขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1956 Boris Spitsyn et al. ได้นำเสนอถึงการสร้างเพชรที่ความดันต่ำ โดยใช้ความร้อนทำให้ก๊าซ  $\text{CCl}_4$  และ  $\text{CBr}_4$  แตกตัวเกิดเพชรบนผลึกเพชร พร้อมกันนั้นที่ Physical Chemistry Institute, Moscow ได้เริ่มทำการศึกษาการสร้างเพชรที่ความดันต่ำเป็นครั้งแรกในโซเวียตจนกระทั่งปี ค.ศ. 1971 Angus et al. ได้เสนอถึงการใช้อะตอมไฮโดรเจน ที่เกิดจากการแตกตัวบริเวณไส้หลอดทั้งสแตนในการกำจัดกราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นขณะสังเคราะห์เพชร เพชรที่ได้จากการสังเคราะห์สามารถทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้โดยการผสมก๊าซ  $\text{B}_2\text{H}_6$  เข้าไปในก๊าซ  $\text{CH}_4$  ระหว่างการสร้าง วิธีการนี้นำเสนอโดย Proferl et al. ในปี ค.ศ. 1973 นับเป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาถึงการทำเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมาใช้งานในทางอิเล็กทรอนิกส์

ในประเทศญี่ปุ่น Setaka et al. ได้เริ่มต้นศึกษาการสังเคราะห์เพชรเป็นครั้งแรกที่ Japan's National Institute for Research in Inorganic Materials (NIRIM) ในปี ค.ศ. 1974 ด้วยวิธี HPHT เช่นเดียวกับที่ GE โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะนำเพชรที่สังเคราะห์ได้เป็นวัสดุสำหรับใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ แต่ในตอนหลังวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรกลับกลายเป็นวิธี CVD (Chemical Vapour Deposition) เนื่องจากเทคนิคการสังเคราะห์เพชรแบบ CVD มีความเหมาะสม สำหรับการสร้างเพชรให้เป็นฟิล์ม และมีความหลากหลายในการสังเคราะห์เพชรมากกว่า นับแต่นั้นการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในประเทศญี่ปุ่นมีการพัฒนาอย่างมาก เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำถูกนำเสนออย่างต่อเนื่อง โดยในปี ค.ศ. 1981 Matsumoto et al. ได้นำเสนอเทคนิคการสร้างเพชรด้วยวิธี Hot-Filament CVD (HFCVD) และ Microwave Plasma CVD (MPCVD) ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 1982 จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1987 Suzuki et al. ค้นพบเทคนิควิธีการ DC Plasma-Assisted CVD และ Hirose et al. ได้นำเสนอถึงการสร้างเพชรด้วยวิธี Combustion ในปี ค.ศ. 1988 ซึ่งเทคนิคการสังเคราะห์เพชรทั้งหมดที่นำเสนอ มีหลักการพื้นฐานคือ การทำให้อะตอมไฮโดรคาร์บอนแตกตัวบริเวณพื้นผิวที่สร้าง โดยฐานรองที่ใช้มีหลายชนิดอาทิเช่น Si, SiC, W, WC, Ta, Mo และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นต้น

## 1.2 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธี

สร้างที่มีผู้ให้ความสนใจแพร่หลาย มีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ CVD นี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม หลักๆ ได้ตามเทคนิคที่ใช้คือ

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

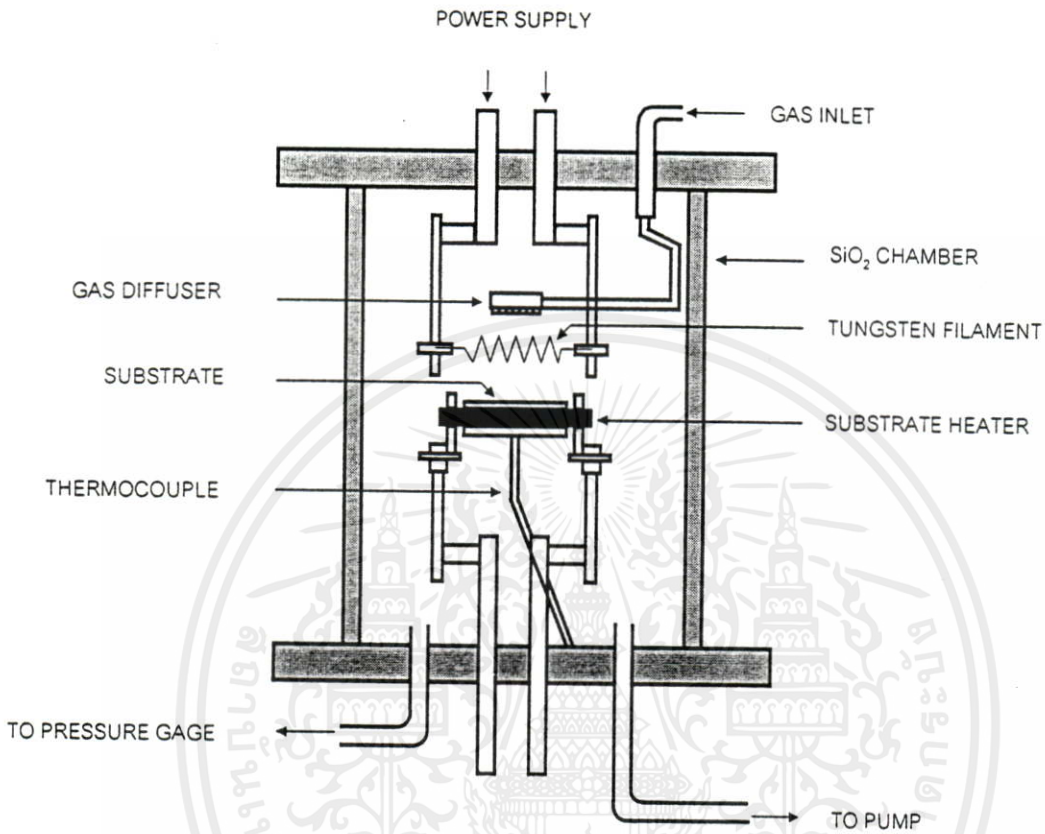
ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ อาทิเช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร, อุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง, อุณหภูมิของฐานรอง, พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้ แต่ท้ายที่สุดฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการต่างๆ จากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกันอันเป็นที่ยืนยันได้ว่า แม้เทคนิคที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรแตกต่างกันไป แต่ผลที่ได้ก็คือ ฟิล์มเพชรเหมือนกันนั่นเอง

## 1.2.1 Thermal Enhanced CVD Methods

### 1.2.1.1 Filament-Assisted Thermal CVD

วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Matsumoto et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผนภาพของวิธี Filament-Assisted Thermal CVD แสดงดังรูป 1.1 ภายใน Chamber มีไส้หลอดทั้งเสตนทำหน้าที่กำเนิดความร้อน อุณหภูมิของไส้หลอดทั้งเสตนมีค่าสูงถึง 2,000-2,300°C ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดมีอุณหภูมิ 700-1,000°C เมื่อก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปใน Chamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งเสตนจะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม ฐานรองสามารถไบอัสไฟเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวเคลียชัน และอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทน (0.5-2%) ต่อก๊าซไฮโดรเจน กระทำที่ความดัน 10-100 ทอร์ ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิด 1-10  $\mu\text{m/hr}$ [9] วิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ในบริเวณกว้าง และมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคืออายุการใช้งานไส้หลอดทั้งเสตนสั้น เนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดทั้งเสตนเป็นเวลานาน ทั้งเสตนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็น  $\alpha\text{-w}_2\text{C}$  ทำให้ไส้หลอดเปราะและผุกรุดได้ง่าย

รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD [5]



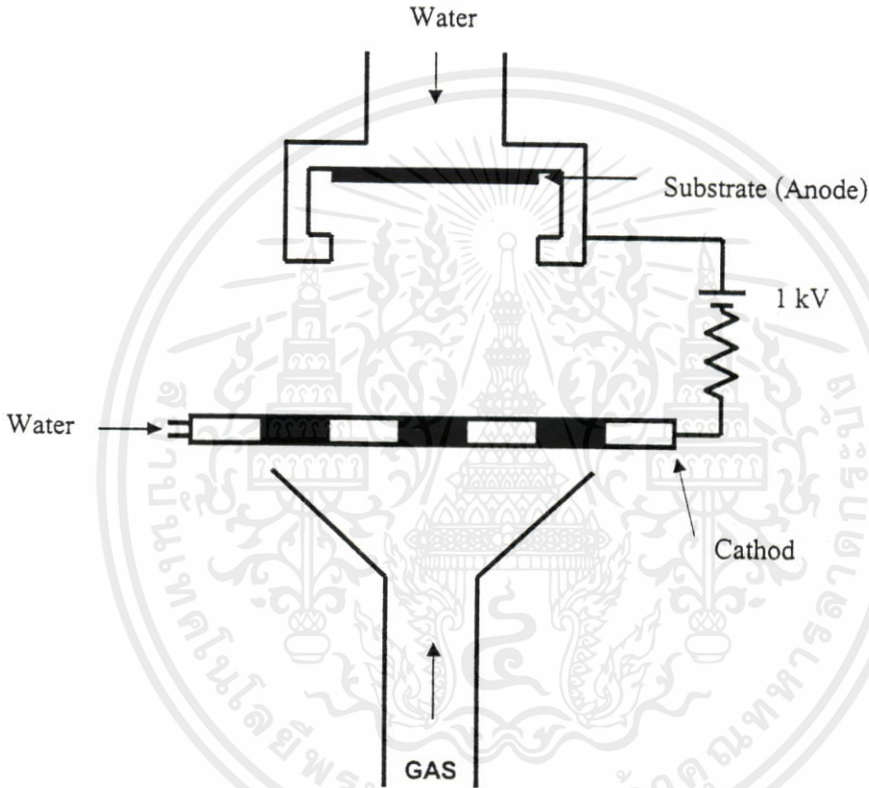
## 1.2.2 Plasma-Enhanced CVD Methods

### 1.2.2.1 DC-Plasma-Assisted CVD

วิธีนี้พลาสมาของก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนจะถูกกระตุ้นให้แตกตัวด้วยการไบอัสไฟ DC ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 อันที่วางขนานกันอยู่โดยฐานรองได้รับการไบอัสเป็นแอโนด ส่วนเพลทอีกอันหนึ่งที่เหลือถูกไบอัสเป็นแคโทด แผ่นอิเล็กโทรดจะถูกไบอัสด้วยแรงดัน 1 kV ความหนาแน่นกระแส 4 A/cm<sup>2</sup> เมื่อก๊าซไหลผ่านบริเวณระหว่างแคโทดและแอโนด จะเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาขึ้น ฐานรองมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 600-800°C และด้านหลังจะมีน้ำไหลผ่านเพื่อระบายความร้อน ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทน (0.5-2%) ต่อก๊าซไฮโดรเจนกระทำที่ความดัน 200 ทอร์ วิธีนี้จะมีอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรและความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันสูง[4] (Suzuki et al. รายงานว่าค่าอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรสูงถึง 20  $\mu\text{m/hr}$  และความหนาแน่นของการนิวคลีเอชัน  $10^8 / \text{cm}^2$  บนฐานรอง Si และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยไม่ขึ้นอยู่กับเตรียมพื้นผิวฐานรอง) ฟิล์มเพชรที่สร้างได้จะมีคุณภาพดีสามารถสร้างได้ในบริเวณกว้าง

(เส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 10 cm) แต่ในบางครั้งฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นพบว่ามีสารปนเปื้อนเนื่องจากแผ่นอิเล็กโทรดถูกกัดกร่อน

รูปที่ 1.2 แสดงแผนภาพระบบ DC Plasma-Assisted CVD [4]

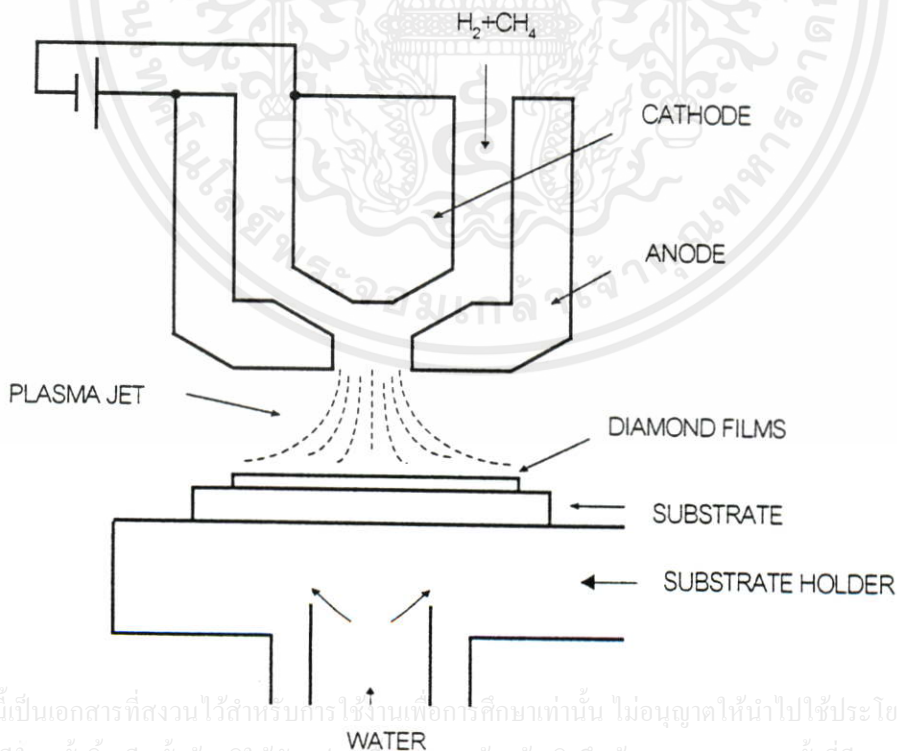


รูปที่ 1.2 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของวิธี DC Plasma-Assisted CVD ในบางครั้งวิธีนี้ถูกนำไปประยุกต์วิธีร่วมกับวิธี Filament-Assisted Thermal CVD โดยใช้ Hollow cathode แทน Hot filament hollow cathodes มีลักษณะเป็นท่อโลหะกลวง บริเวณปลายท่อถูกทำให้ร้อนประมาณ  $2,000^{\circ}\text{C}$  เมื่อทำการจ่ายแรงดันต่ำและกระแสสูง (100V-10A) ภายในท่อจะเกิดปรากฏการณ์ Hollow cathode effect เกิดการคายประจุอย่างคงที่ โดยแรงดันที่ใช้จะต่ำกว่าวิธีแบบ DC Plasma-Assisted CVD อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร 1-3  $\mu\text{m}$  [4] ใกล้เคียงกับวิธี Filament-Assisted-Thermal CVD เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2.2.2 DC - Plasma Jet CVD

วิธี DC-Plasma Jet CVD นี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Plasma Torch Activation เป็นวิธีที่มีอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรสูงกว่าทุกวิธีคือมีค่าถึง  $60 \mu\text{m/hr}$  [4] (Ohtake et al. รายงานว่าอัตราการเกิดสูงสุดที่เคยสร้างได้ประมาณ  $1,000 \mu\text{m/hr}$ ) แต่ฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีนี้มีคุณสมบัติพอใช้ แผนภาพของวิธี DC-Plasma Jet CVD แสดงไว้ในรูปที่ 1.3 ระบบประกอบด้วยขั้วแคโทดวางอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วแอโนด ก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนถูกปล่อยให้ไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง  $4,000^\circ\text{C}$  ดังนั้นก๊าซจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาขึ้น ฐานรองจะวางอยู่ภายใต้ขั้วแอโนดและแคโทดห่างประมาณ 1-2 cm และมีอุณหภูมิประมาณ  $1,000^\circ\text{C}$  ด้านล่างของฐานรองจะถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ วิธีนี้ฟิล์มเพชรจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ปัญหาที่พบคือ ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีขนาดพื้นที่เล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 mm) และการควบคุมอุณหภูมิที่ได้ยากเนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซมีค่าสูง

รูปที่ 1.3 แสดงแผนภาพระบบ DC-Plasma Jet CVD [4]



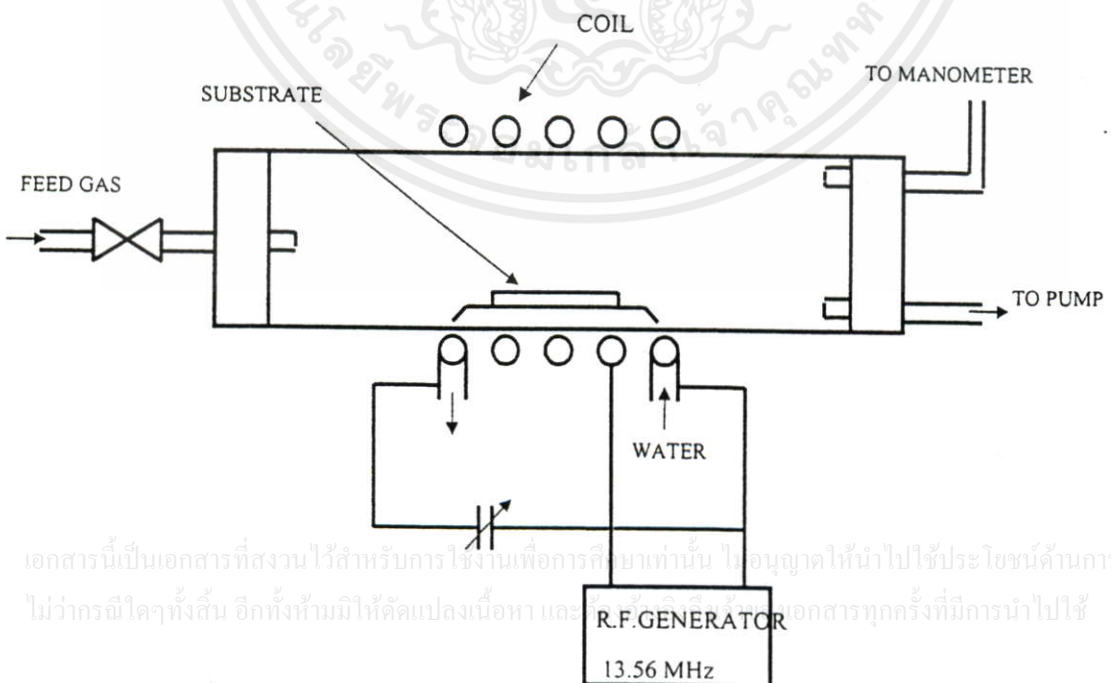
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2.2.3 RF-Plasma-Assisted CVD

วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Setaka et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผนภาพของวิธีนี้สามารถแสดงในรูปที่ 1.4 จากรูประบบประกอบด้วย ท่อควอตซ์, คอยล์ และ RF-Generator คลื่นวิทยุถูกสร้างขึ้นจาก RF-Generator ที่ความถี่ 13.56 MHz ส่งผ่านไปยังคอยล์ ทำให้เกิดพลาสมาของก๊าซขึ้นในบริเวณนั้น อุณหภูมิจะมีอุณหภูมิประมาณ  $800^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากผลของการเหนี่ยวนำและความร้อนจากพลาสมา วิธีนี้จะใช้ High power ในการสร้างฟิล์มเพชรเนื่องจากพลังงานโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ความถี่วิทยุ 13.56 MHz ความดัน 1 ทอร์ มีค่าประมาณ  $4\text{ eV}$ [4] ซึ่งพอเพียงสำหรับการทำให้ไฮโดรเจนแตกตัว ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Power ในการ Discharge เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลจากการใช้ High power จะทำให้เกิดไอระเหยที่บริเวณผิวของท่อควอตซ์ ส่งผลให้ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีสารปนเปื้อนจำพวก SiC เกิดขึ้น วิธี RF-Plasma Assisted CVD นี้จะได้ฟิล์มเพชรที่มีขนาดของผลึกเล็ก และมีการยึดเกาะกับฐานรองดี แต่คุณสมบัติของฟิล์มเพชรไม่ดีมากนัก

โดยทั่วไปเงื่อนไขปรกติในการสร้างด้วยวิธีนี้จะใช้อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทน ( $0.5\text{-}2\%$ ) ต่อก๊าซไฮโดรเจนกระทำที่ความดันระหว่าง  $1\text{-}30$  ทอร์ ค่า RF power  $500\text{-}1,000\text{ W}$  อุณหภูมิของฐานรอง  $800\text{-}1,000^{\circ}\text{C}$  อัตราการเกิดฟิล์มเพชรประมาณ  $1\text{-}2\ \mu\text{m/hr}$  [4]

รูปที่ 1.4 แสดงแผนภาพระบบ RF-Plasma-Assisted CVD [4]

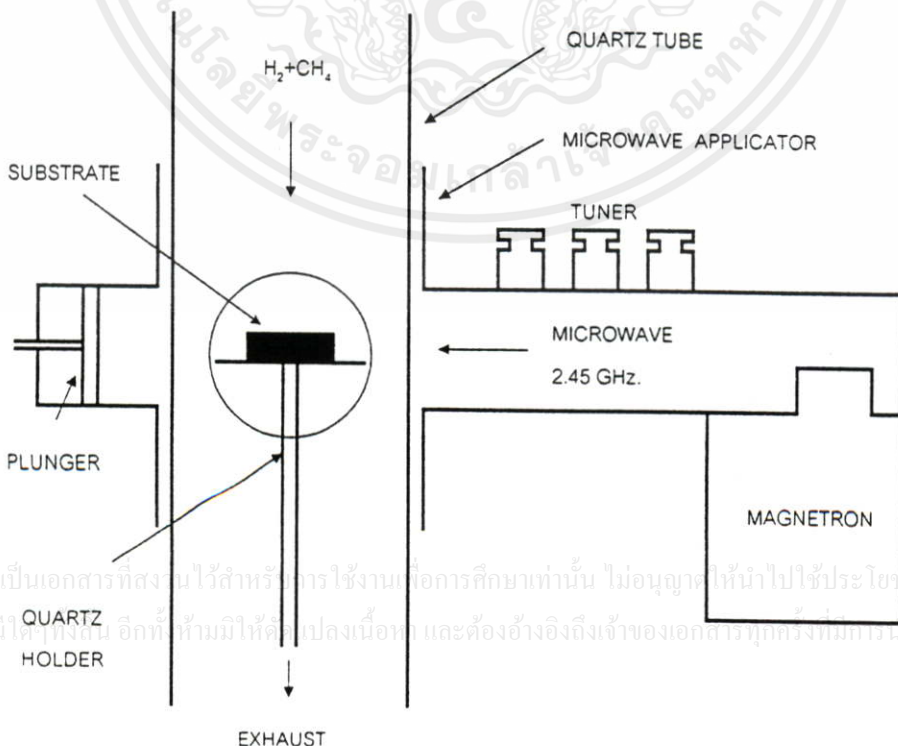


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไปอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ข้อมูลสาธารณะทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2.2.4 Microwave-Plasma-Assisted CVD

วิธีนี้ได้รับความนิยมมากในการสร้างฟิล์มเพชร โดย Setaka et al. ได้นำเสนอในปี ค.ศ. 1982 เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดปัญหาการเกิดสารปนเปื้อนในฟิล์มเพชรแผนภาพแสดงวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD แสดงได้ดังรูปที่ 1.5 ระบบประกอบไปด้วย Magnetron ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz (สังเกตว่าวิธีนี้จะใช้ความถี่สูงกว่าวิธี RF-Assisted CVD) rectangular wave guide จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของคลื่นไมโครเวฟระหว่าง Generator และ Reaction chamber โดย Reaction chamber ซึ่งทำมาจากท่อควอตซ์ถูกวางในตำแหน่งที่ทิศทางของคลื่นไมโครเวฟจาก Rectangular wave guide พุ่งผ่าน Three stub tuners ที่บริเวณ Wave guide ใช้เป็นตัวจำกัดพลังงานที่สะท้อนจาก Applicator ให้มีค่าน้อยสุด คลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดพลาสมาความหนาแน่นสูงพร้อมกับอิเล็กตรอนที่มีค่าพลังงานสูง ซึ่งเกิดจากการรวมกันของอนุมูลของอะตอมไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน พลาสมาที่เกิดขึ้นจะถูกบังคับให้อยู่ตรงกลาง Chamber บริเวณที่วางฐานรอง (เพื่อป้องกันการก่อดตัวของคาร์บอนบนผิวภายใน Chamber) โดยฐานรองจะมีอุณหภูมิ 700-1,000 °C ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ถูกให้โดยพลาสมาและการแผ่รังสี

รูปที่ 1.5 แสดงแผนภาพระบบ Microwave-Plasma-Assisted CVD [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้โดยทั่วไปแล้วจะใช้อัตราส่วนของก๊าซมีเทน (0.5-2.0%) ต่อก๊าซไฮโดรเจนกระทำที่ความดัน 5-100 ทอร์ Microwave Power 100-700 W อัตราการเกิดฟิล์มเพชรประมาณ 1-5  $\mu\text{m}$ [4] ฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีนี้จะมีคุณภาพดีกว่าวิธี RF-Plasma-Assisted CVD และสามารถสร้างให้เกิดในบริเวณกว้างได้ (เส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 10 cm) เนื่องจากการที่ไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรองทำให้สะดวก และฟิล์มเพชรจะเกิดอย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งยังไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดสารปนเปื้อนในฟิล์มเพชรอันเกิดจากการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดและผลจากไอระเหยของ Reaction chamber

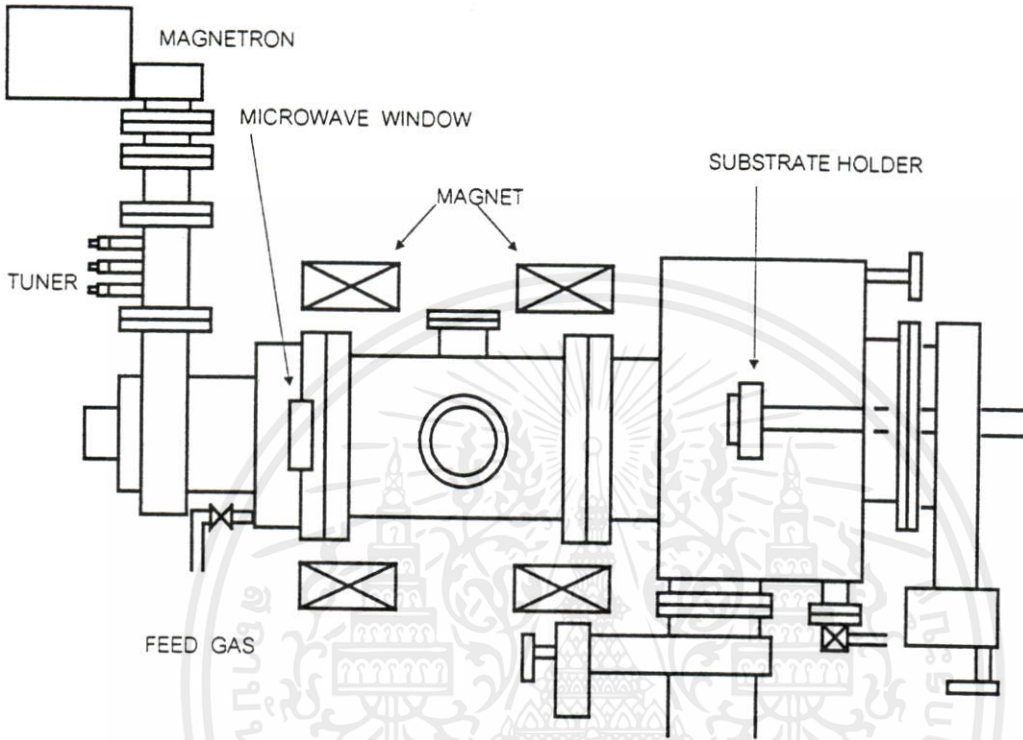
#### 1.2.2.5 Electron Cyclotron Resonance Microwave-Plasma-Assisted CVD

วิธีนี้นำเสนอครั้งแรกโดย Kawarada et al. ในปี ค.ศ. 1987 โดยพัฒนามาจากวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD มีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่ในการเกิดฟิล์มเพชรให้มีขนาดกว้างขึ้นและลดอุณหภูมิการสร้างให้ต่ำลง แผนภาพวิธีนี้แสดงได้ในรูปที่ 1.6 พบว่าระบบประกอบไปด้วย Magnetron ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ, Waveguide, Cylindrical cavity และ Electromagnet 2 คู่ วางอยู่รอบ Cylindrical cavity สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นจาก Electromagnet เพื่อใช้ควบคุมบริเวณการเกิดฟิล์มเพชร คลื่นไมโครเวฟถูกสร้างที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD ทำให้เกิดพลาสมาของก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน พร้อมกันนั้น Electromagnet จะให้กำเนิดสนามแม่เหล็กค่า 875 Gauss อันเป็นเงื่อนไขของการเกิด Electron cyclotron resonance ความถี่ของ Electron gyration มีค่าเท่ากับ ความถี่ของไมโครเวฟที่ 2.45 GHz สนามแม่เหล็กจะเกิดโดยรอบ Cylindrical cavity และทำหน้าที่ควบคุมการกระจายของพลาสมาอย่างสม่ำเสมอ ผลของ Resonance ทำให้อิเล็กตรอนมีค่าพลังงานสูงเกิดการแตกตัวของอะตอมไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนอย่างสม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากพลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นพลังงานสูง

ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้จะใช้ความดันต่ำคือน้อยกว่า 10 ทอร์ อุณหภูมิของฐานรอง 400-600 °C ซึ่งน้อยกว่าวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD ฟิล์มเพชรที่ได้มีขนาดผลึกใหญ่มีความสม่ำเสมอและคุณภาพดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

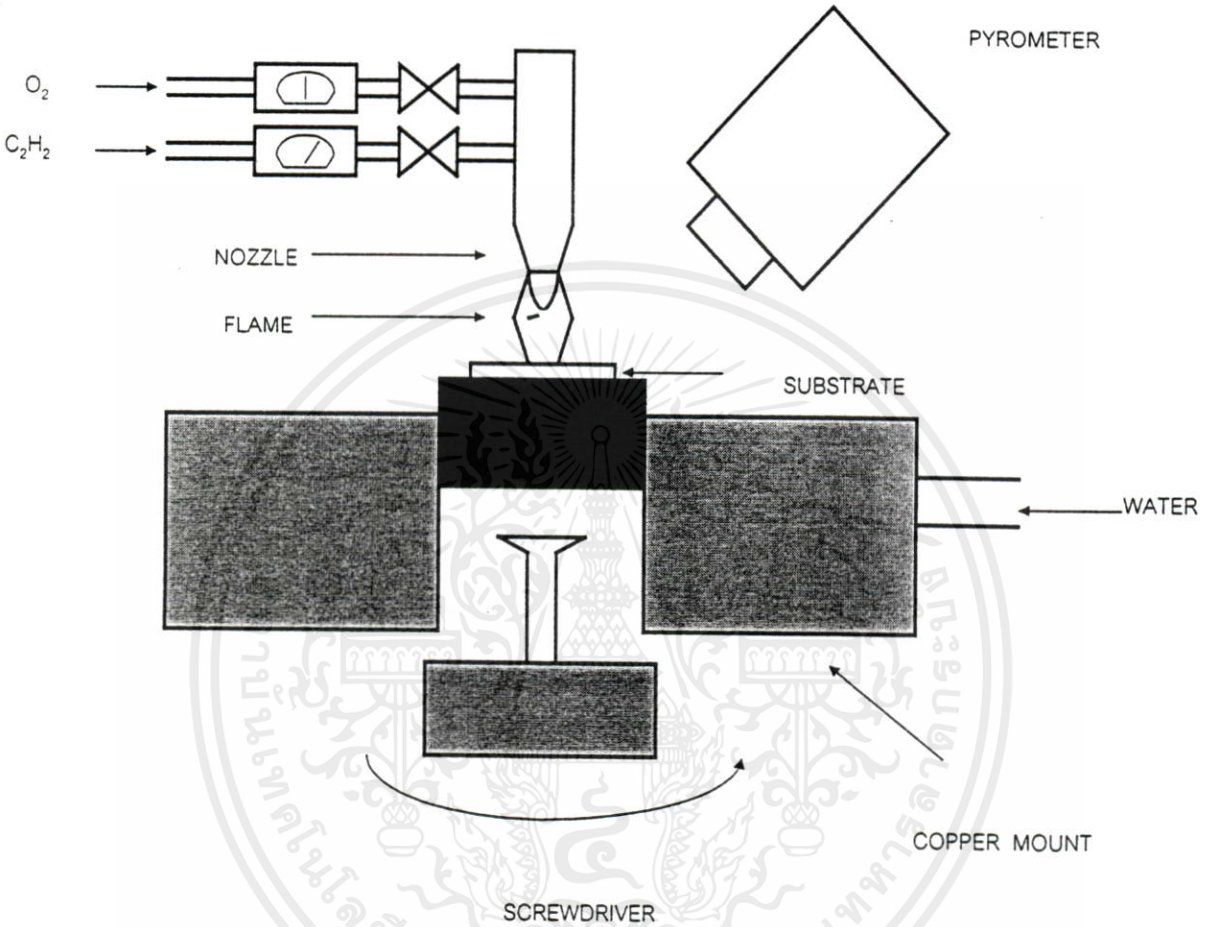
รูปที่ 1.6 แสดงแผนภาพระบบ Electron Cyclotron Resonance Microwave-Plasma-Assisted CVD [4]



### 1.2.3 Combustion Flame - Assisted CVD

Hirose et al. รายงานถึงการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้เป็นครั้งแรกในปีค.ศ.1988 ฟิล์มเพชรถูกสร้างขึ้นที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้เปลวไฟที่เกิดจากก๊าซผสมระหว่างอะเซติลีนกับไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่เหมาะสม วิธีนี้ได้รับการตรวจสอบและยืนยันจากคณะทำงานของ Naval Research Laboratories ว่าสามารถสร้างฟิล์มเพชรได้จริง นับเป็นการกระตุ้นให้มีผู้สนใจจำนวนมากเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้หาได้ง่าย ต้นทุนการสร้างมีค่าต่ำมากและอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรมีค่าสูง รูปที่ 1.7 แสดงแผนภาพวิธี Combustion Flame-Assisted CVD ก๊าซอะเซติลีนและก๊าซออกซิเจน จะถูกควบคุมอัตราการไหลโดย Mass flow controllers เพื่อให้ได้ส่วนผสมตามต้องการ ด้านหลังของฐานรองมีน้ำไหลผ่านเพื่อระบายความร้อน อุณหภูมิของฐานรองอยู่ในช่วง 800-1,000°C อัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรมีค่าประมาณ 20  $\mu\text{m/hr}$  (Snail et al. จาก Naval Research Laboratories รายงานว่าค่าสูงสุดที่พบมีค่าถึง 150  $\mu\text{m/hr}$ ) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะมีปัญหาในการสร้างเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิของฐานรองทำได้ยาก

รูปที่ 1.7 แสดงแผนภาพระบบ Combustion Flame-Assisted CVD [4]



เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ที่ความดันต่ำที่กล่าวถึงในข้างต้นแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันออกไปในเทอมของอัตราการเกิดฟิล์มเพชร, พื้นที่ในการเกิดฟิล์มเพชรหรือคุณภาพของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น ซึ่งการเลือกใช้เทคนิคการสร้างขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการนำฟิล์มเพชรไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ฟิล์มเพชรที่ใช้ต้องมีคุณภาพสูง มีความบริสุทธิ์ปราศจากสารเจือปน ดังนั้นควรใช้เทคนิคการสร้างวิธี Filament-Assisted Thermal CVD หรือวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD แต่ถ้าต้องการสร้างฟิล์มเพชรให้มีความหนาเพื่อใช้เคลือบป้องกันการสึกกร่อน เทคนิคการสร้างวิธี DC-Plasma-Assisted CVD หรือวิธี DC-Plasma Jet CVD ซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าอัตราการเกิดฟิล์มเพชรสูง จะถูกเลือกใช้งาน

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร

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

นอกจากนี้เพชรยังมีค่าสภาพนำความร้อนสูงมาก ( $20 \text{ W/cm.K}$ ) ทำให้ฟิล์มเพชรถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูง เช่น นำมาใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงหรือนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

สำหรับในส่วนของคุณสมบัติทางด้านอื่นๆ[5] อาทิเช่น การที่เพชรมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามสูง ( $5.45 \text{ eV}$ ) มากกว่าสารกึ่งตัวนำหลักที่ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นซิลิกอน ( $1.12 \text{ eV}$ ) หรือแกลเลียมอาร์เซไนด์ ( $1.43 \text{ eV}$ ) อีกทั้งยังมีค่าความคล่องตัวของโฮลและอิเล็กตรอนสูง ( $1,800 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  และ  $2,000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  ตามลำดับ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ( $\epsilon = 5.7$ ) รวมถึงค่าสนามไฟฟ้าพังทลายสูง ( $10 \times 10^6 \text{ V/cm}$ ) และเพชรธรรมชาติมีความเป็นฉนวนสูงมาก (ความต้านทานประมาณ  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$ ) แต่ในการสร้างฟิล์มเพชรสามารถใส่อะตอมสารเจือลงไปเพื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานให้มีค่าตามต้องการตั้งแต่  $10^{-2}$ - $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$  จากคุณสมบัติที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้ฟิล์มเพชรถูกนำไปใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากฟิล์มเพชรนี้สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูง ความถี่สูงและทนต่อแรงดันพังทลายได้ดี

ปัจจุบันมีการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD ประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านเชิงกลและเชิงไฟฟ้า ตัวอย่างของการใช้งานที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นแค่บางส่วนเท่านั้น

**1. Wear resistant coating** ฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นถูกนำไปใช้เคลือบอุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมหนักประเภทใบเลื่อยหรือหัวเจาะต่างๆ แต่เดิมอุปกรณ์ดังกล่าวมักทำมาจากซิลิกอนคาร์ไบด์หรือทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นสารที่มีความแข็งน้อยกว่าเพชร ฟิล์มเพชรสามารถเคลือบบนวัสดุหลายชนิด อาทิเช่น Non-ferrous metal, พลาสติก และสารประกอบต่างๆ จากการศึกษพบว่า อุปกรณ์ใช้งานที่เคลือบด้วยฟิล์มเพชรจะมีประสิทธิภาพ อายุการใช้งานตลอดจนความเร็วในการชุบหรือเจาะเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ฟิล์มเพชรยังสามารถนำไปเคลือบเพื่อป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนที่ใช้งานหนักเป็นพิเศษ เช่น Gearboxes หรืออุปกรณ์ภายในเครื่องยนต์ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

**2. Thermal management** เนื่องจากเพชรธรรมชาติมีค่าสภาพนำความร้อนสูงมากกว่าค่าสภาพนำความร้อนของทองแดงถึง 4 เท่า อีกทั้งยังมีค่าความเป็นฉนวนสูง ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงถูกใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น เลเซอร์ไดโอด, วงจรรวมไมโครเวฟขนาดเล็ก โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะติดลงบนฟิล์มเพชร ก่อนที่จะนำไปบรรจุเพื่อใช้งานต่อไป ข้อดีของการใช้ฟิล์มเพชรเป็นตัวระบายความร้อนคือสามารถที่จะลดมวลและปริมาตรของการใช้ตัวระบายความร้อนเมื่อเทียบกับแบบเดิมได้มากกว่า 50% ทำให้ความหนาแน่นในการบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น และลดขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้งานจากเดิมลง [6] ซึ่งปัจจุบันได้เริ่มมีการใช้งานฟิล์มเพชรเป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในยานอวกาศบ้างแล้ว

**3. Electronic device** ปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาการนำฟิล์มเพชรมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทั้งประเภทแอคทีฟและพาสซีฟ แม้ว่าโดยทั่วไปฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นจะแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก แต่สามารถเปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้ โดยในการสร้างจะเติมอะตอมของธาตุในหมู่ 3 ลงไป (นิยมใช้  $B_2H_6$  หรือ  $B_2O_3$ ) สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนั้นทำได้ยาก เนื่องจากขนาดอะตอมของ P หรือ As ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 5 มีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของ C ทำให้ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างแลตทิซของอะตอมคาร์บอนได้ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงการใส่ธาตุตัวใหม่ในการใช้เป็นอะตอมสารเจือ ซึ่งปัจจุบัน Li กำลังเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก

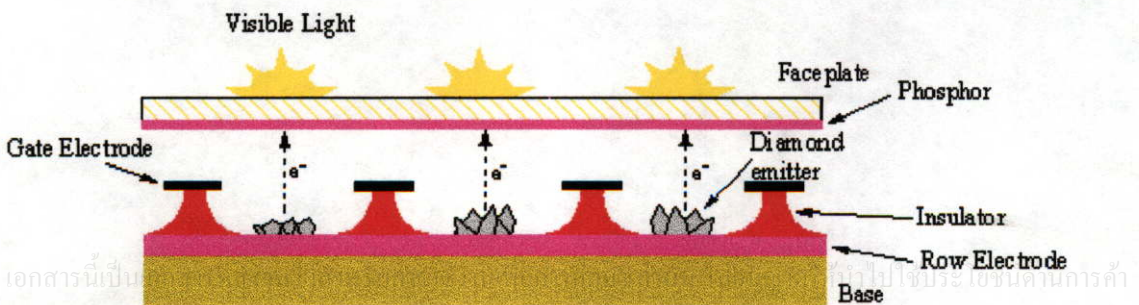
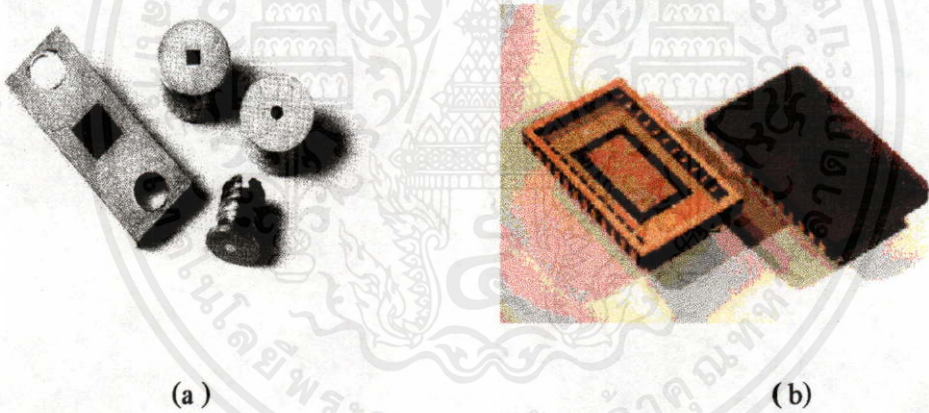
อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากฟิล์มเพชรมีอยู่หลายชนิด เช่น ไดโอด, FET, ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ และอื่นๆอีกมากมาย สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้ฟิล์มเพชรที่กล่าวถึงในที่นี้คือ ตัวเก็บประจุ [7] และจอภาพแบบแบน [8]

ตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมการบิน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุแบบโพลีเมอร์ซึ่งเป็นสารที่ใช้งานในอดีต พบว่าตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรมีขนาดของน้ำหนักและปริมาตรลดลงถึง 50% อุณหภูมิในการใช้งานเพิ่มขึ้นจากเดิม 5 เท่า ความสามารถในการประจุพลังงานสูงถึง 7 เท่า [7] และยังสามารถทำงานที่แรงดันสูงได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สำหรับการนำมาใช้ในจอภาพแบบแบนนั้นจะอาศัยคุณสมบัติการเกิด "Negative Electron Affinity" ของเพชร คือเมื่อเพชรได้รับการไบอัสโพลที่สุญญากาศจะเกิดอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวหน้าของเพชร ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งาน ฟิล์มเพชรถูกสร้างให้เกิดเป็นจุดเล็กๆลักษณะ

ลักษณะเหมือนกับตารางถัก โดยแต่ละจุดเรียกว่า “Pixel” แต่ละ Pixel เมื่อได้รับการไบอัสไฟลอปจะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมา อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยกริดซึ่งถูกไบอัสด้วยไฟบวก พุ่งเข้าชนเป้าหรือจอภาพซึ่งมีสารเคลือบอยู่ (ตัวอย่างเช่น ฟอสฟอรัส) ทำให้เกิดแสงสว่างขึ้นบริเวณที่อิเล็กตรอนตกกระทบ ทั้งหมดนี้เป็นหลักการพื้นฐานของจอภาพแบบเบน ซึ่งเมื่อเทียบกับชนิดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือแบบ LCD (Liquid Crystal Displays) พบว่าจอภาพชนิดใหม่นี้จะให้ความสว่างและมุมมองเพิ่มขึ้นจากเดิมตลอดจนสามารถขยายขนาดของจอภาพให้เพิ่มขึ้นได้(อาจจะขยายได้ถึงหน่วยตารางเมตร)

รูปที่ 1.8 แสดงการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร (a) ใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับเลเซอร์ไดโอด [4] (b) ตัวเก็บประจุ [7] (c) จอภาพแบบเบน [8]



เอกสารนี้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีของเพชรและหลักการควบคุมการเกิดฟิล์มเพชรเฉพาะที่

คาร์บอนเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 4 โดยทั่วไปแล้วเมื่อก้าวถึงคาร์บอน เรามักจะนึกถึงถ่านอันเป็นรูปหนึ่งของมันที่พบได้ง่าย แต่แท้จริงแล้วคาร์บอนยังสามารถอยู่ในรูปอื่นได้อีก อาทิเช่น กราไฟต์ หรือ เพชร เป็นต้น ตลอดจนปัจจุบันได้มีผู้สนใจศึกษาถึงการสร้างและนำฟิล์มเพชรมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะเทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้นจำเป็นต้องมีอะตอมคาร์บอนในระบบเพื่อที่จะทำให้เกิดฟิล์มเพชรขึ้นมา แต่ในบางครั้งพบว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่มีคุณสมบัติเป็นเพชรหรือมีคุณสมบัติของสารชนิดอื่นอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น กราไฟต์, อมอร์ฟัสคาร์บอน (Amorphous carbon), Microcrystalline carbon และ Lonsdaleite ซึ่งสารที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ก็คือรูปต่างๆของคาร์บอนนั่นเอง โดยสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันไปแล้วแต่ลักษณะโครงสร้างภายใน ดังนั้นหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงรูปต่างๆของคาร์บอนที่มักพบในกระบวนการสังเคราะห์เพชร

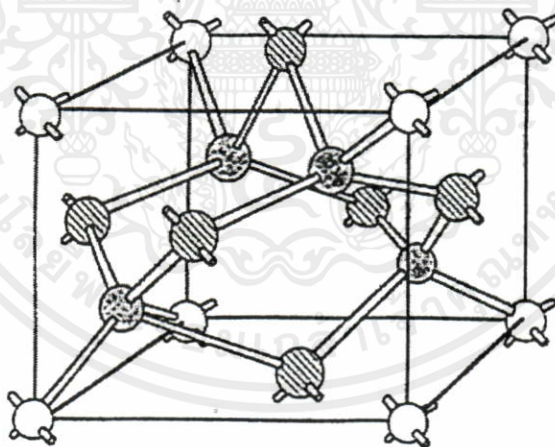
#### 2.1 เพชรและรูปต่างๆของคาร์บอน

##### 2.1.1 Diamond (เพชร)

ในกรณีของเพชรธรรมชาติ อะตอมคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า “Diamond structure” ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 จากรูปพบว่าภายในยูนิตเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง  $1/4$  เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิตเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ  $sp^3$  ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้ อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมอง

อีกอย่างหนึ่งว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ  $\{111\}$  2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นระนาบ  $\{111\}$  ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุดและระนาบ  $\{111\}$  ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายขวางวางซ้อนกันอยู่เป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆของวงแหวนหกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกัน ในทิศทางของระนาบ  $\{111\}$  การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น  $3.567 \text{ \AA}$  และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ  $1.54 \text{ \AA}$  ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First order peak) ของเพชรมีค่า  $1332 \text{ cm}^{-1}$  และยอดลำดับที่สอง (Second order peak) ของเพชรเท่ากับ  $2458 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดลำดับที่หนึ่งอยู่ที่  $1284 \text{ cm}^{-1}$

รูปที่ 2.1 แสดง โครงสร้างผลึกของเพชร [5]

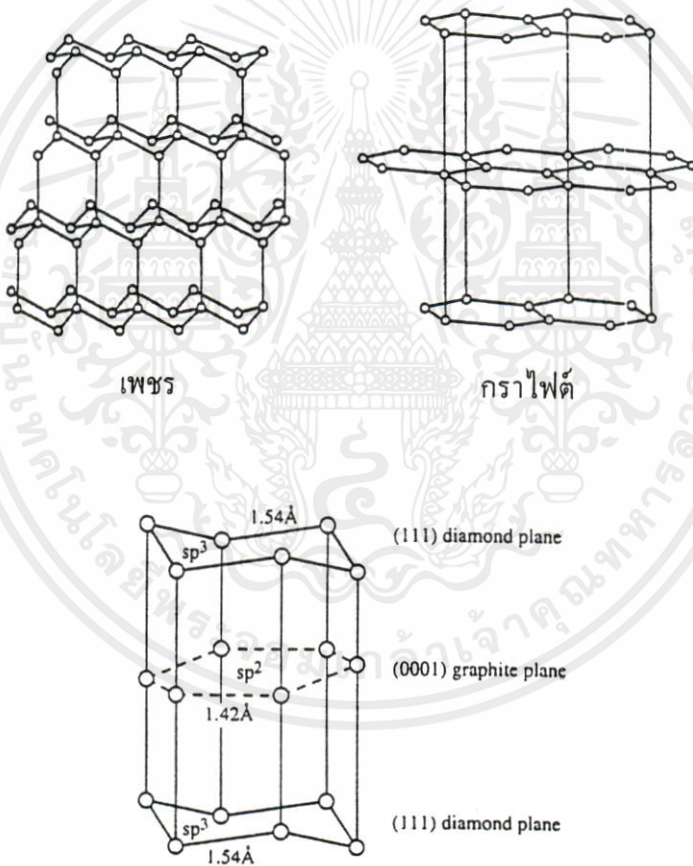


### 2.1.2 Graphite

กราไฟต์เป็นรูปพื้นฐานของคาร์บอนที่พบได้มากที่สุด ลักษณะโครงสร้างภายในของมันแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 อะตอมคาร์บอนจะจับตัวที่ลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมเช่นเดียวกับเพชรแต่ข้อแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัดคืออะตอมคาร์บอนที่จับตัวเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมของกราไฟต์นั้นจะไม่มี การเชื่อมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้กันเหมือนวงแหวนหกเหลี่ยมของเพชร แต่จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบเสมอกัน อีกทั้งคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ Trigonal กับอะตอมทั้งสามตัวที่อยู่

ใกล้เคียงด้วยพันธะแบบ  $sp^2$  การเรียงลำดับชั้นของวงแหวนหกเหลี่ยมกราไฟต์จะเป็นแบบ AB AB AB... ตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงเท่ากับ 1.42 Å ในขณะที่ค่าคงที่แลตทิซคือ 6.707 Å สำหรับกราไฟต์ ผลการวัดด้วย Raman spectroscopy จะแสดงตำแหน่งยอดลำดับที่หนึ่งที่ค่า  $1580\text{ cm}^{-1}$  และยอดลำดับที่สองอยู่ที่  $3240\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราไฟต์ [5]



ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในกราไฟต์ และเพชร [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### 2.1.3 Microcrystalline carbon

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของผลึกเพชรจะมีเพียงพันธะของคาร์บอนอะตอมแบบ  $sp^3$  เท่านั้น แต่บางครั้งในการสังเคราะห์เพชรอาจจะมีพันธะแบบ  $sp^2$  ใกล้เคียง Crystallite grain boundaries สารที่มีคุณสมบัติ

ลักษณะเช่นนี้จะถูกเรียกว่า Microcrystalline carbon หรือ Microcrystalline graphite กราฟจาก Raman จะแสดงยอดคลื่นที่ตำแหน่ง  $1355\text{ cm}^{-1}$  เมื่อเนื้อสารมีขนาดของเกรนเล็กมากๆ และยอดคลื่นอันดับสองมีค่า  $2710\text{ cm}^{-1}$

#### 2.1.4 Amorphous carbon

Amorphous carbon ที่มีพันธะเป็นแบบ  $sp^2$  จะแสดงยอดคลื่นของ Raman มีลักษณะเป็นแถบระหว่างตำแหน่งยอดที่  $1345\text{ cm}^{-1}$  ถึง ตำแหน่งที่  $1550\text{ cm}^{-1}$  โดยยอดคลื่นจะเปลี่ยนจากค่า  $1345\text{ cm}^{-1}$  เป็นค่า  $1550\text{ cm}^{-1}$  เมื่อเนื้อสารเกิดการ Hydrogenated ซึ่งที่ตำแหน่งยอดคลื่น  $1550\text{ cm}^{-1}$  นี้ สารจะถูกเรียกว่า เป็น “Diamond-like carbon” (DLC) ส่วน Amorphous carbon ที่มีพันธะเป็นแบบ  $sp^3$  จะมีตำแหน่งของยอดคลื่นประมาณ  $1140\text{ cm}^{-1}$  ซึ่ง Amorphous carbon ชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งคือ “Small size cubic diamond” (ขนาดของผลึก  $< 0.1\ \mu\text{m}$ )

#### 2.1.5 Lonsdaleite

ถ้าในยูนิตเซลล์มีการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นแบบ Hexagonal และวงแหวนหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอนมีการเรียงตัวเป็นชั้นแบบ AB AB AB ... อะตอมคาร์บอนที่มีการจัดตัวเป็นโครงสร้างเช่นนี้จะถูกเรียกว่า “Lonsdaleite” หรือ “Hexagonal diamond” ค่าคงที่แลตทิซในทิศทาง a และ c จะเท่ากับ  $2.52\ \text{\AA}$  และ  $4.12\ \text{\AA}$  ตามลำดับ โดยที่ระยะห่างระหว่างอะตอมที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ  $1.52\ \text{\AA}$  และจะแสดงค่ายอดคลื่นของ Raman ที่ตำแหน่งตั้งแต่  $1315\text{-}1326\text{ cm}^{-1}$  ส่วนมากแล้วเรามักพบการเรียงตัวของคาร์บอนแบบนี้ได้ในเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์แบบ Shock wave

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นรูปต่างๆของคาร์บอนที่พบได้ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร อย่างไรก็ตามฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดๆ ค่ายอดคลื่นจาก Raman อาจจะไม่แสดงตำแหน่งตรงค่า  $1332\text{ cm}^{-1}$  พอดี แต่จะแสดงตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับค่าดังกล่าว ตัวอย่างเช่น อาจจะมียอดคลื่นเป็น  $1333\text{ cm}^{-1}$  เนื่องจากในการเกิดเพชรขึ้นตามธรรมชาติ กระบวนการเกิดตลอดจนปัจจัยรอบข้างต่างๆมีผลทำให้เพชรธรรมชาติยังมีความแตกต่างกับเพชรที่สังเคราะห์อยู่บ้าง แต่จากผลของการวิเคราะห์หาคุณสมบัติอื่นๆของฟิล์มเพชรพบว่ามีความใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่ได้จากเพชรธรรมชาติมาก จนยอมรับได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติเหมือนกับเพชรธรรมชาติ

## 2.2 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

เพชรธรรมชาติสามารถถูกแบ่งย่อยได้เป็น 4 กลุ่ม โดยใช้ชนิดและระดับของสารเจือปนที่พบในตัวมันเองเป็นเกณฑ์กำหนด

1. Type I<sub>a</sub> diamond เพชรธรรมชาติที่พบส่วนมากจะเป็นเพชรชนิดนี้ โดยมันจะมีไนโตรเจนเจือปนเป็นจำนวนมาก (ตั้งแต่ 0.3 % ขึ้นไป) และไนโตรเจนอยู่รวมกันเป็นกลุ่มอันเป็นลักษณะที่พบในเพชรธรรมชาติ

2. Type I<sub>b</sub> diamond พบได้น้อยมากในธรรมชาติ (ประมาณ 0.1 %) ส่วนมากพบในเพชรที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น มีค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงถึง 500 ppm และไนโตรเจนที่พบมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

3. Type II<sub>a</sub> diamond พบได้น้อยมากในธรรมชาติ เพชรชนิดนี้จะมีไนโตรเจนเจือปนอยู่จำนวนน้อยมากจนทำให้การตรวจสอบด้วยการวัดการดูดกลืน IR หรือ UV ทำได้ยาก และไม่มีโบรอนเจือปน ทำให้มีความเป็นฉนวนสูง

4. Type II<sub>b</sub> diamond เพชรชนิดนี้พบได้ยากที่สุดในธรรมชาติ มันจะมีค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนน้อยที่สุด (น้อยกว่าชนิด II<sub>a</sub>) และมีจำนวนโบรอนมากกว่าไนโตรเจน ดังนั้นเพชรชนิด II<sub>b</sub> นี้จึงเป็นสารกึ่งตัวนำ

นอกจากนี้เพชรยังมีคุณสมบัติอีกหลายประการที่น่าสนใจ อาทิเช่น คุณสมบัติทางกล, คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติแต่ละชนิดจะแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

### 2.2.1 คุณสมบัติทางกล

โครงสร้างของเพชรจะประกอบด้วยพันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรง ดังนั้นเพชรจึงมีคุณสมบัติทางกลหลายๆอย่างที่พิเศษกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ตัวอย่างเช่น เพชรจะมีความแข็ง, Molar density และ Thermal conductivity สูง อีกทั้งเพชรมีค่าความยืดหยุ่นและ Bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นๆตลอดจนยังมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนต่ำมาก คือมีค่าเพียง  $0.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  คุณสมบัติต่างๆทางกลของเพชรจะมีรายละเอียดดังนี้

- **Thermal conductivity** เพชรมีค่า Thermal conductivity สูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมด คือมีค่าถึง 20 watts/cm.K ข้อมูลแสดงการเปรียบเทียบอยู่ในภาคผนวก ก ค่าความนำความร้อนนี้จะมีค่าลดลงเมื่อมีไนโตรเจนจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น ในเพชร type I<sub>a</sub> จะมีค่าความนำความร้อนลดลง 30-50 % จากค่าสูงสุด หากฟิล์มเพชรเป็นแบบผลึกรวม (Polycrystalline) ที่ได้จากการ

สร้างที่มีคุณภาพที่ดี พบว่าความนำความร้อนในทิศทางของการปลูกผลึก มีค่าเป็น 55 % ของผลึกเดี่ยว ส่วนในระนาบของการปลูกผลึก ความนำความร้อนของผลึกเดี่ยวจะมีค่ามากกว่า 25 % แต่ส่วนมากแล้วจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก

- **Molar heat capacity** ค่า Molar heat capacity หมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของหนึ่งน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา จากภาคผนวก ก แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity ระหว่างเพชรกับวัสดุชนิดอื่นๆ จะพบว่าค่าของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ นั่นหมายความว่า เพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีเท่ากับ Heat sink

- **Thermal expansion** คือค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ แพร่ไปถึงเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ  $0^{\circ}\text{C}$  ค่า Thermal expansion นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Molar heat capacity สำหรับของแข็งค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายความร้อนเชิงปริมาตรจะมีค่ามากกว่าเชิงเส้นประมาณ 3 เท่า สำหรับค่า Thermal expansion ของเพชรและวัสดุอื่นๆ ถูกเปรียบเทียบไว้ในภาคผนวก ก

- **Hardness** เพชรเป็นสารที่มีความแข็งสูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมดที่เรารู้จัก โดยจะมีค่าความแข็งสูงถึง  $5,700-10,400 \text{ kg/mm}^2$  อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามสร้างสารประกอบ  $\text{C}_3\text{N}_4$  (Carbon Nitride) เชื่อว่าเป็นสารที่มีความแข็งมากกว่าเพชร สำหรับตารางการเปรียบเทียบค่าความแข็งของเพชรกับวัสดุอื่นๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก ก

สำหรับคุณสมบัติทางกลอื่นๆของเพชรที่ไม่ได้ยกตัวอย่างในที่นี้ เช่นค่า Elastic wave, Young's modulus, Fracture toughness, Coefficient of friction และค่า Density จะแสดงไว้ในตารางของภาคผนวก ก ทั้งหมด

### 2.2.2 คุณสมบัติทางแสง

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่แล้ว จะพิจารณาค่าดัชนีหักเห และการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ และความยาวคลื่นที่กำหนด ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของเพชรและวัสดุอื่นๆที่อุณหภูมิห้องจะแสดงในภาคผนวก ก

### 2.2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall ในเพชรธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{12}$  ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง  $10^{15}$  ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง  $1,800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า  $2,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  แต่

ในเพชรที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  พบว่ามีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง  $850\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเจอร์มาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติโมนิไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนในวัสดุอื่นๆจะมีความเร็วโฮลอิมิตัวและ Dielectric strength ต่ำ ที่ความแรงสนามไฟฟ้า  $10^4\text{ V/cm}$  ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนและโฮลเริ่มมีการอิมิตัวสำหรับโฮลมีค่าความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดที่  $10^7\text{ cm/s}$  และในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่  $2.0 \times 10^7\text{ cm/s}$  ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง  $10^{16}\ \Omega\cdot\text{cm}$

โบรอนเป็นสารเจือที่ถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวทั้งนี้เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 3 ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมเหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดพิษเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก พลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อยลงเกิด Shallow level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่าประมาณ  $100\text{ ppm}$  หรือ  $10^{19}\text{ cm}^{-3}$  พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ  $370 \times 10^{-3}\text{ eV}$  และสำหรับฟิล์มเพชรชนิด Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า  $10^{19}\text{-}10^{20}\text{ cm}^{-3}$ ) ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าต่ำคือประมาณ  $2 \times 10^{-3}\text{ eV}$

สำหรับกรณีของสารเจือผู้ให้ หากพิจารณาในโตรเจนพบว่าไม่สามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นของไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าแถบความนำมาก คือมีค่าถึง  $1.57\text{ eV}$  ดังนั้นจึงไม่เกิด Shallow level ขึ้น อีกทั้งอะตอมของไนโตรเจนยังทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ส่วนกรณีของฟอสฟอรัสซึ่งมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าคาร์บอนการคำนวณจากทฤษฎีทำนายว่าฟอสฟอรัสสามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ Okano et al. รายงานในปี ค.ศ. 1990 ว่าได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขึ้นมา โดยใช้ไอระเหยของสารละลาย  $\text{P}_2\text{O}_5$  ในเมทานอล ซึ่งถูกเจือจางด้วยอะซิโตน ค่าความหนาแน่นประจุพาหะวัดได้  $10^{15}\text{ cm}^{-3}$  และความคล่องตัวของอิเล็กตรอน  $50\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  แต่ปัญหาที่พบคือ ไม่สามารถควบคุมค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์ยังไม่มีคามแน่นอน และอะตอมฟอสฟอรัสมีขนาดใหญ่เมื่อสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนแล้วมีผลทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ดังนั้นลิเทียมจึงเป็นสารที่ได้รับความนิยมและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์มเพชรที่ทำการเจือสารลิเทียมด้วยวิธี Ion-implantation แสดงคุณสมบัติเป็นฟิล์มชนิดเอ็น แต่ในการเจือสารแบบ In-situ และ In-diffusion จะไม่เกิดผลตามต้องการเนื่องจากเกิดการชดเชยด้วย

ความหนาแน่นสูงของสถานะผู้รับที่กระจายอยู่ในแถบพลังงานต้องห้ามตลอดจนลิเทียมในเพชรมีการกระจายตัวสูงอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้องซึ่งทำให้การเจือสารไม่มีความแน่นอน

#### 2.2.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดดังกล่าวนิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลจากตาราง 2.1 สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ [5]

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

1. เพชรมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามสูงกว่าซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์มากจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงๆซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้น (โฮลและอิเล็กตรอน) จำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้าม ทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ

2. เพชรที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง
3. ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ โดยเติมอะตอมสารเจือลงไป

## 2.3 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.2 เกี่ยวกับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีต่างๆ แม้ว่าแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามจะมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญเหมือนกันดังนี้

### 2.3.1 ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่

เนื่องจากการเกิดของเพชรจากอนุภาคคาร์บอน ในบรรยากาศที่มีอะตอมของไฮโดรเจน เป็นเครื่องยืนยันให้เห็นว่า เพชรจะมีความเสถียรในสภาวะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่ากราฟิต สามารถอธิบายได้ดังนี้คือในโครงสร้างเพชรถ้าหากมีอะตอมคาร์บอนข้างเคียงสองอะตอมถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจน จะพบว่าพันธะ  $sp^3$  ยังคงมีอยู่ ซึ่งในกรณีเดียวกันนี้ กราไฟต์จะมีการเปลี่ยนแปลงในวงแหวนกราฟิตทั้งหมด นั่นคือ ในการเกิดเพชรจากอนุภาคคาร์บอน ซึ่งถูกเจือจางด้วยไฮโดรเจน จะนำไปสู่สองกระบวนการคือ หนึ่งคาร์บอนเริ่มก่อตัวในรูปของกราฟิต โดยมีเพชรอยู่บ้างเล็กน้อย และสองเกิดการเลือกกำจัดกราฟิตออกด้วยอะตอมไฮโดรเจน อาจกล่าวโดยสรุปว่า อะตอมไฮโดรเจนเป็นตัวสำคัญในการกำจัดกราฟิตหรือลดการเกิดกราฟิตขึ้น

### 2.3.2 ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอน

ไม่ว่าจะกระตุ้นด้วยความร้อน พลาสมา หรือ Combustion เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมา โดยอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่ฐานรอง ซึ่งส่วนมากแล้วในกระบวนการ CVD แรงที่ใช้ส่งอะตอมคาร์บอน จะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างบริเวณที่ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นกับพื้นผิวฐานรอง หรืออาจใช้การเป่าก๊าซเฟสไปยังฐานรองรวมถึงการใช้สนามไฟฟ้าในการช่วยการส่งผ่าน

### 2.3.3 อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม

วิธี CVD แบบความร้อนทั้งหมดที่กล่าวมา เพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1,200 °C แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ถ้าหากอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูงหรือต่ำเกินไปจากนี้ อาจจะทำให้เกิดกราฟไฟต์หรือ Diamond-like carbon (DLC) ได้

### 2.3.4 ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการนิวเคลียชัน ซึ่งกระบวนการเตรียมพื้นผิวที่ใช้มีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะให้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังรวมไปถึงฐานรองที่ใช้ บริเวณพื้นผิวต้องไม่มีตัวเร่งต่างๆที่ทำให้เกิดกราฟไฟต์ และต้องมีข้อจำกัดในการแพร่ของอะตอมคาร์บอนลงไปในพื้นที่ของฐานรองที่อุณหภูมิที่ทำการสร้าง

ในกระบวนการสร้างนั้น ต้องใช้หลักการทั้งสี่ข้อนี้ร่วมกันเพื่อผลออกมาจะได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดี อัตราการเกิดฟิล์มเพชรมีค่าสูง หากขาดข้อหนึ่งข้อใดไป ผลที่ออกมาจะไม่ใช่เพชรคืออาจเป็นกราฟไฟต์, อมอร์ฟัสคาร์บอน หรือ Diamond-like carbon ก็ได้โดยวิธีการที่ใช้ในการควบคุมเงื่อนไขทั้งสี่ข้อดังกล่าว สามารถใช้เทคนิคหลายอย่างควบคุมตามความเหมาะสม

สำหรับในวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้ จะใช้การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Filament-Assisted Thermal CVD ดังที่ได้กล่าวมาบ้างแล้วในหัวข้อ 1.2.1.1 ซึ่งฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณภาพดีราคาต้นทุนต่อการสร้างต่ำ และยังสามารถสร้างได้ในบริเวณกว้างโดยบริเวณที่เกิดเพชรจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของไส้หลอด เนื่องจากบริเวณรอบๆไส้หลอด มีการกระตุ้นของก๊าซเฟสเกิดขึ้น

อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธีนี้คือมักจะเกิดการเสื่อมสภาพของไส้หลอดเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรคาร์บอนกับไส้หลอด อีกทั้งขณะทำการสร้างเพชรเป็นเวลานานไส้หลอดจะมีการย่อยหรือบิดเบี้ยว เนื่องจากค่าแรงดึงคูดของโลหะและความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นความร้อนของฐานรองมีค่าไม่สม่ำเสมอทั้งแผ่น ส่งผลต่อคุณภาพของฟิล์มที่ได้ Wolden et al. [9] ได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนรูปทรงของไส้หลอด, เส้นผ่านศูนย์กลาง, ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง พบว่าค่าต่างๆเหล่านี้มีผลทำให้อุณหภูมิฐานรองเปลี่ยนไป และยังพบอีกว่าหากอุณหภูมิของฐานรองมีความสม่ำเสมอ ความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จะมีขนาดเท่ากันตลอด ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มจำนวนไส้หลอด หรือระยะห่างระหว่างฐานรองกับไส้หลอด ในกรณีที่ไส้หลอดมีจำนวนมากกว่าหนึ่งอัน อุณหภูมิของฐานรองจะมีความสม่ำเสมอ ณ จุดที่ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะ

ห่างของไส้หลอดแต่ละอัน อย่างไรก็ตามคุณภาพของฟิล์มเพชรจะมีค่าลดลง เมื่อระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกระบวนการส่งผ่านของอนุภาคก๊าซในรีแอคเตอร์จะมีค่าจำกัดในการแพร่

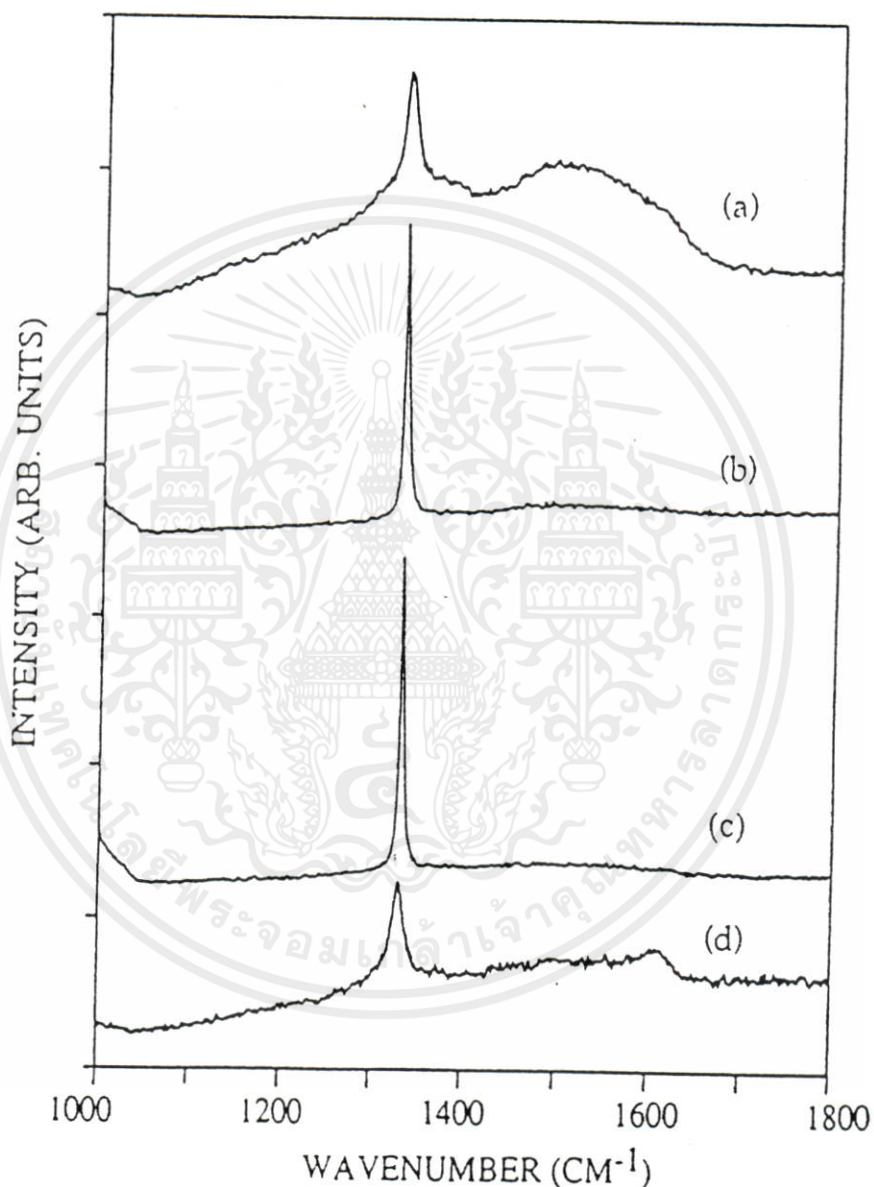
ก๊าซที่ใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ส่วนมากนิยมใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (เช่น  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$  หรือ  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) ผสมกับก๊าซไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เงื่อนไขการสร้างอาจใช้อัตราส่วนของก๊าซ  $\text{CH}_4$  ต่อไฮโดรเจนน้อยกว่า 1% อัตราการไหลของก๊าซ 100 sccm. ความดันที่ใช้ต่ำกว่า 100 ทอร์ อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $800^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิไส้หลอดอยู่ระหว่าง  $2,000\text{-}2,200^\circ\text{C}$  ฐานรองที่ใช้อาจเป็น Si หรือ Mo จากเงื่อนไขนี้ฟิล์มเพชรที่ได้มีอัตราการก่อตัวประมาณ  $1\ \mu\text{m/hr}$  และสามารถเพิ่มให้มากขึ้นได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทน, อุณหภูมิไส้หลอด, อัตราการไหลของก๊าซ หรือลดระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง ซึ่งทำให้อุณหภูมิฐานรองมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน และอัตราการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิฐานรองอยู่ระหว่าง  $950^\circ\text{C}$  หลังจากนั้นทั้งค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน และอัตราการก่อตัวเริ่มลดลง

วิธีที่ช่วยในการเกิดฟิล์มเพชรวิธีหนึ่งคือการไบอัสระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง นั่นคือเหมือนกับว่าเป็นการนำเอาวิธีแบบ Hot filament ร่วมกับกระบวนการพลาสมา โดยเพิ่มสนามไฟฟ้าและเหนี่ยวนำให้เกิดประจุขึ้นมาในระบบแบบความร้อน [9] ภายใต้การไบอัสระบบจะประพุดตัวคล้ายไดโอดเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนจากไส้หลอด (โลหะที่อุณหภูมิสูงกว่า  $2,000^\circ\text{C}$ ) มีค่ามากกว่าอิเล็กตรอนจากฐานรอง (อุณหภูมิต่ำกว่า  $1,000^\circ\text{C}$ ) นั่นคือถ้าฐานรองมีสถานะเป็นบวกเมื่อเทียบกับไส้หลอด (Forward bias) กระแสอิเล็กตรอนจากไส้หลอดจะไหลสู่ฐานรองอย่างมาก แต่ถ้าฐานรองถูกไบอัสแบบย้อนกลับทำให้ไม่มีการไหลของอิเล็กตรอน จนกระทั่งถึงค่าแรงดันวิกฤติ (ประมาณ  $-160\ \text{V}$ ) กระแสอิเล็กตรอนจะมีจำนวนมาก ซึ่งที่ค่าแรงดันวิกฤตินี้ก่อให้เกิด DC-plasma ขึ้นในระบบ การไบอัสแต่ละแบบส่งผลให้ฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติต่างๆกันไป การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรที่ได้จากการไบอัสสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่ได้จากการไบอัสฐานรองด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน[9]

- (a) ไบอัสไปข้างหน้า 150 V ( $I \sim 125$  mA) (b) ไม่มีการไบอัส ( $I \sim 10$   $\mu$ A),  
 (c) ไบอัสย้อนกลับ -150 V ( $I \sim -5$   $\mu$ A) (d) ไบอัสย้อนกลับ -180 V ( $I \sim 60$  mA)



จากรูปแสดงให้เห็นว่าการไบอัสจะส่งผลถึงการนิวคลีเอชัน, ลักษณะรูปร่างและการจับตัวเป็นพันธะ การไบอัสไปข้างหน้า ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Electron bombardment ของฟิล์ม ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการนิวคลีเอชัน อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ได้มีความไม่สมบูรณ์สูงและเกิด Secondary nucleation และ Twinning ความไม่สมบูรณ์ของฟิล์มในกรณีนี้แสดงได้ดังกราฟจากรูป 2.3 a สำหรับการไบอัสแบบย้อนกลับกรณีนี้แรงดันไม่เกินค่าวิกฤติ สเปกตรัมของ Raman

แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเพชรมีคุณภาพดี แต่ถ้าแรงดันเกินค่าวิกฤติฟิล์มเพชรที่ได้จะไม่สมบูรณ์ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการให้ไบอัสไปข้างหน้า

สรุปได้ว่าวิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้จะได้เพชรที่มีคุณภาพดีและอัตราการก่อตัวสูงพอสมควร อีกทั้งสิ่งเจือปนที่เกิดจากไส้หลอดมีน้อยมากจนยอมรับให้ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้จนเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสร้างฟิล์มเพชร

## 2.4 กลไกการเกิดฟิล์มเพชรของวิธี CVD

### 2.4.1 กระบวนการของก๊าซเฟส

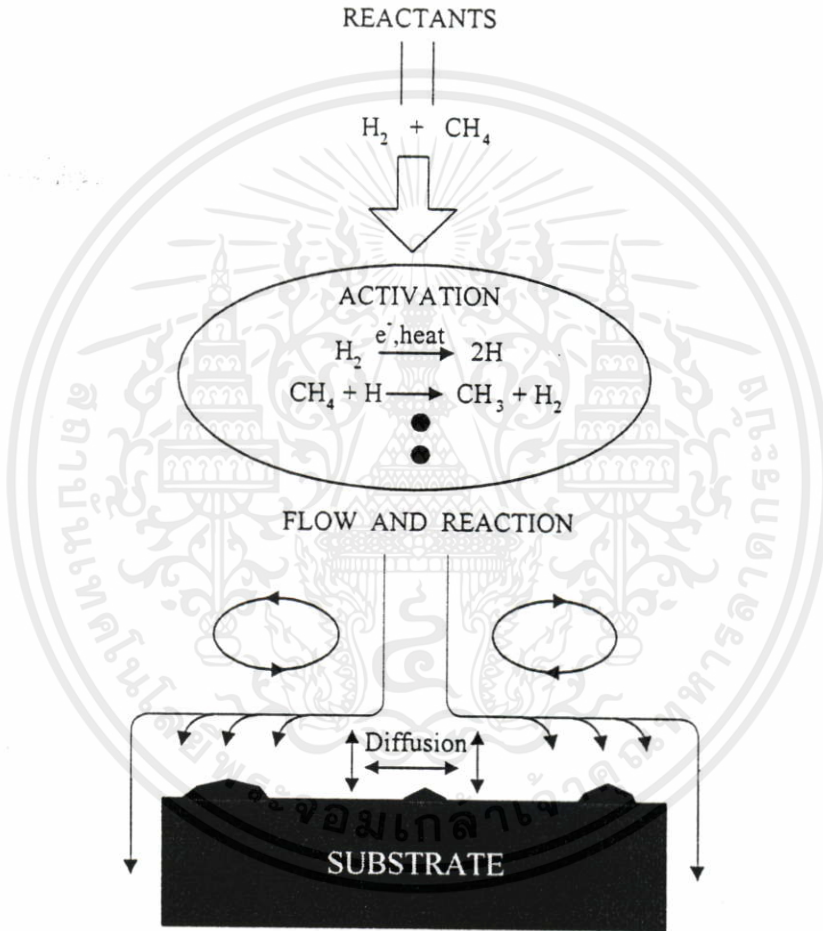
การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐานคือต้องมีการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่าง คือ 1.ทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิวและ 2.แยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจน โดยทั่วไปแล้วรีแอกเตอร์ที่ใช้กระตุ้นมีอยู่ 4 วิธีที่นิยมคือ Hot-filament reactors, Microwave plasma reactors, DC arcjet reactor และ Combustion-synthesis reactors [4]

แม้ว่าแต่ละระบบการสร้างมีความแตกต่างกันในแง่ของรูปแบบทางวิศวกรรมแต่ทั้งหมดจะมีลักษณะสำคัญพื้นฐานเหมือนกัน คือทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดีออกมา พลังงานจำนวนมากที่ใช้จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าหรือเคมี ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนแตกตัว การสร้างจะกระทำที่ความดันต่ำ (ประมาณ 10 torr-1 atm) เพื่อป้องกันการรวมตัวของอะตอมของไฮโดรเจนกลับไปสู่รูปของโมเลกุล อุณหภูมิของก๊าซเฟสมีค่าสูงกว่า 1,700°C เกิดขึ้นที่บริเวณ Activation zone การระบายความร้อนทั้งแบบแอกทิฟหรือพาสทิฟเป็นตัวรักษาระดับอุณหภูมิของฐานรองให้มีค่าประมาณ 925 °C

อย่างไรก็ตามกระบวนการส่งผ่านจะมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ในรีแอกเตอร์ทั้งสี่ชนิด รีแอกเตอร์ชนิด Hot-filament และ Microwave plasma มีการแพร่เป็นส่วนสำคัญเหมือนกับว่าตรงนั้นไม่มีความร้อน, ความเร็วหรือความหนาแน่นของ "Boundary layer" ดังนั้นจึงมักจะพบการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในอุณหภูมิ, ความเร็วหรือความหนาแน่นของอนุภาคระหว่างบริเวณกระตุ้น (Hot-filament หรือ Plasma ball) และพื้นผิวการเกิดในแต่ละรีแอกเตอร์ ส่วนรีแอกเตอร์ชนิด Arc jet และ Combustion CVD เป็นชนิดที่มีความเร็วสูง (ตัวอย่างเช่น อาจสูงเกินกว่า 10<sup>5</sup>

cm/s) ดังนั้นจึงมีการพาเป็นส่วนสำคัญ ชั้นบางๆของ Boundary layer ในอุณหภูมิ, ความเร็วและความหนาแน่นจะเกิดขึ้นใกล้ ๆ กับพื้นผิวที่เกิด

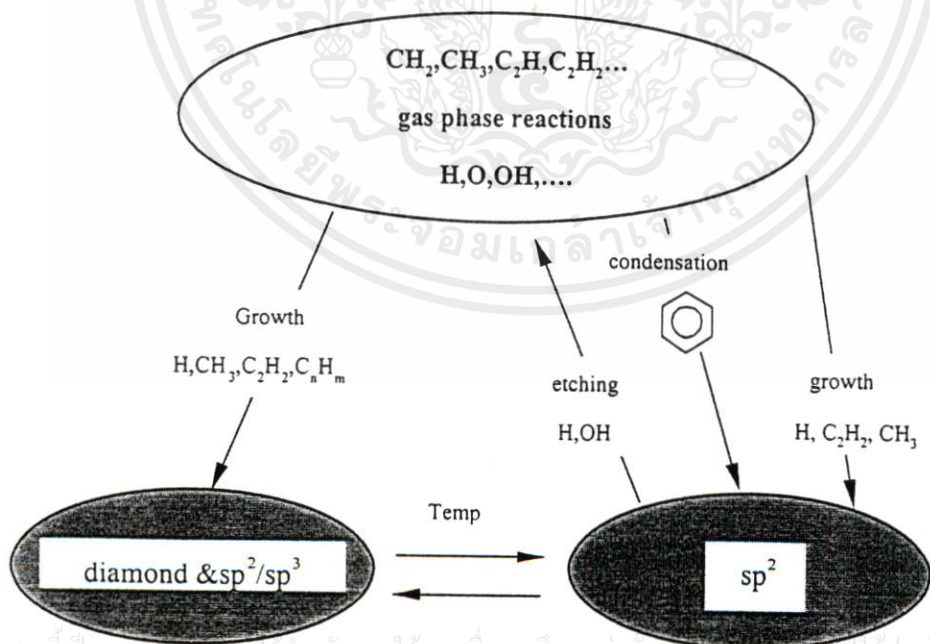
รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของเพชร [4]



จากแผนภาพในรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD รีแอกเตนต์หรือก๊าซที่ใส่เข้าไปคือก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้สำหรับรีแอกเตอร์แบบ Hot-filament และ Plasma รีแอกเตนต์ที่เข้าไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง หรือพลังงานสูงจะถูกกระตุ้นภายในบริเวณนั้น ปฏิกิริยาเคมีเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ  $10^{-9}$  s และเกิดการชนกันของก๊าซในรีแอกเตอร์โดยใช้เวลาดั้งแต่  $10^{-4}$  s ถึง 10 s จากนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่างๆจะถูกส่งผ่านโดยการ

ไหล, การแพร่และการพาจากรีแอกเตอร์ไปยังฐานรองที่บริเวณใกล้ฐานรอง การแพร่จะเข้าสู่บริเวณที่การไหลหยุดนิ่งซึ่งถูกเรียกว่า “Boundary layer” พื้นผิวบนฐานรองจะเกิดการดูดกลืน, การคาย, การแพร่ที่พื้นผิวหรือเข้าไปในเนื้อสารและเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นประโยชน์ต่อการเกิดเพชรและมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ เป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนของอุณหภูมิ, โครงสร้างและองค์ประกอบของพื้นผิว นอกจากนี้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD คาร์บอนที่เกิดขึ้นสามารถจับตัวเป็นพันธะเคมีได้หลายรูปแบบแต่ Hybridization ว่าเป็นแบบ  $sp^1$ ,  $sp^2$  หรือ  $sp^3$  รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะสร้างเพชรว่าคาร์บอน สามารถเป็นได้ทั้งเพชร ( $sp^3$ ) หรือ กราไฟต์ ( $sp^2$ ), การเปลี่ยนไปมาระหว่างพันธะแบบ  $sp^2$  ไปสู่  $sp^3$  หรือ  $sp^3$  กลับไป  $sp^2$ , การกำจัดรูปอื่นๆของคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชร และกระบวนการอื่นๆที่เป็นการกำหนดอัตราการก่อตัวและคุณภาพในการเกิด ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง เช่น อุณหภูมิ, ความดัน, โหมคการกระตุ้น, ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้หรือแม้แต่รูปทรงของรีแอกเตอร์

รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการเกิดกราไฟต์และเพชรขณะสังเคราะห์เพชรและการเปลี่ยนกลับไปมาของพันธะแบบ  $sp^2$  ไปสู่  $sp^3$  [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น และอนุญาตให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### -ปฏิกิริยาที่ไร้ผล

Langmuir [4] เป็นคนแรกที่ค้นพบการแตกตัวของไฮโดรเจนบนไร้ผลอดทั้งสเดนที่มีอุณหภูมิสูงเมื่อปี ค.ศ.1912 และวิธี Hot-filament ได้แสดงให้เห็นว่าเป็นวิธีที่มีโครงสร้างง่ายๆ อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดอะตอมไฮโดรเจน ต่อมาได้มีการนำมาใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร โดยทำเป็นรีเอคเตอร์ ชนิด Hot-filament Jansen et al. ได้ศึกษาถึงการแตกตัวของก๊าซไฮโดรเจนที่บริเวณไร้ผลอด โดยอาศัยการแตกต่างกันในกำลังที่ใช้ไปโดยไร้ผลอดในสภาวะสุญญากาศ และในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนวัดค่าของอัตราการแตกตัวของก๊าซไฮโดรเจน พบว่าอัตราการแตกตัวขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของไร้ผลอดและจากการวิเคราะห์อัตราของอะตอมไฮโดรเจนที่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นๆอีกตัวอย่างเช่น สัมประสิทธิ์การแพร่, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดและกำลังที่อัตราการแตกตัว

### -ผลของอุณหภูมิฐานรอง

ในกระบวนการสร้างเพชรด้วยวิธี CVD อุณหภูมิของฐานรองจะส่งผลต่อการเกิดเพชรหลายอย่าง Spitsyn et al. [4] ได้เสนอผลจากการทดลองว่ามีเพชรเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของฐานรองมีค่าตั้งแต่  $500^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1,200^{\circ}\text{C}$  แล้วแต่วิธีการที่ใช้ โดยหากอุณหภูมิฐานรองมีค่าเกินกว่า  $1,200^{\circ}\text{C}$  ผลที่ได้จะเป็นกราไฟต์ และหากอุณหภูมิฐานรองต่ำกว่า  $500^{\circ}\text{C}$  ในก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจน ผลที่ได้จะเป็น DLC (Diamond-like carbon) เกิดขึ้นแทน เมื่อไม่กี่ปีมานี้ Inspektor et al.[4] รายงานถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่สร้างเพชรขึ้นได้ประมาณ  $300^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ก๊าซที่มีส่วนผสมของ C-H-O นอกจากนี้อุณหภูมิฐานรองยังมีผลต่ออัตราการเกิดเพชรอีกด้วย โดยอัตราการเกิดเพชรจะมีค่าลดลงเมื่อฐานรองมีอุณหภูมิสูงกว่า  $1,000^{\circ}\text{C}$

### -บทบาทของก๊าซไฮโดรเจน

นับตั้งแต่ Angus et al. เสนอว่าอะตอมไฮโดรเจนสามารถกำจัดกราไฟต์ออกจากเพชรได้เป็นอย่างดี อีกทั้งได้รับการนำเสนอทำนองเดียวกันจากกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียว่า สมดุลย์ความหนาแน่นสูงของอะตอมไฮโดรเจนที่พื้นผิวการเกิด มีคุณสมบัติในการกำจัดกราไฟต์ Setaka et al. ได้แสดงให้เห็นถึงการกำจัดกราไฟต์ออกโดยอะตอมไฮโดรเจนที่ถูกกระตุ้นด้วยขนาดที่เร็วกว่าเพชรมาก อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิการสร้างเพชรต่ำๆ แบบจำลองของ Frenklach et al. ทำนายว่าอัตราการกำจัดพันธะ  $sp^2$  ของอะตอมไฮโดรเจนจะลดลงเมื่อเทียบกับอัตราที่เกิดขึ้นของกระบวนการอื่นๆ เช่น Hydrogenation ของพันธะ  $sp^2$  ไปสู่  $sp^3$  โดยอะตอมไฮโดรเจน

หน้าที่หลักอีกอย่างหนึ่งของไฮโดรเจนคือ ช่วยทำให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้น [4] เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเพชรอะตอมคาร์บอนจะมีพันธะแขวนขาด (Dangling bond) อะตอมไฮโดรเจนจะเข้าไปจับตัวกับแขนที่ขาดของอะตอมคาร์บอนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะของ  $sp^3$  ไปเป็น  $sp^2$  หรือ  $sp^1$  และอะตอมไฮโดรเจนยังมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดเพชร โดยจะเป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนที่จับตัวเป็นพันธะ Cd-H กับอะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร อะตอมคาร์บอนในพันธะระหว่าง Cd-H เมื่อสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนออกไปจะเป็น  $Cd^{\cdot}$  ดังสมการ



เมื่อ  $Cd^{\cdot}$  คืออะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร และ  $Cd^{\cdot}$  คืออะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ให้ความเห็นเกี่ยวกับหน้าที่อื่นๆ ของไฮโดรเจนอีก เช่น Frenklach et al. เสนอว่าอะตอมไฮโดรเจนยังช่วยในการเกิดก๊าซเฟส หรือ Machlin et al. กล่าวว่าอะตอมไฮโดรเจนช่วยในการกำจัดออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง

#### -บทบาทของก๊าซออกซิเจน

การเติมออกซิเจนเข้าไปในก๊าซผสมระหว่างไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน ได้รับการรับรองจากผู้ศึกษาการสังเคราะห์เพชรหลายกลุ่ม (Kawato et al.) ว่าทำให้เพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดี ที่อุณหภูมิฐานรองต่ำ และยังช่วยให้อัตราการเกิดดีขึ้น [4]

บทบาทหลักๆ ของออกซิเจนคือช่วยทำให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมามีคุณภาพดี เป็นที่เชื่อกันว่าหากเราผ่านอนุมูลของก๊าซออกซิเจน เช่น  $O$ ,  $O_2$  หรือ  $OH$  เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชร และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น อนุมูล  $OH$  สามารถกระตุ้นอะตอมบริเวณผิวดังสมการ



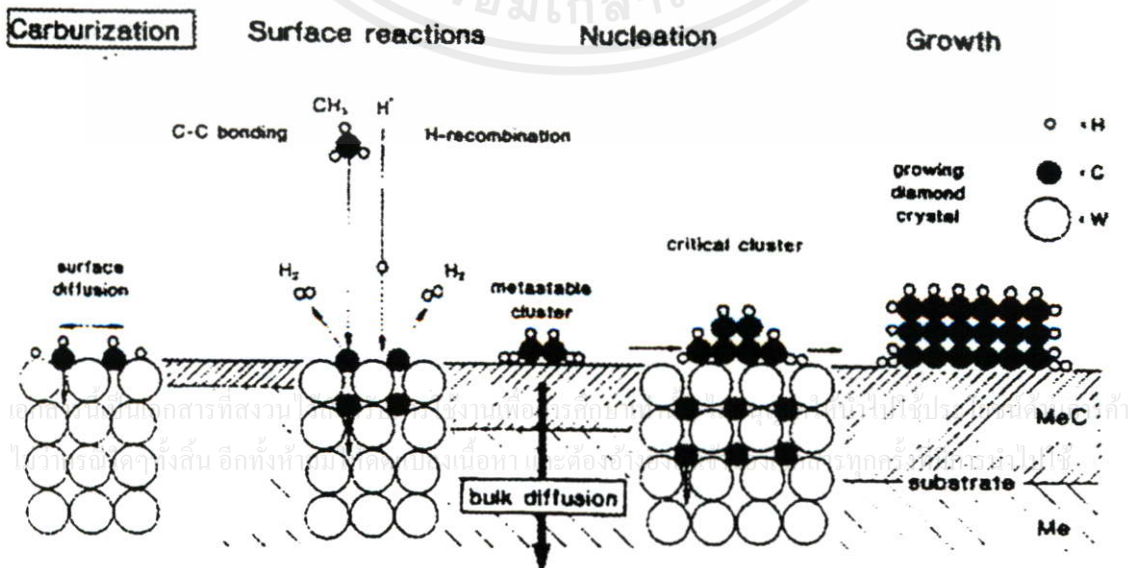
อย่างไรก็ตาม ปฏิริยาจากสมการ (2.2) ยังไม่มีความสำคัญเท่ากับสมการ (2.1) ส่วนหน้าที่อื่นๆ ของออกซิเจนที่มีผู้ศึกษาไว้ได้แก่ Kawato et al. เสนอว่าออกซิเจนมีคุณสมบัติที่จะลดความหนาแน่นของอะเซติลีน ซึ่งถูกสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดกราฟไฟต์และอมอร์ฟัสคาร์บอน Mucha et al. รายงานว่า ออกซิเจนยังเป็นตัวช่วยเพิ่มความเข้มข้นของอะตอมไฮโดรเจน

## 2.4.2 ปฏิกิริยาการเกิดนิเวศของคาร์บอน

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4.1 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นของก๊าซเฟส สำหรับ ปฏิกิริยาการเกิดนิเวศของคาร์บอนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อจากกระบวนการของก๊าซเฟส การนิเวศของคาร์บอนของเพชรสามารถเกิดได้ทั้งแบบ Homogeneous หรือ Heterogeneous ขึ้นอยู่กับชนิดของ ฐานรองที่เลือกใช้ แต่ส่วนมากแล้วการสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรเป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง [10]

การนิเวศของคาร์บอนของเพชรเริ่มต้นตรงที่มีการแพร่เข้าไปบนพื้นผิวฐานรองด้วยอนุภาคของ ก๊าซที่มีพันธะ  $sp^2$  ดังเช่น Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าไปสู่ฐานรองจนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบางๆ ที่เรียกว่า "Intermediate layer" ขึ้น ชั้น Intermediate layer นี้เมื่อมีความเข้มข้นของอะตอมคาร์บอนมากพอจะทำให้เกิดชั้นตอนสำคัญของการเกิดเพชรคือเกิดการกำจัดอนุภาคที่มีพันธะ  $sp^2$  ออกไปบนพื้นผิวของฐานรอง โดยอะตอมไฮโดรเจนหรือจากนิเวศที่เสถียรทำให้มีการเปลี่ยนพันธะจาก  $sp^2$  ไปสู่  $sp^3$  เกิดเป็น เพชรขึ้นบนฐานรอง แผนภาพแสดงกลไกของการนิเวศและการเกิดชั้น Intermediate layer แสดงได้ในรูปที่ 2.6

รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการนิเวศและการเกิดชั้น intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง [10]



#### 2.4.2.1 การนิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารเดียวกัน (Homogeneous nucleation)

ส่วนมากแล้วผู้ที่สนใจเกี่ยวกับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จะให้ความสำคัญกับการศึกษานิวคลีเอชันและการเกิดเพชรแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิด (Heterogeneous nucleation) มากกว่า [10] มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่พิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะสร้างฟิล์มเพชรที่มีรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันในก๊าซเฟสที่แรงดันบรรยากาศ แม้กระนั้นก็ตามได้มีรายงานถึงการนิวคลีเอชันชนิด Homogeneous ในก๊าซเฟสโดย Frenklach et al. สาเหตุหลักที่การนิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารเดียวกันของเพชรไม่ได้รับการสนใจในกระบวนการสร้างเพชรแบบ CVD เนื่องมาจากอัตราการนิวคลีเอชันที่ต่ำและเพชรที่สร้างได้มักจะไม่เกาะตัวเป็นฟิล์ม

#### 2.4.2.2 การนิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterogeneous nucleation)

การเกิดฟิล์มเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร สถานะเริ่มต้นของการเกิดนิวคลีเอชันจะช้ามากอีกทั้งค่าความหนาแน่นในการนิวคลีเอชันยังต่ำแต่ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการเตรียมพื้นผิวฐานรองให้มีความเหมาะสม เพื่อเร่งอัตราการนิวคลีเอชันและความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วการเกิดฟิล์มเพชรชนิดผลึกกระจุกนาบรวม (Polycrystalline diamond) จะแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนย่อยๆ ดังนี้คือ [11]

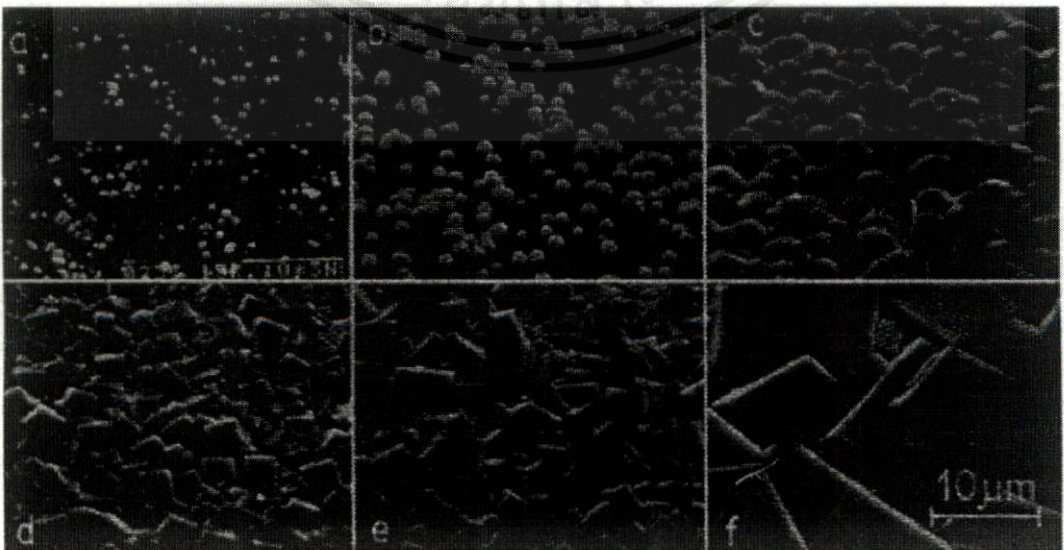
1. มีช่วงเวลาที่ใช้ในการก่อตัวระยะหนึ่งซึ่งช่วงเวลานี้จะเกิดการแพร่ของอะตอมคาร์บอนเข้าไปในฐานรอง ทำให้เกิดชั้น Intermediate layer ขึ้น
2. เกิดการนิวคลีเอชันของผลึกเดี่ยวๆ บนพื้นผิวฐานรอง
3. เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและผลึกเดี่ยวๆ มีความหนาแน่นมากขึ้น การนิวคลีเอชันของฐานรองจะสิ้นสุดลงและเริ่มเกิดผลึกเพชร
4. มีการเชื่อมต่อกันระหว่างผลึกเพชรเดี่ยวๆ กับผลึกเพชรข้างเคียง
5. เกิดการจับตัวเป็นฟิล์มเพชรอย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแสดงในรูปที่ 2.7 ก่อนที่จะเริ่มต้นการนิวคลีเอชัน ระบบจะต้องใช้เวลาในการก่อตัวค่าหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาที่ใช้นี้อาจมีค่าตั้งแต่ไม่กี่นาทีจนถึงชั่วโมง ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง, การเตรียมพื้นผิวฐานรองและเงื่อนไขในการสร้างผลึกเดี่ยวๆ ขนาดเล็กที่ เกิดขณะที่มีการนิวคลีเอชันแสดงได้ในรูป 2.7a เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการนิวคลีเอชันจะเพิ่มขึ้น (รูป 2.7b, 2.7c) หลังจากการนิวคลีเอชันที่บริเวณพื้นผิวเสร็จสิ้นลง ผลึกเดี่ยวแต่ละอันจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและผิวหน้าของผลึกเริ่มเปลี่ยนไป โดยจะเกี่ยวข้องกับอัตราการแพร่ของคาร์บอนจากพื้นผิวของฐานรองบริเวณรอบ ๆ จนกระทั่งผลึกมีขนาดใหญ่พอและชิดติดกับผลึกข้าง ๆ (รูป 2.7d) จากนั้น

เพชรที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นฟิล์มและแสดงระนาบที่ได้อย่างเด่นชัด (รูป 2.7e,2.7f) หลังจากเพชรเกาะตัวเป็นฟิล์มเพชรแล้ว เพชรที่เกิดขึ้นภายหลังจะมีทิศทางการเกิดตามแนวตั้งฉากกับฐานรองเร็วกว่าการเกิดในทิศทางด้านข้าง และซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ตามแนวตั้ง

นอกจากนี้การนิเวศลิเอชันของเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรจะทำให้เกิดขึ้น Intermediate layer ขึ้นมา ดังที่กล่าวมาข้างแล้วในตอนต้นของหัวข้อ 2.4.2 จากการศึกษาพบว่าชั้น Intermediate layer นี้จะเป็น Diamond-like amorphous carbon, Metal carbide หรือ กราไฟต์ โดยจะเกิดที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างอนุมูลของก๊าซที่ถูกกระตุ้นและพื้นผิวขณะเกิดช่วงเวลาก่อตัว ชั้น Intermediate layer นี้จะนำไปสู่การนิเวศลิเอชันของผลึกเพชรและยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นในการนิเวศลิเอชันบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร อีกทั้งยังเหมาะสำหรับควบคุมลักษณะรูปร่างและความละเอียดของผลึกเพชร ความหนาของชั้น Intermediate layer นี้มีค่าตั้งแต่อังสตรอม ( $6 \text{ \AA}$  สำหรับกราไฟต์บน Pt), นาโนเมตร (8 nm สำหรับกราไฟต์บน Ni, 20 nm, a-C บน Si, 1-10 nm SiC บน Si, 8-14 nm diamond-like carbon บน Cu) จนถึงไมโครเมตร (1.5-3  $\mu\text{m}$  Mo<sub>2</sub>C บน Mo) ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของการนิเวศลิเอชันบนชั้น Intermediate layer สามารถอธิบายได้ดังนี้

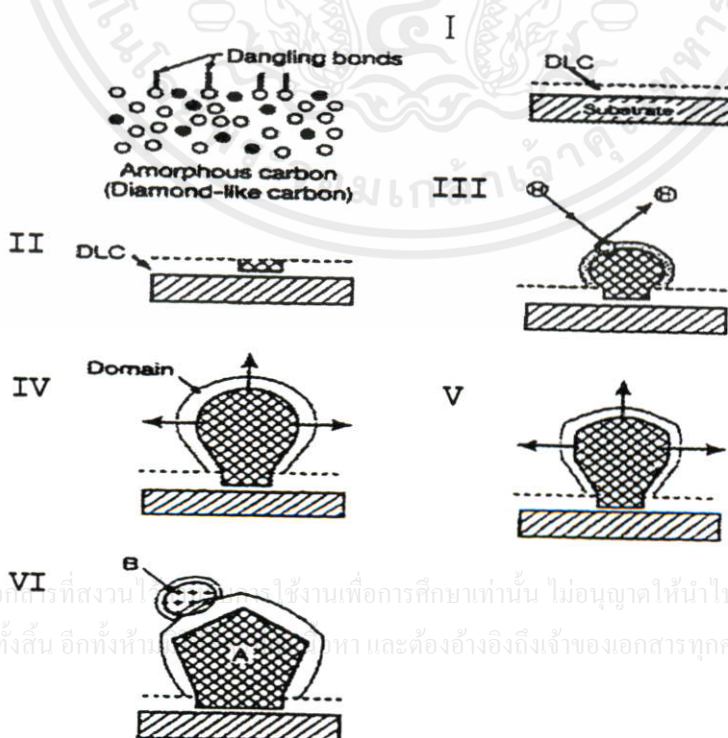
รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการเกิดเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร[11] (a) เริ่มเกิดผลึกเดี่ยวๆ ขนาดเล็กขึ้น (b,c) เมื่อเวลาผ่านไปความหนาแน่นของผลึกเดี่ยวๆ บนฐานรองจะเพิ่มขึ้น (d) เริ่มเกิดผลึกเพชรขึ้นและมีการเชื่อมต่อกับผลึกเพชรข้างๆ (e,f) เกิดฟิล์มเพชรอย่างต่อเนื่อง



- การวิเคราะห์ชั้นบน Intermediate layer ของ Diamond-like amorphous carbon

จากการใช้ HRTEM ศึกษาการวิเคราะห์ชั้นและการเกิดของเพชรบนทองแดง ด้วยวิธี Hot-filament Assisted CVD [10] พบว่ามีการเกิดขึ้นของ Diamond-like amorphous carbon หนา ประมาณ 8-14 nm อย่างชัดเจน ผลึกเพชรขนาดเล็กประมาณ 2-5 nm จะถูกฝังอยู่เป็นแนว และมี ผลึกขนาดใหญ่เกิดอยู่บนผลึกขนาดเล็ก นั่นคือ ผลึกเพชรขนาดเล็ก ๆ นั้นจะเกิดจากผลการเปลี่ยน รูปของ a-C ไปสู่เพชร รูปที่ 2.8 อธิบายถึงกลไกการวิเคราะห์ชั้นจากการทดลองดังกล่าว ในขั้นตอนที่ 1 กลุ่มของคาร์บอนจะเกิดการก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองและเปลี่ยนโครงสร้างพันธะภายในจาก  $sp^1$  เป็น  $sp^2$  ต่อมาขั้นตอนที่ 2 พันธะ  $sp^2$  จะเปลี่ยนไปเป็นพันธะแบบ  $sp^3$  โดยการแตกตัวอย่างต่อเนื่องของไฮโดรคาร์บอนและอะตอมไฮโดรเจนบนพื้นผิวฐานรองจะช่วยให้การเปลี่ยนจาก  $sp^1 \rightarrow sp^2 \rightarrow sp^3$  ในขณะเดียวกัน การกำจัดเฟสที่ไม่เสถียร ( $sp^1$  และ  $sp^2$ ) จะมีค่าเร็วกว่าการกำจัดเฟสที่เสถียร ( $sp^3$ ) ถึง 10 เท่า นั่นคือช่วยในการทำให้เฟส  $sp^3$  มีความเสถียร ในขั้นตอนที่ 3 เป็นการเปลี่ยนของอะตอมคาร์บอนพันธะแบบ  $sp^3$  ที่ไม่เป็นระเบียบ เป็นพันธะแบบ  $sp^3$  ที่มีโครงสร้างแบบเพชร ขั้นตอนที่ 4-5 เป็นการเปลี่ยนรูปทรงให้เป็นเพชร และในขั้นตอนที่ 6 แสดงการเกิดการวิเคราะห์ชั้นลำดับที่ 2 บนผลึกเพชรที่ได้

รูปที่ 2.8 แสดงกลไกการวิเคราะห์ชั้นของเพชรบน Intermediate layer ของ Diamond-like amorphous carbon [10]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดขึ้นของ DLC (Diamond-like amorphous carbon) สามารถพบได้จากการนิวคลิเอชันบนฐานรอง Mo และ Si และยังพบอีกว่าผลึกเพชรจะไม่เกิดบนฐานรองโดยตรงแต่จะเกิดขึ้นบนชั้นของอมอร์ฟัส การนิวคลิเอชันของเพชรจะปรากฏบนพื้นผิวของคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบและการก่อตัวของชั้น Intermediate layer นี้ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนแรกในกลไกการนิวคลิเอชันของเพชร

#### - การนิวคลิเอชันบน Intermediate layer ของ Metal carbide

Badzian et al. รายงานถึงการนิวคลิเอชันเพชรบน Si ว่าพบชั้นของ  $\beta$ -SiC เกิดขึ้นมา ก่อน จากนั้นจึงเกิดการนิวคลิเอชันบนพื้นผิวของคาร์ไบด์ [10] รายงานดังกล่าวได้จากการสังเกต การทดลองสร้างเพชรบนฐานรอง Si ด้วยวิธี HFCVD และ MWPACVD ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของ Si จะเปลี่ยนรูปเป็น SiC ก่อนที่จะเกิดเพชร นอกจากนี้การก่อตัวของชั้น  $Mo_2C$  ในสถานะเริ่มต้นของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี DC arc discharge CVD และ MW PACVD ในการทดลองสร้างเพชรบน Mo และ Si โดยใช้ MWPACVD โดย Meilunas et al. พบว่าเกิดขึ้นของ  $Mo_2C$  และ SiC หนาประมาณ 1.5  $\mu m$  และ 10 nm ตามลำดับ ความหนาวัดจาก SEM เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที และ 5 นาที ตามลำดับ อัตราการเกิดของ SiC จะมีค่าน้อยกว่า  $Mo_2C$  ผลึกเพชรขนาดเล็กมากถูกพบหลังจากเวลาผ่านไปเพียง 1 นาที และไม่พบชั้นของคาร์ไบด์เกิดขึ้นอีกหลังจากพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยเพชร

นอกจากนี้ Lux et al. ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของความหนาแน่นการนิวคลิเอชันบนฐานรองชนิดต่าง ๆ กัน เช่น Ti, Hf, Nb, Ta, Mo และ W พบว่าการแตกต่างกันในความหนาแน่นของการนิวคลิเอชันจะสัมพันธ์กับการละลายหรือการแพร่ของคาร์บอนในฐานรองแต่ละชนิด ค่าเวลาที่ใช้ก่อตัวสำหรับการนิวคลิเอชันบนโลหะจะมีค่าน้อยและพื้นผิวฐานรองจะมีการอิมมัวอย่างยิ่งของอะตอมคาร์บอนอย่างรวดเร็ว

#### - การนิวคลิเอชันบน Intermediate layer ของกราฟิต์

Angus et al. ได้ศึกษาการนิวคลิเอชันของเพชรบน Pt และพบว่าขณะอยู่ในช่วงเวลาการก่อตัวจะเกิดการฟอร์มตัวของกราฟิต์ขึ้น [10] ซึ่งในเวลาต่อมาหลังจากการสังเคราะห์เพชรเสร็จสิ้นลงจะเหลือเพียงเพชรเท่านั้น การทดลองอย่างเดียวกันนี้ได้กระทำบน Ni ด้วยวิธี HFCVD และบน Si, Cu ด้วยวิธี MWPACVD ซึ่งได้ผลอย่างเดียวกันคือ เกิดการก่อตัวของชั้นกราฟิต์ขึ้นก่อนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง และเกิดเพชรขึ้นในภายหลัง โดยกราฟิต์จะถูกกำจัดออกในขณะที่เกิดการนิวคลิเอชันของเพชร

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าการเกิดขึ้น Intermediate layer เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเพชรตามมา จึงเกิดข้อสงสัยว่าการเกิดขึ้น Intermediate layer ต่าง ๆ กัน นอกจากขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาเป็นฐานรอง, วิธีเตรียมฐานรองและเงื่อนไขการสร้างแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องอีกหรือไม่ Belton et al. ได้ทดลองให้เห็นว่าเกิดขึ้นของกราฟิตบนฐานรอง Pt และ Ni ก่อนที่จะเกิดเพชร อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของก๊าซที่แตกต่างกันและความต่างกันของอุณหภูมิฐานรองจะทำให้เกิดชั้น Intermediate layer ที่ต่างกัน แม้ว่าฐานรองที่ใช้จะเป็นชนิดเดียวกันก็ตาม [10] ตัวอย่างเช่น ในการสร้างเพชรด้วยวิธี MWPACVD บนฐานรอง Si ที่มีคาร์บอนที่เตรียมพื้นผิวด้วยการขัดคริมเพชร Williams et al. พบว่ามีชั้นของ  $\beta$ -SiC เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ  $\text{CH}_4$  ต่อ  $\text{H}_2$  เปลี่ยนไปเป็น 2 % และหรืออุณหภูมิฐานรองมีค่าต่ำกว่าที่เงื่อนไขการสร้างแบบเดิมจะเกิดขึ้นของ a-C หรือ DLC ขึ้นมาแทน SiC นั่นคือการเกิดขึ้น Intermediate layer จะเป็นไปโดยธรรมชาติขึ้นอยู่กับกระบวนการนิวเคลียสของเพชร

กระบวนการนิวเคลียส สามารถอธิบายได้จากปริมาณสองค่า คือ

1. ค่าความหนาแน่นของการนิวเคลียสที่บริเวณพื้นผิว,  $N_d$  ( $\text{cm}^{-2}$ )
2. อัตราการนิวเคลียสที่บริเวณพื้นผิว,  $N_r$  ( $\text{cm}^{-2} \text{hr}^{-1}$ )

ความหนาแน่นของการนิวเคลียสคือจำนวนของการเกิดนิวเคลียสต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และอัตราการนิวเคลียสคือจำนวนของนิวเคลียสที่เกิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลานั่นเอง โดยค่าความหนาแน่นขึ้นอยู่กับจำนวนของตำแหน่งที่เหมาะสมกับการกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียส ดังนั้นการนิวเคลียสบนฐานรองจะสิ้นสุดลง เมื่อตำแหน่งที่เหมาะสมถูกยึดครอง หรือผลึกที่เกิดขึ้นคลุมบริเวณผิวเหนือฐานรองโดยสมบูรณ์ ความหนาแน่นการนิวเคลียสยังเป็นตัวกำหนดความหนา, ขนาดของผลึก, การเชื่อมต่อระหว่างผลึกเพชร, การยึดเกาะกับฐานรอง, ผิวหน้า และ ความสม่ำเสมอของฟิล์มที่ได้ โดยทั่วไปแล้วถ้าความหนาแน่นของการนิวเคลียสมีค่าสูงทำให้ผิวหน้าของฟิล์มที่ได้มีความเรียบ

จากการศึกษาเกี่ยวกับการนิวเคลียสของเพชร เป็นที่ยอมรับว่ากระบวนการนิวเคลียสของเพชรที่บริเวณพื้นผิวเป็นแฟกเตอร์ที่ควบคุมการเกิดและก่อตัวอย่างต่อเนื่องของฟิล์มเพชร การทดลองที่ผ่านมาของการนิวเคลียสของเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรทั้งชนิดผลึก เช่น Au, Cu, Si, Mo, W, Pt, Ni เป็นต้น สามารถสรุปผลที่ได้ดังนี้คือ [11]

1. อัตราการนิวเคลียสของเพชรบนฐานรอง ที่ไม่ใช่เพชรมีค่าตั้งแต่  $10^3$  ถึง  $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{hr}^{-1}$  โดยค่าดังกล่าวจะขึ้นกับวิธีการเตรียมพื้นผิวฐานรองและเงื่อนไขการสร้าง
2. การนิวเคลียสของผลึกเพชรจะเกิดบนฐานรองที่มีจุดบกพร่อง (เช่นรอยขีด) แสดงว่าการนิวเคลียสของเพชรเกิดขึ้น โดยมีกลไกแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน

3. อัตราการนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองชนิดผลึกเดี่ยวมีค่าน้อยกว่าอัตราการนิวคลีเอชันบนฐานรองชนิดผลึกรวมภายใต้เงื่อนไขการเตรียมฐานรองและเนื้อสารของฐานรองเหมือนกัน

4. อัตราการนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองที่เกิดคาร์ไบด์ (Si, Mo, W) จะมีกำลังมากกว่า 1 หรือ 2 ค่าของอัตราการเกิดบนฐานรองที่ไม่เกิดคาร์ไบด์ (Cu, Au)

5. อัตราการนิวคลีเอชันบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรมีค่าลดลงเมื่อฐานรองถูกปกคลุมและขนาดของผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น

#### 2.4.3 ผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองและกลไกสนับสนุนการนิวคลีเอชัน

การเตรียมพื้นผิวของฐานรองมีส่วนสนับสนุนอย่างมากในการเพิ่มค่าความหนาแน่นและอัตราการนิวคลีเอชันให้สูงขึ้น ซึ่งสามารถใช้คุณสมบัติของการเตรียมพื้นผิวฐานรองและการนิวคลีเอชันของเพชรนี้มาประยุกต์ในการควบคุมการเกิดฟิล์มเพชรเฉพาะบริเวณที่กำหนดได้นับเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบลายวงจรเพื่อนำมาใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ ก่อนอื่นเราจะกล่าวถึงผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองที่มีต่อการนิวคลีเอชันของเพชร จากนั้นจะเป็นผลของการนิวคลีเอชันของเพชรที่เกิดบนพื้นผิวต่าง ๆ กัน เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวทางการประยุกต์ใช้งานในการเลือกสร้างฟิล์มเพชรให้เกิดเฉพาะพื้นที่ที่ต้องการ

จากการทดลองศึกษาถึงผลจากการนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรด้วยวิธีการเตรียมพื้นผิวฐานรองต่าง ๆ กัน [10] พบว่าความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันมีค่าตั้งแต่  $10^7$   $\text{cm}^{-2}$  (บนฐานรองที่ไม่มีการเตรียมพื้นผิว) จนถึง  $10^{11}$   $\text{cm}^{-2}$  (บนฐานรองที่เตรียมพื้นผิวด้วยการขัดหรือไบอัสฐานรอง) ซึ่งผลของการนิวคลีเอชันบนพื้นผิวดังกล่าวน่าสนใจเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ ในการเตรียมพื้นผิว

สำหรับวิธีการเตรียมพื้นผิวฐานรองมีด้วยกันหลายวิธีแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น

1. การสร้างรอยขีดบริเวณพื้นผิว ด้วยการขัดหรืออูลตราโซนิก
2. การชุบด้วยผงเพชร หรือผงเซรามิกชนิดต่าง ๆ
3. การไบอัสด้วยไฟฟ้า
4. การเคลือบฐานรองด้วยฟิล์มหรือไฟเบอร์ของกราไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การเคลือบฐานรองด้วยฟิล์มบางโลหะ, a-C,  $\text{C}_{70}$ , cBN, SiC, WC
6. การใช้ Ion implantation
7. การใช้เลเซอร์

8. การใช้ Carburization

9. การกัดด้วยสารเคมี

ซึ่งแต่ละวิธีมีความแตกต่างในแง่ของความหนาแน่นของการนิวเคลียสและความยากง่ายในการเตรียม สำหรับข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรจากการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยวิธีต่าง ๆ [10]

Pretreatment method	Nucleation density, Nd (cm <sup>-2</sup> )
No pretreatment	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>
Scratching	10 <sup>6</sup> -10 <sup>10</sup>
Ultrasonic scratching	10 <sup>7</sup> -10 <sup>11</sup>
Seeding	10 <sup>6</sup> -10 <sup>10</sup>
Biasing	10 <sup>8</sup> -10 <sup>11</sup>
Covering / Coating with	
Fe film	4.84×10 <sup>5</sup>
Graphite film	10 <sup>6</sup>
Graphite fiber	10 <sup>6</sup>
a-C film	>10 <sup>9</sup>
C <sub>70</sub> cluster biasing	3×10 <sup>10</sup>
Y-ZrO <sub>2</sub> , a-BN, SiC layer	=seeding effect enhancement
C <sup>+</sup> ion implantation on Cu	enhancement
As <sup>+</sup> ion implantation on Si	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
Pulsed laser irradiation + Coating a-C, WC.cBN layer	enhancement
Carburization	enhancement

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการเตรียมพื้นผิวฐานรองชนิดกอนด้วยวิธีต่างๆ[9]

Pretreatment method	Advantages	Disadvantages
No pretreatment or mirror-polished Si	-large, separate grain -no damage/impurities	-continuous film not practical
Scratching	-proven technology	-dirty, damage surface -difficult to control
Ultrasonic scratching	-uniform, reproducible	-dirty, damage surface
Graphite film Graphite fiber a-C film	-in situ process	-sp <sup>2</sup> and defective bonding at interface
Biasing	-in situ process -high Nd possible	-diamond nuclei are defective
ion implantation	-in situ process	-low Nd

จากข้อมูลในตาราง 2.1 และ 2.2 ถ้าหากบังคับให้เพชรเกิดบนพื้นที่ที่ต้องการและในทางกลับกันสามารถป้องกันการเกิดเพชรในบริเวณที่ไม่ต้องการได้ นั่นคือหัวใจสำคัญของการกำหนดหรือเลือกสร้างลวดลายจากฟิล์มเพชรมีการนำเสนอวิธีเตรียมพื้นผิวฐานรองบางวิธี เพื่อป้องกันการนิวเคลียสของเพชรบนพื้นผิวที่ไม่ต้องการให้เกิด เช่น การสร้างชั้นออกไซด์, Sputtering, Reactive ion etching และ Ma et al. รายงานว่า SiO<sub>2</sub> สามารถป้องกันการนิวเคลียสของเพชรได้เป็นอย่างดี ซึ่งต่อมาข้อเสนอนี้ได้รับการยอมรับโดยทั่วไป ส่วนการกัดด้วยสารเคมีใน HNO<sub>3</sub>, HF, HCl, การ Plasma etching ใน NF<sub>3</sub> และ Cl<sub>2</sub>, การ Sputtering ใน N<sub>2</sub> มีผลทำให้เกิดรอยขรุขระบนพื้นผิวที่ต้องการแต่จะไม่มีผลกับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของการนิวเคลียส ซึ่งในความเป็นจริงผลที่ได้กลับลดความหนาแน่นของการนิวเคลียสให้น้อยลง[10]

วิธีขัดให้เกิดรอยบริเวณผิวหน้าของฐานรองเป็นเทคนิคในการเพิ่มความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรที่ได้รับความนิยมมาก แม้ว่าวิธีการดังกล่าวไม่สามารถนำไปใช้กับพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อน อีกทั้งผิวหน้าของฟิล์มเพชรที่ได้มักจะไม่เรียบสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการความเรียบสม่ำเสมอของฟิล์มเพชรสูง ตัวอย่างเช่น งานด้าน Optical window

วัสดุที่ใช้ขัดผิวหน้าของฐานรองอาจเป็นครีมเพชรหรือผงเพชร, โบโรไนด์, คาร์ไบด์, ไนไตรด์, ซิลิโคไซด์, ออกไซด์ และกราไฟต์ ซึ่งวิธีการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดนี้ยังรวมไปถึงการอุลตราโซนิคฐานรอง ในสารผสมระหว่างผงเพชรกับเมทานอลหรืออะซีโตน ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชร หลังจากผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดมีค่าตั้งแต่  $10^6$ - $10^{10}$   $\text{cm}^{-2}$  และหากเป็นการเตรียมโดยใช้ อุลตราโซนิค ค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันสูงถึง  $10^7$ - $10^{11}$   $\text{cm}^{-2}$  นอกจากนี้ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันจะขึ้นอยู่กับขนาดของครีมหรือผงเพชรที่ใช้ Ascarelli et al.[10] พบว่าในการเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร ความหนาแน่นในการนิวคลีเอชันจะลดลงเมื่อขนาดของครีมเพชรที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังกราฟรูปที่ 2.9a และหากใช้วิธีอุลตราโซนิคในผงเพชร ผลที่ได้จะกลับกัน คือความหนาแน่นการนิวคลีเอชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อผงเพชรที่ใช้มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังกราฟรูปที่ 2.9b

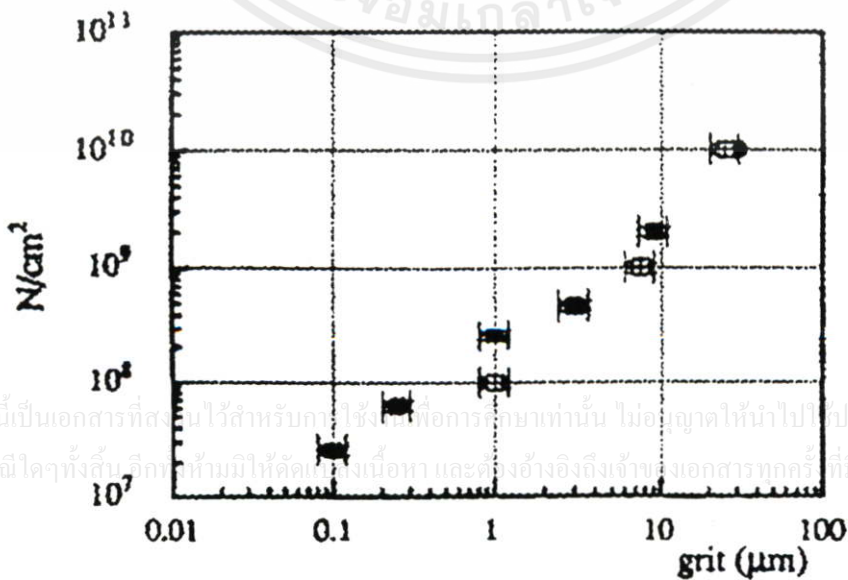
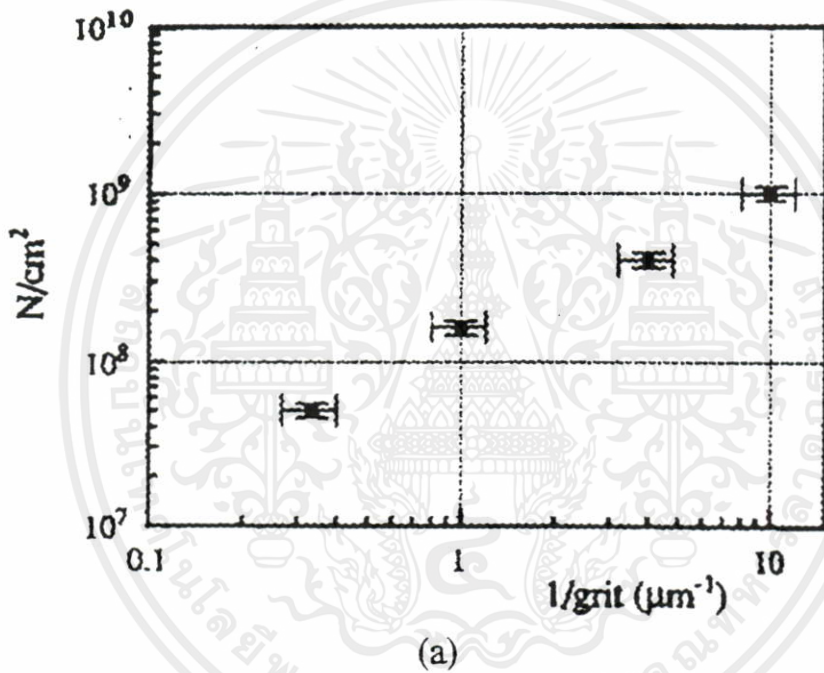
การชุบผิวหน้าของฐานรองด้วยผงเพชร, Si,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  หรือ SiC เป็นอีกวิธีหนึ่งที่เพิ่มความหนาแน่นในการนิวคลีเอชันได้ ผงเพชรที่อยู่บนผิวหน้าฐานรองจะช่วยเร่งให้เกิดเพชรขึ้นบนตัวมันเอง โดยความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของผงเพชรที่มีอยู่ วิธีเตรียมฐานรองด้วยการชุบนี้จะมีค่าความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันตั้งแต่  $10^6$ - $10^{10}$   $\text{cm}^{-2}$

วิธีการไบอัสฐานรองถูกสนใจที่จะนำมาใช้กับฐานรองซิลิกอนที่มีผิวเรียบ (Mirror polished Si) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวคลีเอชัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ทำลายพื้นผิวของฐานรองตลอดจนการไบอัสฐานรองยังช่วยลดและกำจัดการเกิดออกไซด์บนพื้นผิวฐานรอง ชนิดของการไบอัสขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์เพชร เช่นในวิธี DC PACVD และ HFCVD ฐานรองจะได้รับการไบอัสเป็นบวกเพื่อช่วยเพิ่มการนิวคลีเอชันของเพชร ในขณะที่วิธี MWPCVD ไม่ว่าฐานรองจะไบอัสเป็นบวกหรือลบ ก็สามารถเพิ่มการนิวคลีเอชันของเพชรได้ Katoh et al.[10] รายงานว่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันบนฐานรองที่ไบอัสไฟลบจะมีค่าถึงมากกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากการไบอัสฐานรองด้วยไฟบวกอยู่ 1-2 ค่า อย่างไรก็ตามผลจากการตั้งคูดัชนีในการไบอัสแบบลบทำให้เกิดรอยขรุขระบนผิวหน้าของซิลิกอนได้ ดังนั้นการไบอัสไฟบวกให้กับฐานรองซิลิกอนจึงเป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่า

นอกจากนี้ยังมีวิธีต่าง ๆ ในการสนับสนุนการนิวคลีเอชันอีก อาทิเช่น การเคลือบผิวหน้าของฐานรองด้วยฟิล์มหรือไฟเบอร์ของกราไฟต์, ฟิล์มโลหะ (Fe, Cu, Ti, Nb, Mo, Ni),  $\text{C}_{60}$ ,  $\text{C}_{70}$ , a-C, DLC, Y-ZrO<sub>2</sub>, a-BN และ SiC หรือ Hydrocarbon oil ความหนาของการเคลือบมีค่า 2-8 nm สำหรับฟิล์มโลหะ, 10-20 nm สำหรับ Hydrocarbon oil, 100 nm สำหรับ  $\text{C}_{70}$ , 150 nm สำหรับ Y-ZrO<sub>2</sub> ถึงประมาณ 1  $\mu\text{m}$  สำหรับฟิล์มคาร์บอน การเพิ่มขึ้นของกระบวนการนิวคลีเอชันเชื่อว่าเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ที่บริเวณพื้นผิว (สารที่เคลือบจะช่วยให้

เกิดการอึดตัวของคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรองและยังช่วยให้เกิดตำแหน่งที่มีพลังงานสูงหรือศูนย์กลางของการนิวเคลียส)

รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการนิวเคลียสกับขนาดของอนุภาค ที่ใช้  
 (a) เตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร (b) เตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการ  
 อุลตราโซนิกในผงเพชร [10]



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกทั้งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวิธี Ion implantation ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานพื้นผิวและโครงสร้างพื้นผิวของฐานรองเพื่อช่วยสนับสนุนให้เกิดการนิวเคลิเอชันของเพชร Implantation ของ  $C^+$  ( $10^{18}$  ion/cm<sup>2</sup>, 65-120 keV) บน Cu และ  $As^+$  ( $10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup>, 100 keV) บน Si ทำให้ค่านิวเคลิเอชันของเพชรเพิ่มขึ้น ในขณะที่ Implantation ของ  $Ar^+$  ( $3 \times 10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup>, 100 keV) จะทำให้การนิวเคลิเอชันของเพชรลดลงแลตทิซที่เสียหาย (เกิดการเคลื่อนที่, เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และซ้อนทับกัน) จากผลของ Ion implantation เชื่อว่าเป็นเหตุผลหลักสำหรับการนิวเคลิเอชันที่เพิ่มขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของแลตทิซน่าจะเป็นเหตุผลหลักสำหรับการเพิ่มขึ้นของการนิวเคลิเอชันของเพชร

การยิงเลเซอร์ไปยังชั้นบางๆ ของ a-C, WC หรือ cBN ที่สร้างอยู่บนฐานรอง (Cu, Si, Stainless steel) แสดงให้เห็นถึงการสนับสนุนการนิวเคลิเอชันและการยึดเกาะของฟิล์มบนฐานรองให้มีค่าเพิ่มขึ้น เลเซอร์ที่ยิงไปนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนองค์ประกอบของคาร์บอนบนฐานรองให้เป็นเพชรหรือผลจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช่วยให้การนิวเคลิเอชันของเพชรเกิดได้ง่ายขึ้น ส่วนการ Carburization ของฐานรองต่างชนิดกัน เช่น Mo, W, Si, Fe/Si จะชักนำให้เกิดการนิวเคลิเอชันเนื่องจากการเกิดของคาร์ไบด์ และการอ้อมตัวของคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง

#### 2.4.4 เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร

การสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่ต้องการสามารถทำได้หลายวิธีต่าง ๆ กัน แต่อย่างไรก็ตามทุกวิธีจะมีพื้นฐานเดียวกันคือ สร้างความแตกต่างกันระหว่างค่าความหนาแน่นการนิวเคลิเอชันของเพชรบนพื้นที่ที่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น และพื้นที่ที่ไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรให้มีค่ามากที่สุด ซึ่งค่าความหนาแน่นการนิวเคลิเอชันของเพชรจะมีผลต่อการเกิดฟิล์มเพชรคือฟิล์มเพชรจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วบนพื้นผิวที่มีค่าความหนาแน่นการนิวเคลิเอชันของเพชรสูงและจะเกิดช้าลงเมื่อพื้นผิวมีค่าความหนาแน่นการนิวเคลิเอชันของเพชรต่ำ[11] โดยค่าความหนาแน่นการนิวเคลิเอชันของเพชรจะขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียมพื้นผิวฐานรองดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4.3 ซึ่งในปัจจุบันได้มีผู้ทำการศึกษาถึงการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิคการเตรียมพื้นผิวฐานรองต่างกันแล้วแต่เทคนิคและวิธีการที่ใช้[13-24] อาทิเช่น S. Mirzakuchaki et al [13] หรือ R. Rameshame et al[21] ได้ทำการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายบนฐานรองที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวโดยการกัดด้วยสารเคมี M. Iida et al[14] สามารถกำหนดพื้นที่ของฟิล์มเพชรได้โดยใช้เทคนิคการชุบผิวหน้าของฐานรองด้วยผงเพชร ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายแต่ไม่ได้ผลดีนัก ในปี คศ. 1992 J. Narayan[15] สามารถสร้างลวดลายฟิล์มเพชรได้ โดยใช้เลเซอร์ช่วยในการเตรียมพื้นผิวฐานรอง ซึ่งผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจแต่กระบวนการเตรียมพื้นผิวจะมีความยุ่งยากเทคนิค Ion implantation เป็นวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชร[16, 18,

24] ซึ่งจากการทดลองพบว่าผลของการ Ion implantation ด้วย  $Ar^+$  ที่บริเวณผิวหน้าของฐานรองสามารถลดค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชร ณ ตำแหน่งนั้นได้ ดังนั้นบริเวณที่ต้องการให้เกิดลวดลายของฟิล์มเพชรจะผ่านการเตรียมพื้นผิวฐานรองให้มีค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรสูง ส่วนพื้นที่บริเวณที่ไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรจะถูกทำลายพื้นผิวด้วย Ion implantation ของ  $Ar^+$  โดยใช้น้ำยาไอแสงเป็นหน้ากากป้องกันพื้นผิวบริเวณที่ต้องการให้เกิดลวดลายฟิล์มเพชรเช่นเดียวกัน T. Inoue[17] ได้ใช้เทคนิค Reactive Ion Etching (RIE) ของก๊าซผสมระหว่าง  $CF_4/Ar/O_2 = 15/82/3$  ในการทำลายพื้นผิวฐานรองเพื่อลดค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรในบริเวณนั้น โดยมีน้ำยาไอแสงเป็นหน้ากากป้องกันบริเวณที่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น

เทคนิคการใช้หน้ากากป้องกันการเกิดฟิล์มเพชรเป็นเทคนิคหนึ่งที่มีผู้สนใจทำการศึกษาโดยหน้ากากที่ใช้อาจทำจากวัสดุต่าง ๆ กัน เช่น a-Si [17],  $Si_3N_4$  [19,22] หรือ แม้แต่ ซิลิกอนไดออกไซด์ [20, 22] ซึ่งผลที่ได้พบว่าสามารถป้องกันการเกิดฟิล์มเพชรได้ดี อีกทั้งยังกำจัดผลึกเพชรที่เกิดบนหน้ากากได้ง่าย ทำให้ลวดลายของฟิล์มเพชรที่ได้มีความคมชัดสูง

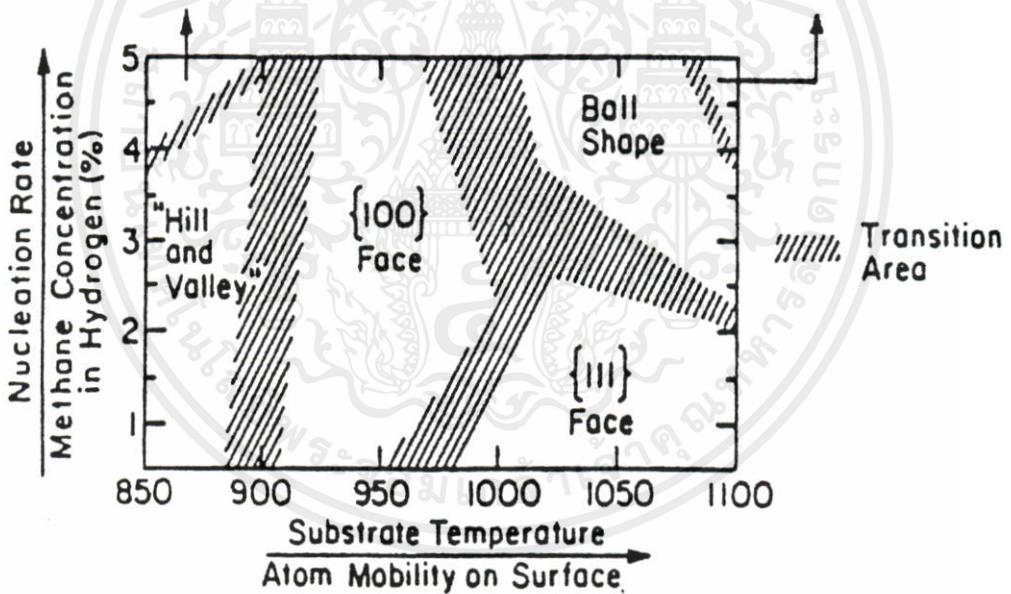
สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้การเตรียมพื้นผิวฐานรอง โดยวิธีการขัดด้วยคริมเพชรและอูลตราโซนิคในผงเพชร ในบริเวณที่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชร ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันสูง ( $10^6-10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ) และ ( $10^7-10^4 \text{ cm}^{-2}$ ) ตามลำดับ[10] ส่วนบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น จะใช้หน้ากากป้องกันจากชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย ๆ สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการและมีรายงานยืนยันว่าสามารถป้องกันการเกิดฟิล์มเพชรได้ดี หรือใช้ผิวหน้าที่ผ่านการขัดมันเป็นกระเจกเงาของแผ่นซิลิกอน เป็นบริเวณป้องกันการเกิดฟิล์มเพชรเนื่องจากการศึกษาว่ามีค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรต่ำ ( $10^3-10^5 \text{ cm}^{-2}$ )[10] โดยความแตกต่างกันระหว่างค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรบนพื้นที่ทั้งสองต้องแตกต่างกันมากที่สุด เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายให้น้อยที่สุด ซึ่งจะมีผลทำให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรมีค่าลดลง

#### 2.4.5 ลักษณะการเกิดรูปทรงของผลึกเพชร

โดยทั่วไปแล้วผลึกเพชรที่เกิดจากการสร้างด้วยวิธี CVD ส่วนมากมักพบในรูปของ Octahedral, Cubo-octahedral, Cubic และ Multiply twinned particles ปัจจัยที่ทำให้เพชรเกิดเป็นรูปทรงต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายอย่าง อาทิเช่น อุณหภูมิฐานรอง, ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรเจนที่ใช้ มีการรายงานเกี่ยวกับพฤติกรรมการเกิดผลึกเพชรที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน ตัวอย่างเช่น ในปีค.ศ. 1987 Haubner et al. ได้ศึกษาลักษณะรูปทรงของผลึกเพชรที่สร้าง

ด้วยวิธี Microwave plasma บนฐานรอง SiAlON พบว่ารูปทรงของผลึกเพชรที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพลาสมาที่เปลี่ยนไปตลอดจนรวมไปถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ในการสร้างเช่น แรงดันก๊าซ, อัตราการไหลของก๊าซ, ความเข้มข้นของมีเทน และอุณหภูมิฐานรอง พวกเขาพบว่าที่ความหนาแน่นของพลาสมาและอุณหภูมิฐานรองสูงผลึกเพชรจะมีระนาบ {111} แต่หากพลาสมามีความหนาแน่นต่ำและอุณหภูมิฐานรองต่ำ ผลึกเพชรที่ได้จะมีระนาบ {100} Haubner et al. ได้เสนอแนะว่าการเกิดของผลึกเพชรที่มีระนาบต่างๆกัน น่าจะเป็นผลมาจากการอิมพัลส์ของคาร์บอนในก๊าซเฟส, ความคล่องตัวของคาร์บอนบนพื้นผิวและพลังงานพื้นผิวของผิวหน้าผลึกขณะเกิด

รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชร ในฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจน และอุณหภูมิฐานรอง[5]



นอกจากนี้ในปี ค.ศ.1990 Zhu et al. ได้ศึกษาถึงลักษณะการเกิดรูปทรงต่าง ๆ ของผลึกและฟิล์มเพชรที่สร้างด้วยวิธี Microwave plasma CVD[5] Zhu et al. พบว่าการเปลี่ยนไปของอุณหภูมิฐานรอง, ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน และอัตราการไหลของก๊าซ มีผลอย่างยิ่งกับการเกิดผลึกเพชรเป็นระนาบ {111} หรือ {100} การทดลองได้นำการเพิ่มค่าอุณหภูมิฐานรองหรืออัตราการไหลของก๊าซ ตามลำดับ (อุณหภูมิฐานรองตั้งแต่ 850°C ถึง 1,150°C อัตราการไหลของก๊าซจาก 0 ถึง 400 sccm) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มเพชรจะเปลี่ยนจากระนาบ {100} เป็นระนาบ {111} และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจนจาก 0.5% เป็น 2% รูปทรงของฟิล์มเพชรจะ

เปลี่ยนจากระนาบ {111} เป็นระนาบ {100} หากเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนขึ้นไปถึง 5 % ผลที่ได้จะเป็นฟิล์มเพชรที่มีผลึกขนาดเล็ก (น้อยกว่า  $1 \mu\text{m}$ ) ซึ่งมีกราฟไฟต์เป็นองค์ประกอบเกิดขึ้น ผลจากการทดลองที่ได้นี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.10 แผนภาพดังกล่าวถูกเรียกว่า “แผนภาพการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชร” ซึ่งใช้ทำนายการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชรได้ในกระบวนการสร้างแบบ CVD

แผนภาพดังกล่าวสามารถใช้ทำนายรูปทรงของเพชรได้ โดยใช้ค่าอุณหภูมิฐานรองและความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจนเป็นหลัก ตัวอย่างเช่น ฟิล์มเพชรระนาบ {111} ส่วนมากจะพบในการสร้างที่มีอุณหภูมิฐานรองสูง ( $980^{\circ}\text{C}$ ) ขึ้นไป และความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจนต่ำ (0.5%-2%) ในขณะที่ฟิล์มเพชรระนาบ {100} ได้จากการสร้างที่ใช้อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $920-930^{\circ}\text{C}$  สำหรับทุกค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

ภายหลังจากกระบวนการสร้างเพชรเสร็จสิ้นแล้ว ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเพชรต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากการสังเคราะห์เพชร จะมีการเปลี่ยนแปลงทางพันธะเคมีของอะตอมคาร์บอน จากพันธะ Hybridization แบบ  $sp^1$  ไปเป็นโครงสร้างพันธะแบบ  $sp^2$  ของกราไฟต์ และท้ายสุดเป็นพันธะแบบ  $sp^3$  ของเพชร ซึ่งบางครั้งอะตอมคาร์บอนอาจก่อตัวเป็นอมอร์ฟัส หรือ DLC แล้วแต่เงื่อนไขในการสร้าง

การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรมีหลายวิธีการแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน อาทิเช่น ถ้าต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร พื้นที่เกิดฟิล์มเพชรหรือแม้แต่ความหนาของเพชรที่เกิดขึ้น นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) แต่หากต้องการวิเคราะห์ถึงพันธะของอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกัน เพื่อตรวจสอบว่าเป็นเพชร, กราไฟต์, อมอร์ฟัสคาร์บอน หรือ DLC เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy จะถูกนำมาใช้หรือถ้าต้องการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร อาทิเช่น ความคล่องตัวของประจุพาหะ, ความหนาแน่นของประจุพาหะ เทคนิคการวัดด้วย Hall effect จะถูกเลือกใช้งาน เทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการเลือกใช้เทคนิคต่างๆ ในการตรวจสอบและวิเคราะห์ฟิล์มเพชร[9]

Property	Description	Analytical Technique	Optimal or Single Crystal Value
morphology	smooth surface for post-deposition processing (e.g., contacts)	SEM	optimal: single crystal
area	large area for process development and for economical production; for device proof concept : 1-2 cm <sup>2</sup>	optical microscopy, SEM	optimal: $\geq 100$ cm <sup>2</sup>
thickness	sufficiently thick (e.g., heat spreaders) or thin (e.g., active layers)	SEM, profilometry	controlled within $\pm 10\%$
bonding	graphite and other carbon allotropes disrupt long range order and by acti as trapping centers or electron sources	Raman, diffraction techniques	optimal: no electrically active, uncontrolled species
unintentional impurities	noncarbon atoms unintentionally introduced during growth; interfere with electronic (and other) properties by disrupting long range order and by acting as trapping centers	SIMS, CL, PL	optimal: no electrically active, uncontrolled species
structural defects	point (impurities), linear (dislocations), and planar (grain boundaries) defects; disrupt long range order and by act as trapping centers	PL	optimal: no electrically active defects

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) แสดงการเลือกใช้เทคนิคต่างๆ ในการตรวจสอบและวิเคราะห์ฟิล์มเพชร[9]

thermal conductivity	phonon-based heat transfer; much higher than in materials with electron-based heat transfer		single crystal: 20W/cm.K
mobility	ability of charged carriers to move through material; reduced through scattering from defects; high in diamond for both holes and electrons	Hall, PC	single crystal: 2000 cm <sup>2</sup> /V.s for holes
carrier concentration	density of electrically active carriers (temperature dependent) p-type: boron is only known acceptor n-type: none demonstrated to date	Hall (SIMS)	optimal: 10 <sup>16</sup> - 10 <sup>21</sup> cm <sup>-3</sup>
activation energy	determines number of carriers active at a given temperature e.g., E <sub>A</sub> (boron)=0.35 eV (⇒0.1% active at RT); too few carriers at RT for many applications		optimal: <0.1 eV for acceptors and donors
lifetime	length of time from carrier generation to recombination; current typical value is 100 ps to 1 ns	PC	optimal: ≥1 ms
resistivity			optimal: ≥10 <sup>14</sup> Ω.cm

\* Abbreviation are defined as follows: CL = cathodoluminescence, PL = photoluminescence, PC = photoconductivity

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร 3 วิธีคือ

1. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว, รูปร่าง, ความหนา และการเกิดฟิล์มเพชรบนพื้นที่ที่กำหนดด้วย SEM (เครื่องมือแสดงไว้ในภาคผนวก ค)
2. ตรวจสอบโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนว่าเป็นพันธะชนิดใดจาก Raman spectroscopy (เครื่องมือแสดงไว้ในภาคผนวก ค)
3. ใช้เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) (เครื่องมือแสดงไว้ในภาคผนวก ค)

เพื่อเป็นการยืนยันว่าฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นนั้น มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ

### 3.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM

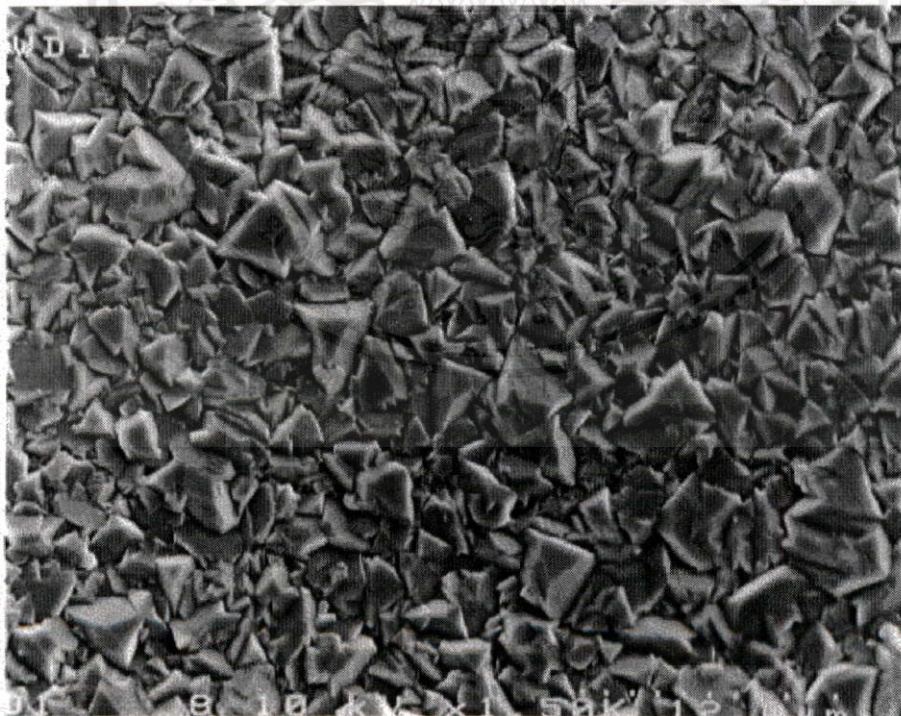
SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุลย์ ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-ray tube) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่น ๆ คือ SEM มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ 50-40,000X) ความคมชัดของภาพสูง (2.5-10 nm), ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเปรียบเทียบกับ TEM (Transmission electron microscopy) ซึ่งสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบต้องมีความบางมาก ๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อน แต่หากสารตัวอย่างที่ไม่มีควมนำไฟฟ้า ก่อนการใช้งานต้องนำไปเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าก่อน (นิยมใช้ทองคำหรือคาร์บอน) ตัวอย่างเช่น ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง Si สามารถที่จะวัดด้วย SEM ได้เลย ในขณะที่ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง  $\text{SiO}_2$  ต้องทำการเคลือบทองคำก่อนนำไปวัดด้วย SEM อย่างไรก็ตามในการใช้งานลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรง

คันและกระแสดำ ๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงการประจุนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร ด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น Raman spectroscopy

นอกจากนี้เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรอง Si) บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่พบส่วนมากจะมี 4 แบบคือ 1. ระนาบ {111} 2. ระนาบ {100} 3. ระนาบรวม (Polycrystalline) และ 4. Cauliflower-like หรือ Microcrystalline ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้าง โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่อก๊าซไฮโดรเจน

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ[5]

(a) {111} Triangular faces



(a)

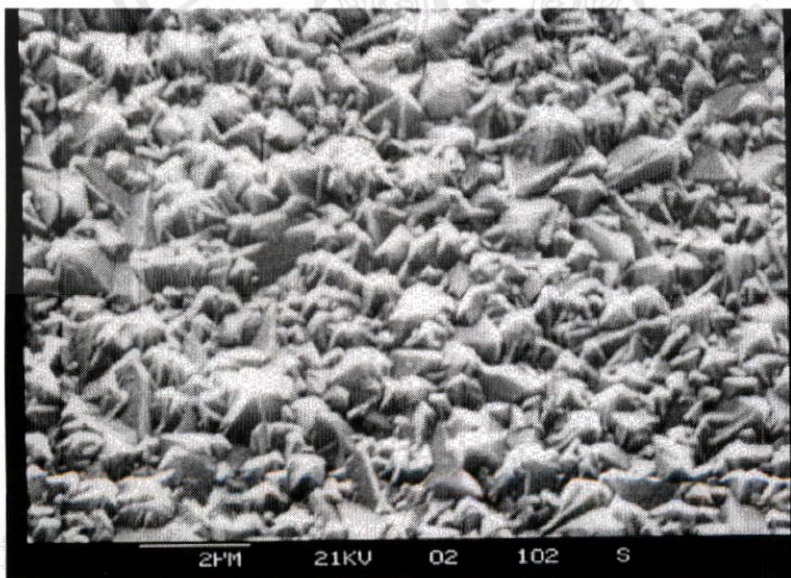
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดลอกหรือการแก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

รูปที่ 3.1(ต่อ) แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ

(b) {100} Square faces (c) Polycrystalline faces



(b)



(c)

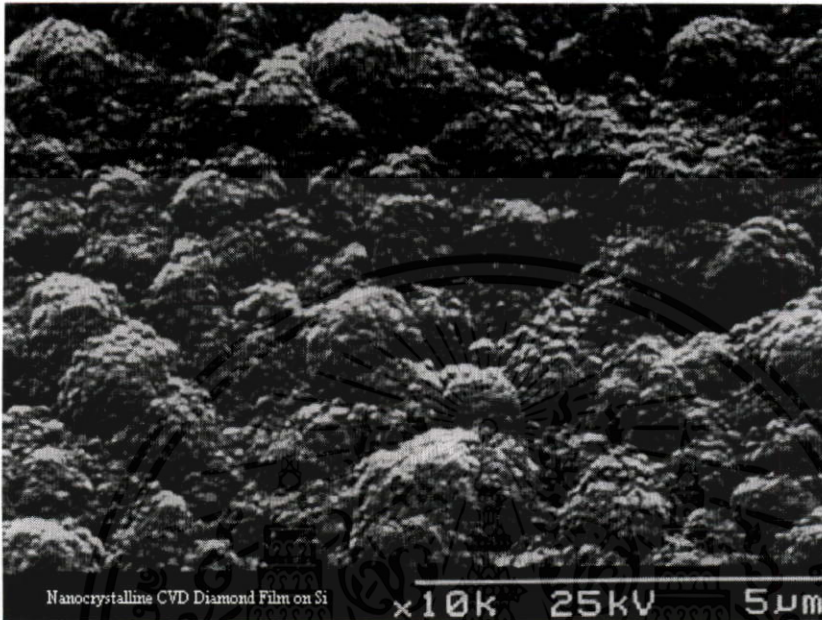
เอกสารนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### รูปที่ 3.1(ต่อ) แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ

(d) Cauliflower-like or microcrystalline

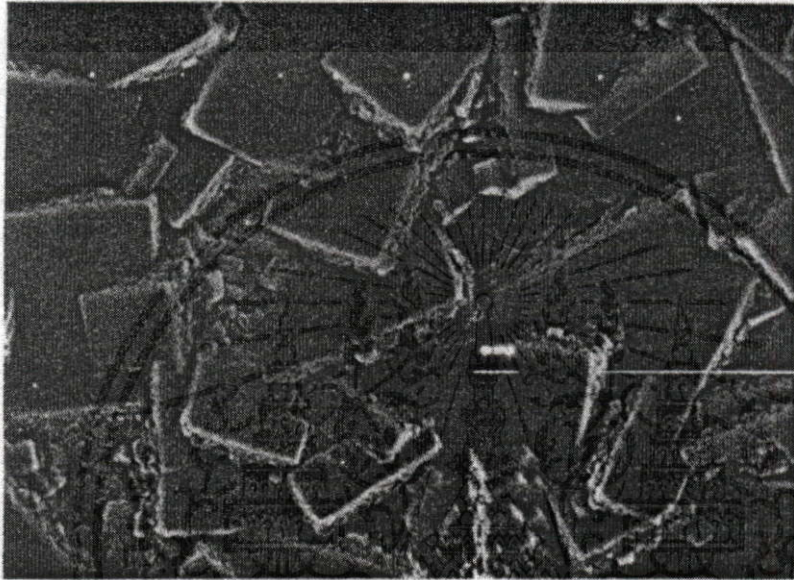


(d)

จากรูปที่ 3.1 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ซึ่งหากใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy จะช่วยให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น Raman spectrum ที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่มีผิวหน้าแบบ Cauliflower-like ในรูปที่ 3.1d จะมียอดกราฟลดลง และเกิดยอดของกราฟได้ขึ้นมา เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจสอบพื้นผิวของเพชรรูปอื่น ๆ (3.1a ถึง 3.1c ) พบว่าฟิล์มเพชรที่มีลักษณะพื้นผิวแบบรูปที่ 3.1d แสดงคุณสมบัติของเพชรน้อยกว่าชนิดอื่น ๆ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.2

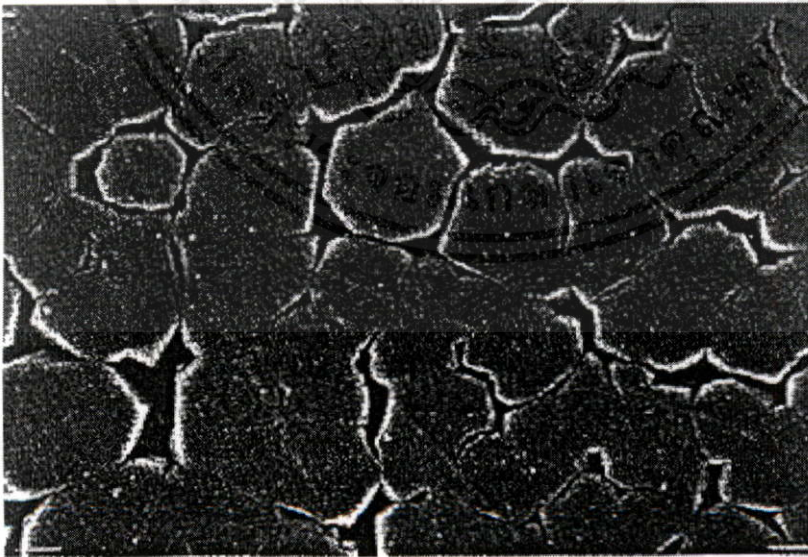
นอกจากนี้ Pickrell et al. รายงานว่าได้ใช้ SEM วิเคราะห์รอยต่อระหว่างผลึกเดี่ยว ๆ ที่เกิดขึ้นบนฐานรองสองชนิดคือ Si และ SiO<sub>2</sub> [5] พบว่ากรณีฐานรองเป็น Si ผลึกของชั้น Intermediat layer มีขนาดใหญ่ทำให้เพชรที่เกิดขึ้นบนตำแหน่งการนิวเคลียชันมีทิศทางการเกิดทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบสูง ผลึกเพชรจึงมีขนาดใหญ่ ดังนั้นบริเวณรอยต่อระหว่างแต่ละผลึกเดี่ยว ๆ จึงมีพื้นที่มาก ส่งผลให้ฟิล์มเพชรที่ได้มีการยึดเกาะดี ดังแสดงในรูปที่ 3.2a หากฐานรองเป็น SiO<sub>2</sub> ชั้น Intermediat layer ที่เกิดขึ้นจะมีผลึกขนาดเล็กของ Graphite carbon และเฟสของ Si-O-C กระจายอยู่ทั่วไปอย่างไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.2b ดังนั้นฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นจะมีการยึดเกาะที่ไม่ดีนัก เมื่อเทียบกับฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรอง Si

รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของรอยต่อและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่เกิดบน  
 (a) ฐานรอง Si (b) ฐานรอง SiO<sub>2</sub> [5]



Surface

2 μm



Interface

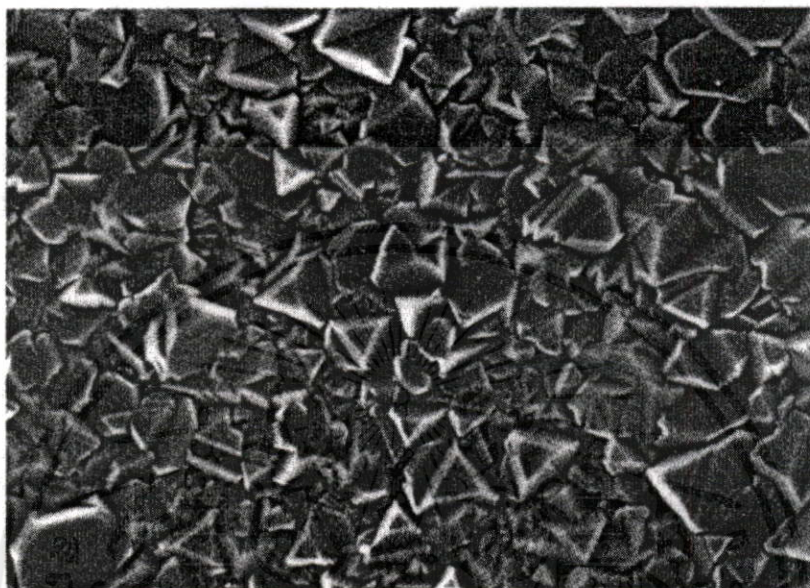
2 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a)

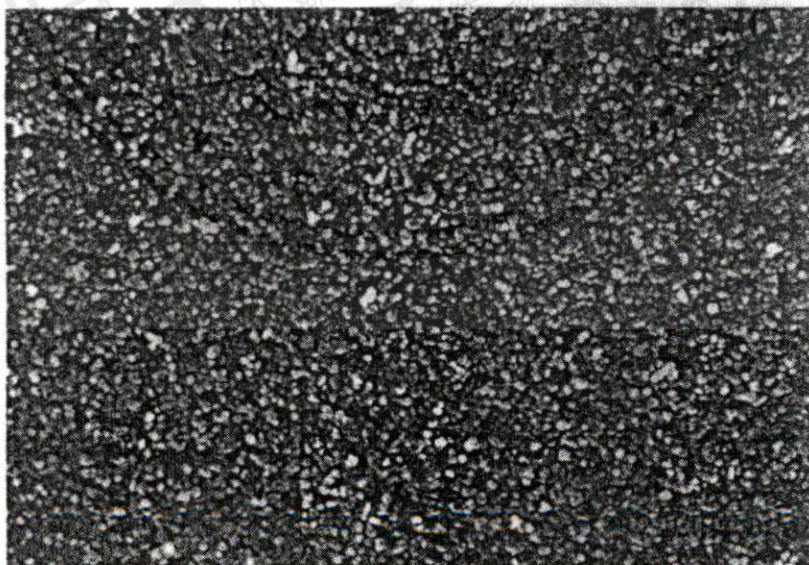
รูปที่ 3.2(ต่อ) แสดงภาพถ่าย SEM ของรอยต่อและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่เกิดบน

(a) ฐานรอง Si (b) ฐานรอง SiO<sub>2</sub> [5]



Surface

2 μm

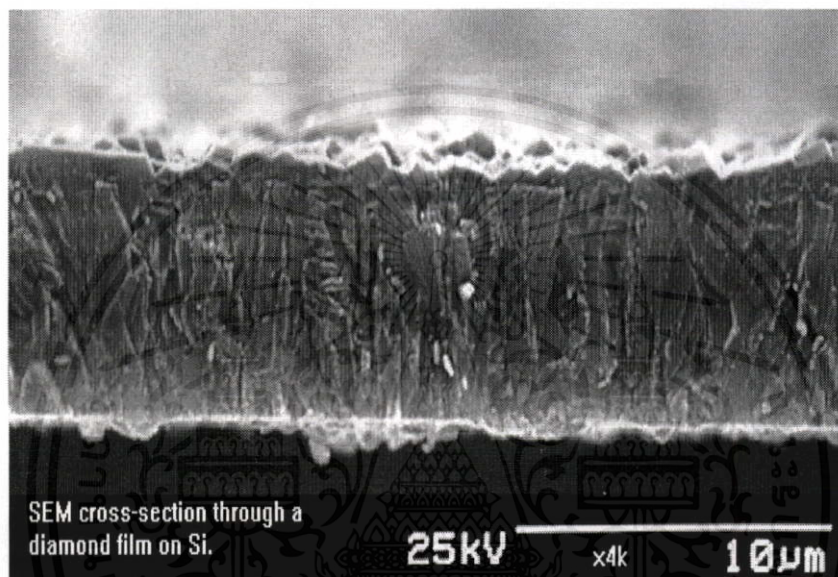


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส Interface ับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ 2 μm ำประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b)

นอกจากนี้ยังสามารถใช้ SEM หาคความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นได้ ดังตัวอย่างจากรูปที่ 3.3 อีกด้วย

รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM



### 3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและกราไฟต์สูง แม้ว่าจะมีกราไฟต์เพียงเล็กน้อยก็ตามเนื่องจากประสิทธิภาพการกระเจิงของกราไฟต์มีค่ามากกว่าของเพชรมาก ตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman spectrum จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตรวจสอบได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณี หลักการพื้นฐานของ Raman spectroscopy คือใช้การสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสารหรือผิวหน้าของผลึก ทำให้สามารถแยกความแตกต่างของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนได้ การทำงานของ Raman spectroscopy อาศัยปรากฏการณ์การกระเจิงทางแสง โดยหลักการ

ของปรากฏการณ์ดังกล่าวคือการวัดการลดลงของความเข้มของลำแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน ผลของ Raman จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การกระเจิงของโมเลกุล ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการชนกันระหว่างโฟตอนกับการสั่นของแลตทิซหรือโฟนอน ทำให้เกิดคู่ของโฟตอนและโฟนอน สนามไฟฟ้าของความเข้มลำแสงเป็นตัวบังคับให้แสงมีคลื่นไปทางเดียวในผลึก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Polarizability ดังสมการ

$$P = \alpha E \quad (3.1)$$

โดยที่  $P$  คือ โมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

$E$  คือ สนามไฟฟ้า

$\alpha$  คือ Polarizability

เมื่อมีการสั่นของแลตทิซเกิดขึ้นอันเป็นภาวะการกระตุ้นของ Raman ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Polarizability Raman จะปล่อยโฟตอนบางส่วนออกมา โดยโฟตอนนี้เกิดจากการสั่นของไดโพล ซึ่งมีทั้งที่ความถี่เหมือนกับลำแสงตกกระทบ (Elastic rayleigh scattering) หรือมีการเลื่อนไปของความถี่ ซึ่งมีค่าเท่ากับความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (Inelastic stokes or anti-stokers scattering) :

$$P = E_0 \alpha_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} E_0 \sum \alpha_n \left\{ \cos 2\pi(\nu_0 - \nu_n)t + \cos 2\pi(\nu_0 + \nu_n)t \right\} \quad (3.2)$$

โดยที่  $E_0$  คือ สนามไฟฟ้าของลำแสงที่ตกกระทบ

$t$  คือ เวลา

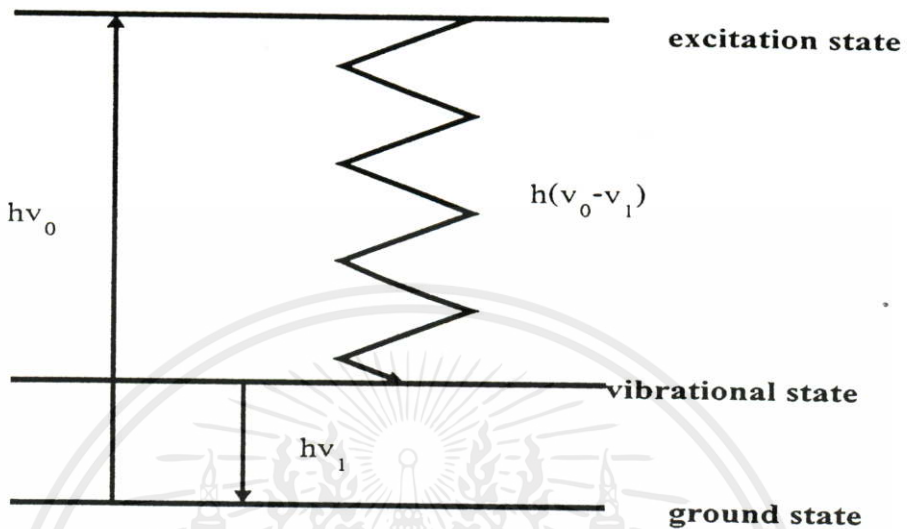
$\nu_0$  คือ ความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ

$\nu_n$  คือ ความถี่ของโฟนอน

$\alpha_n$  คือ Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

ปรากฏการณ์ “Stokes scattering” เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำแสง ทำให้เกิดการสั่นของแลตทิซขึ้น ขณะที่ปรากฏการณ์ “Anti-stokes scattering” เกิดจากการทำลายของความร้อนที่กระตุ้นการสั่น โหมดของการสั่นจะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman spectrum สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็งได้เป็นอย่างดี

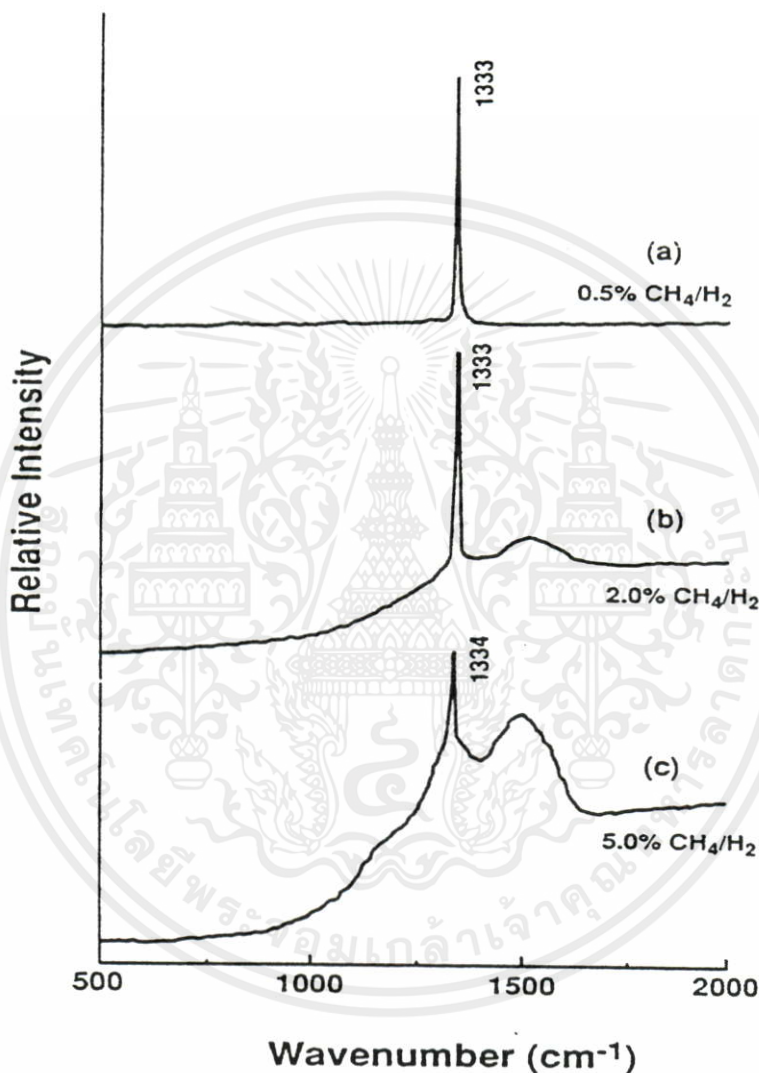
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น



จากรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงการเกิดปรากฏการณ์ Raman scattering เมื่อยิงลำแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในสารตัวอย่าง โฟตอนจากลำแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน  $h\nu_0$  จะเข้าไปอิเล็กตรอนของอะตอมสารตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานไปบางส่วน ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเกิดการกระโดดเข้าไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า “สถานะกระตุ้น” (Excitation state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงตกกลับมาสู่สถานะเดิม โดยมีการคายพลังงานออกมามีค่า  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ส่วนพลังงานที่สูญเสียไปคือ  $h\nu_1$  ถูกใช้สำหรับทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงสร้างผลึก โดยพลังงาน  $h\nu_1$  ที่สูญเสียไปนี้อยู่ในย่านอินฟราเรด พลังงานที่เหลือ  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ก็คือพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั่นเอง สำหรับสเปกตรัมของแสง  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ที่ได้ จะถูกเรียกว่า “Stoke line”

จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร, กราไฟต์, อมอร์ฟัสคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอน แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 (รายละเอียดต่าง ๆ ในตาราง 3.2 ได้ถูกอธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.1) นอกจากนี้สามารถใช้ Raman spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่าง ๆ กัน เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น รูปที่ 3.5 แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่าง ๆ กันคือ (a) 0.5 %  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  (b) 2 %  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  และ (c) 5 %  $\text{CH}_4/\text{H}_2$

รูปที่ 3.5 แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่าง ๆ กัน (a) 0.5 %  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  (b) 2 %  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  และ (c) 5 %  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  [5]



รูปที่ 3.5a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง  $1332 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 3.5b พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ  $1332 \text{ cm}^{-1}$  เริ่มกว้างขึ้น และเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ  $1500 \text{ cm}^{-1}$  อันเป็นตำแหน่งของ Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like

carbon เจือปนอยู่ สำหรับสเปกตรัมของรูป 3.5c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ  $1332\text{ cm}^{-1}$  ลดลงอย่างมากและมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่  $1334\text{ cm}^{-1}$  ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ  $1500\text{ cm}^{-1}$  เริ่มมียอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด นอกจากนี้ข้อสังเกตที่สำคัญจากการเปรียบเทียบสเปกตรัมที่แตกต่างกันพบว่าลักษณะสำคัญของพันธะแบบ  $sp^3$  ของเพชร เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำกว่า  $1332\text{ cm}^{-1}$  ในขณะที่ยอดที่เกิดจากพันธะแบบ  $sp^2$  ของกราฟไฟต์เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความถี่สูงกว่า  $1332\text{ cm}^{-1}$  อันเป็นผลเนื่องมาจากพันธะระหว่าง  $sp^2$  ของอะตอมคาร์บอน มีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะแบบ  $sp^3$

ตารางที่ 3.2 แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน [9]

Peak position	Type of carbon	Description
$\sim 1140\text{ cm}^{-1}$	small size ( $< 0.1\ \mu\text{m}$ ) cubic diamond	occasionally observed in diamond films with very small grain sizes ( $< 0.1\ \mu\text{m}$ )
$1315\text{-}1326\text{ cm}^{-1}$	hexagonal diamond	broad band, observed in shock wave produced diamond
$1332\text{ cm}^{-1}$	cubic diamond	first order peak with FWHM of $1.9\text{ cm}^{-1}$ for natural diamond
$1345\text{ cm}^{-1}$	amorphous carbon	broad band. It becomes a shoulder of the $1550\text{ cm}^{-1}$ band when the material is hydrogenated
$1355\text{ cm}^{-1}$	microcrystalline graphite	observed in materials with small grain sizes
$1550\text{ cm}^{-1}$	amorphous or diamond-like carbon	broad band
$1580\text{ cm}^{-1}$	graphite	first order peak
$2458\text{ cm}^{-1}$	cubic diamond	second order peak
$2710\text{ cm}^{-1}$	microcrystalline graphite	second order peak
$3240\text{ cm}^{-1}$	graphite	second order peak

นอกจากนี้ Raman spectroscopy ยังมีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์หาปริมาณความสัมพันธ์ของพันธะ  $sp^3$  กับพันธะ  $sp^2$  โดยหากทราบความแรงของการกระเจิงสัมพันธ์ก็สามารถพิจารณาหาจำนวนสัมพัทธ์ขององค์ประกอบของเพชรและกราไฟต์ในฟิล์มเพชรที่ได้จากการสร้างด้วยวิธี CVD ได้ หรืออีกทางหนึ่งกราไฟต์จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีขาวยาว แต่ในเพชรจะไม่มีการดูดกลืน ทำให้แสงสามารถผ่านเพชรได้ตลอด ดังนั้นถ้าหากฟิล์มมีกราไฟต์เจือปนอยู่แสงที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารจะไม่เป็นระเบียบ ปกติแล้วบริเวณที่มีการดูดกลืนจะวัดได้เฉพาะผิวหน้าเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นและขนาดของผลึกมีผลสำคัญต่อ Raman spectrum ที่ได้ สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ผลจากขนาดของผลึกสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบของ Microcrystalline graphite เจือปน แต่ถ้าฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างที่ไม่เหมาะสม (เช่น ความเข้มข้นของ  $CH_4 / H_2$  มีมากกว่า 20 %) ขนาดของผลึกเพชรจะมีผลต่อการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์ม สรุปได้ว่า การวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มเพชรจากเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์ของพันธะแบบ  $sp^3$  และ  $sp^2$  จึงมีความสำคัญและยังรวมไปถึงขนาดของผลึกเพชรที่บริเวณ  $sp^2$  ก็มีความสำคัญเช่นกัน

### 3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) จะใช้พื้นฐานจาก "Bragg's diffraction law" ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการง่าย ๆ ได้ดังสมการ 3.3 โดยคิดว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบในแลตทิซ ซึ่งสมการของ Bragg พิจารณาจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบในแลตทิซ  $P_1$  และ  $P_2$  ที่ขนานกันดังแสดงในรูปที่ 3.6

จากรูปลำรังสีเอ็กซ์ที่ 1 และ 2 ตกกระทบกับระนาบ  $P_1$  และ  $P_2$  ที่จุด O และ C ด้วยมุมตกกระทบ  $\theta$  อิเล็กตรอนที่สมมติว่าอยู่จุด O และ C พอดี จะเกิดการสั่นตาม Oscillating field ของรังสีเอ็กซ์ ที่เข้ามา เกิดพลังงานแผ่ออกมาทุกทิศทาง พบว่าในทิศทางที่ลำรังสีที่ 1 และ 2 ออกมาทำมุม  $\theta$  เสมือนมีการสะท้อนออกมาของรังสีเอ็กซ์จะให้ความเข้มรังสีเอ็กซ์สูงสุด หรือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมขึ้น (in phase) โดยจากรูปมุม  $\angle AOC = \angle BOC = \theta$  เพราะฉะนั้น  $AC = BC = d \sin \theta$  ซึ่งจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันเมื่อ

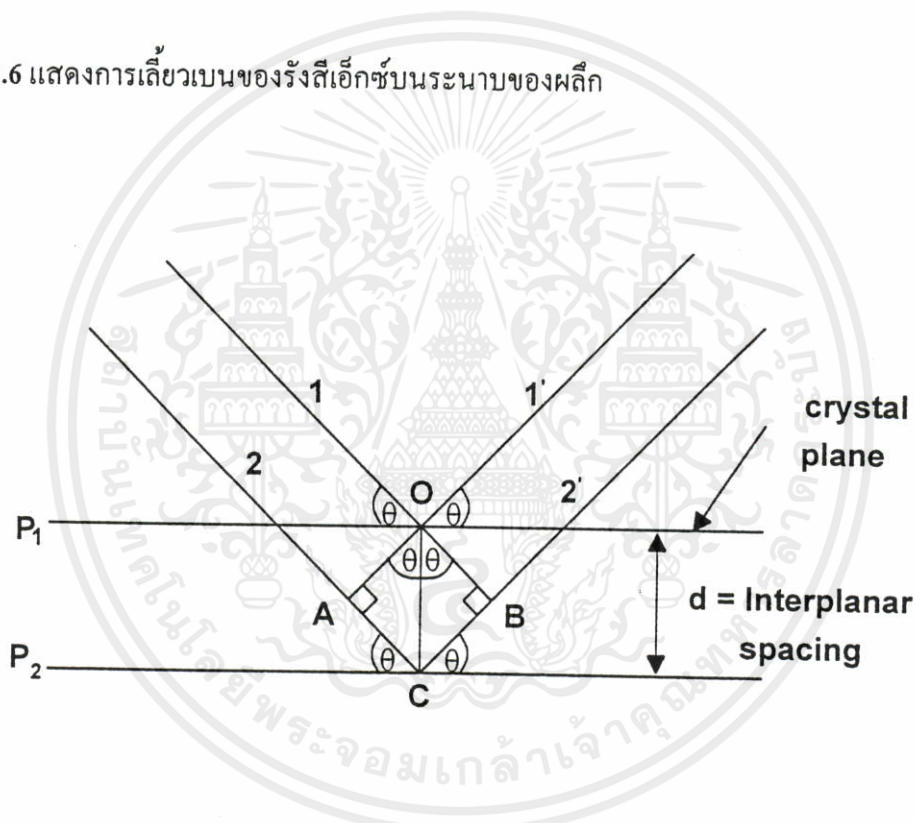
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3.3)$$

เมื่อ

d = Interplanar spacing

 $\theta$  = มุม Diffractionn = ลำดับของการเลี้ยวเบน ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) $\lambda$  = ความยาวคลื่น

รูปที่ 3.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก



จะเห็นว่าการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จะทำมุม  $\theta$  กับ Crystal plane และทำมุม  $2\theta$  เมื่อเทียบกับลำดับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ

สำหรับฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้วัดค่าพารามิเตอร์ของแลตทิซและพิจารณาลักษณะรูปทรงของฟิล์มได้ รูปแบบคุณลักษณะของผลึกรวมของเพชรที่ได้นั้น ผลึกเพชรต้องมีขนาดใหญ่ (ประมาณ 10 nm หรือ มากกว่านั้น) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกของเพชรเป็นแบบ Cubic ซึ่งมีความสมมาตรสูง การคำนวณแฟคเตอร์ของโครงสร้างทำให้ระนาบของการเลี้ยวเบนมีจำนวนน้อย (ระนาบของการเลี้ยวเบนที่ได้  $\{hkl\}$  คือ  $\{111\}$ ,  $\{220\}$ ,  $\{311\}$ ,  $\{400\}$ ,  $\{331\}$  และอื่น ๆ โดย h, k, l จะเป็นเลขคู่ทั้งหมดหรือเลขคี่ทั้งหมด

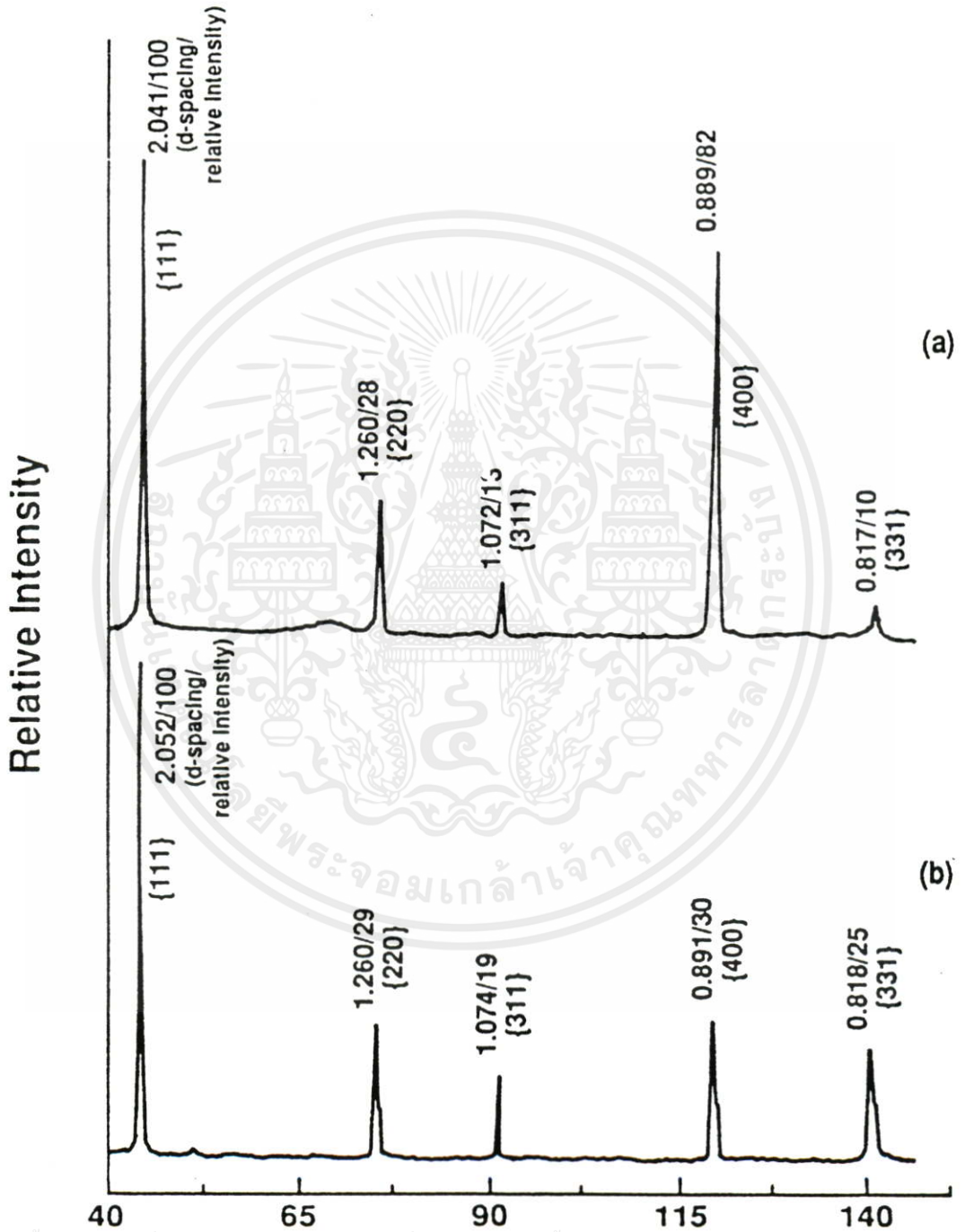
และ  $h + k + l = 4n$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนเต็ม) นอกจากนี้ในกรณีที่ระนาบผลึกมีรูปแบบต่าง ๆ กันพบว่า การเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ  $\{111\}$  จะมีความแรงสูงสุดและการที่เส้นการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์มีการเลื่อนหรือเกิดแถบกว้างขึ้น เป็นผลมาจากตำหนิหรือขนาดของผลึกที่เล็กเกินไป รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ บนพื้นผิวฟิล์มที่มีระนาบ  $\{111\}$  และ  $\{100\}$  แสดงได้ในรูปที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นถึงความแตกต่างกันของความเข้มของรูปแบบระนาบของผลึก

Kaac et al.[5] ได้พิจารณาถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มที่มีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกันห้าชนิด เนื่องจากระนาบผลึกที่ขนานกับพื้นผิวฐานรองเท่านั้นที่จะเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นมา จากการเปรียบเทียบความเข้มของการเลี้ยวเบนของระนาบผลึกที่มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ ความเข้มของการเลี้ยวเบนของผงเพชร ความสัมพันธ์ของความเข้มของยอดที่ได้จากการทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 3.3 จากตารางพบว่า มีฟิล์มอยู่สองชนิดคือ ฟิล์ม A และ E มีความแตกต่างของความเข้มการเลี้ยวเบนที่ระนาบ  $\{111\}$  กับระนาบอื่น ๆ มากกว่ากรณีของสารตัวอย่าง ส่วนในฟิล์ม B ระนาบ  $\{400\}$  จะมีความเข้มของการเลี้ยวเบนมากกว่าระนาบ  $\{400\}$  ของสารตัวอย่าง ดังนั้นฟิล์ม A และ E มีระนาบที่ขนานกับระนาบของการเคลือบเป็น  $\{111\}$  และฟิล์ม B ระนาบที่ขนานกันของการเคลือบจะเป็นระนาบ  $\{100\}$  ซึ่งผลดังกล่าวสามารถยืนยันได้ด้วยการดูลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรจาก SEM

ตารางที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ของยอดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกในฟิล์มเพชร [5]

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

รูปที่ 3.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (a) บนระนาบ {100} และ (b) บนระนาบ {111} [5]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ค่า Interplanar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติยังแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงค่า Interplanar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติ (ASTM6-675) [5]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### กระบวนการทดลอง

#### 4.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง

ฟิล์มเพชรสามารถเกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรหลายชนิดด้วยกัน ตัวอย่างของวัสดุที่สามารถนำมาใช้เป็นฐานรองในการสร้างฟิล์มเพชรได้ เช่น Si, SiC, WC, W, Mo, Cu และ  $Al_2O_3$  เป็นต้น แต่สำหรับในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเลือกใช้ฐานรองเพียงอย่างเดียวคือ Si เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีใช้อยู่แล้วในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ก่อนที่จะนำแผ่นฐานรองซิลิกอนไปใช้ในการทดลอง จำเป็นต้องมีกระบวนการเตรียมแผ่นฐานรองดังกระบวนการต่อไปนี้

##### 4.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น (Initial cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water; DI) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำ DI
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดซิลิกอนไดออกไซด์ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนออก
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

- ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมันล้างด้วยอะซิโตน(Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อแผ่นฐานรองซิลิกอนผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวแผ่นเริ่มต้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นกระบวนการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อกระตุ้นให้เกิดการนิวเคลียชันของเพชรเร็วขึ้น โดยการเตรียมพื้นผิวฐานรองจะมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีการเตรียมพื้นผิวของฐานรองจะถูกเลือกใช้ให้เหมาะสมตามกระบวนการทดลองและสร้าง สำหรับวิธีการเตรียมพื้นผิวฐานรองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีดังนี้คือ

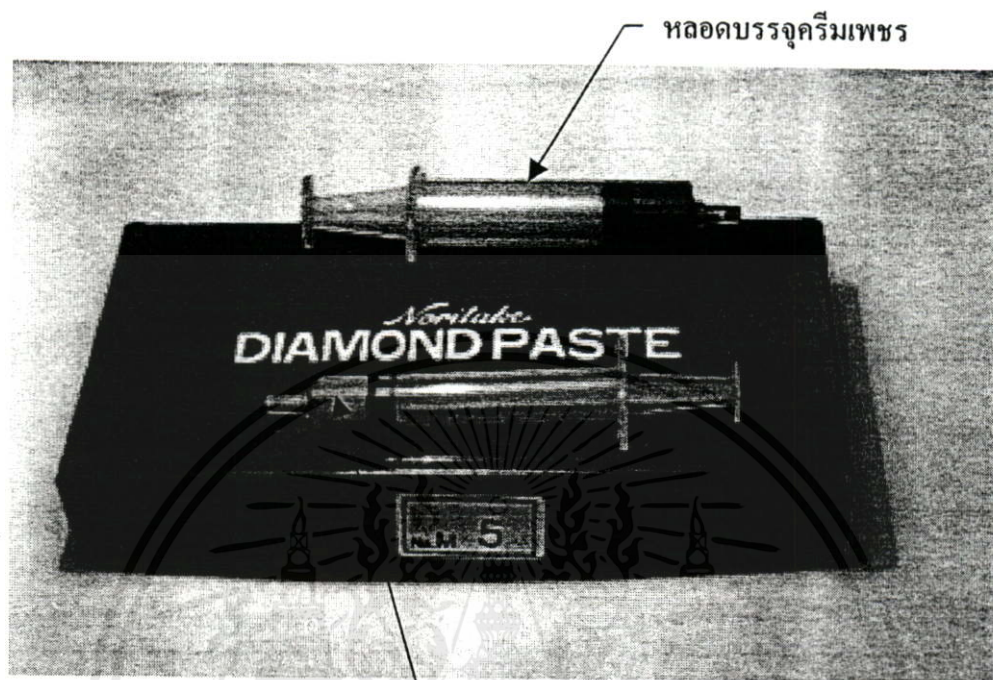
#### 4.1.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร

การเตรียมพื้นผิวฐานรองวิธีนี้จะใช้ครีมเพชรขนาดต่างๆ คือ 0.25 ไมโครเมตร, 1 ไมโครเมตร หรือ 5 ไมโครเมตร ขัดที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน ซึ่งมีลักษณะเรียบและขัดมันเป็นกระจกเงา (Mirror polished) ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมง ลักษณะตัวอย่างของครีมเพชรจะแสดงในรูปที่ 4.1 ผลจากการขัดด้วยครีมเพชรจะทำให้เกิดรอยขีดเล็กๆ ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน โดยขนาดของรอยขีดที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของครีมเพชรที่ใช้ ภายหลังจากขัดแผ่นซิลิกอนเรียบร้อยแล้วต้องนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาด โดยกระทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อุลตราโซนิกแผ่นซิลิกอนในไตรคลอโรเอทิลีน เป็นเวลา 10 นาที
- อุลตราโซนิกในอะซิโตน 10 นาที
- อุลตราโซนิกในน้ำ DI 10 นาที
- เป่าแผ่นซิลิกอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูรอยขีดที่เกิดจากการขัด ในกรณีที่รอยขีดที่เกิดมีจำนวนน้อยต้องนำแผ่นซิลิกอน ไปขัดใหม่ โดยรอยขีดที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งสำคัญในการกระตุ้นให้เกิดการนิวเคลียชันของฟิล์มเพชร

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างครีมเพชรที่ใช้ในการขัดแผ่นซิลิกอน



#### 4.1.3 การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการอุลตราโซนิกด้วยผงเพชร

การเตรียมพื้นผิวของแผ่นซิลิกอน โดยวิธีนี้มีขั้นตอนดังนี้คือ

- นำผงเพชร (ขนาดอนุภาคประมาณ 0.05 ไมโครเมตร หรือ 0.5 ไมโครเมตร) ผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปอุลตราโซนิกประมาณ 2-3 นาที เพื่อให้ผงเพชรกระจายตัวผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์
- นำแผ่นซิลิกอนไปใส่ลงในสารผสมระหว่างผงเพชรกับเอทิลแอลกอฮอล์ นำไปอุลตราโซนิกประมาณ 1-2 ชั่วโมง
- อุลตราโซนิกแผ่นซิลิกอนในอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
- อุลตราโซนิกในน้ำ DI 10 นาที
- เป่าแผ่นซิลิกอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตัวอย่างของกล่องบรรจุผงเพชรและสารผสมระหว่างผงเพชรกับเอทิลแอลกอฮอล์ ไม่ว่าจะที่ใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.2

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของผงเพชรและสารผสมระหว่างผงเพชรกับเอทิลแอลกอฮอล์



#### 4.2 กระบวนการออกแบบลวดลายและผลิตกระจกต้นแบบ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการศึกษาถึงการกำหนดพื้นที่ของการเกิดฟิล์มเพชร ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาถึงรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการเกิดฟิล์มเพชรตามพื้นที่ที่ต้องการ อาทิเช่นขนาดของพื้นที่ที่เกิดฟิล์มเพชร ขนาดความกว้างที่ต่ำสุดและระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของลวดลาย ซึ่งในการกำหนดขนาดพื้นที่การเกิดฟิล์มเพชรหรือระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของลวดลายฟิล์มเพชรจำเป็นต้องมีหน้ากากเพื่อป้องกันพื้นที่บริเวณที่ไม่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น สำหรับการออกแบบเพื่อศึกษาเงื่อนไขต่าง ๆ ดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 การศึกษาเกี่ยวกับขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลายฟิล์มเพชร

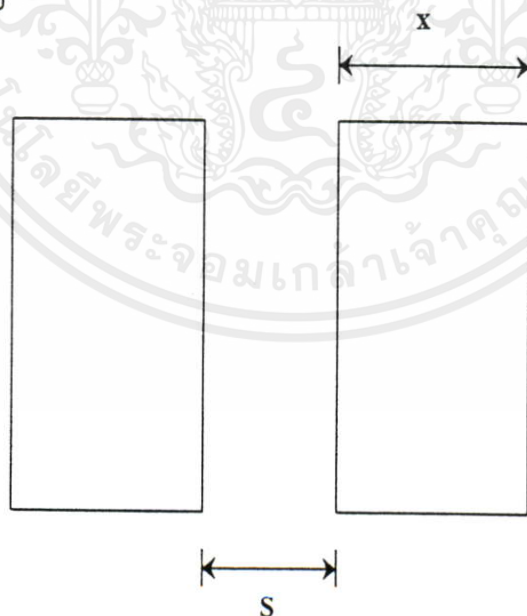
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเปลี่ยนแปลงได้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การศึกษาเกี่ยวกับความกว้างที่ต่ำสุดของลวดลายที่ฟิล์มเพชรสามารถเกิดได้ ทำได้โดยออกแบบลวดลายให้เป็นลักษณะดังรูปที่ 4.3 โดยความกว้าง X เป็นขนาดความกว้างที่ต่ำสุดที่ฟิล์ม

เพชรสามารถเกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปแล้วระยะ  $X$  จะถูกเรียกว่า Minimum feature size หรือ Minimum line width ซึ่งในการทดลองจะแปรค่า  $X$  ตั้งแต่ 10 ไมโครเมตร, 20 ไมโครเมตร, 40 ไมโครเมตร, 60 ไมโครเมตร, 80 ไมโครเมตร, 100 ไมโครเมตร, 120 ไมโครเมตร ฯลฯ เพื่อหาขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลายที่ฟิล์มเพชรจะเกิดขึ้นได้

#### 4.2.2 การศึกษาเพื่อหาค่าระยะใกล้ที่สุดของลวดลายฟิล์มเพชร

ค่าระยะใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร จะเป็นตัวบอถึงความละเอียดของลวดลายของฟิล์มเพชรที่สามารถสร้างขึ้นได้ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรต่อไป จากรูปที่ 4.3 ค่า  $S$  เป็นระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายหรือ Minimum spacing ในการทดลองค่า  $S$  จะเริ่มแปรค่าตั้งแต่ 5 ไมโครเมตร, 10 ไมโครเมตร, 20 ไมโครเมตร, 40 ไมโครเมตร, 60 ไมโครเมตร ฯลฯ เพื่อหาค่าน้อยที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร

รูปที่ 4.3 แสดงการออกแบบเพื่อแปรค่าหาขนาดความกว้างที่ต่ำสุดและระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของลวดลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยที่  $X$  = ขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลาย (Minimum feature size or Minimum line width)

$S$  = ระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างลวดลาย (Minimum spacing)

โดยพื้นที่บริเวณที่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรจะถูกเตรียมสภาพพื้นผิวให้มีการเร่งการเกิดนิวเคลียสของเพชรอย่างรวดเร็ว (ทำได้โดยการขัดด้วยครีมเพชรหรืออุลตราโซนิกในผงเพชร) ส่วนระยะห่างระหว่างลวดลายเป็นบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น ดังนั้นในบริเวณนี้ต้องทำให้มีการนิวเคลียสของเพชรที่เกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งในการทดลองนี้จะให้เป็นบริเวณที่มีพื้นผิวเรียบเช่น ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา (Mirror polished) หรือสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ปกคลุม

#### 4.2.3 การผลิตกระจกมาสก์ต้นแบบ

เมื่อทำการออกแบบลวดลายที่ต้องการเสร็จแล้วจึงนำต้นแบบนั้นมาเขียนลงบนกระดาษกราฟต้นแบบ โดยลวดลายจะถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของขนาดลวดลายที่ต้องการ จากนั้นนำไปทาบด้วยแผ่นพลาสติกลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยไมลาซีทเคลือบพลาสติกสีแดง การตัดต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตจะใช้เครื่องมือโครคัตเตอร์ที่มีความละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร เมื่อทำการตัดแผ่นพลาสติกตามลวดลายเสร็จแล้ว นำลวดลายต้นแบบที่ได้ไปถ่ายย่อส่วน 50 เท่าลงบนกระจกต้นแบบ ด้วยกล้องถ่ายภาพย่อส่วน (Reduction camera) ที่เรียกว่า Step and repeat camera ท้ายที่สุดจะได้ลวดลายบนแผ่นกระจกขนาด 3"×3" เพื่อใช้เป็นโฟโตมาสก์ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีต่อไป

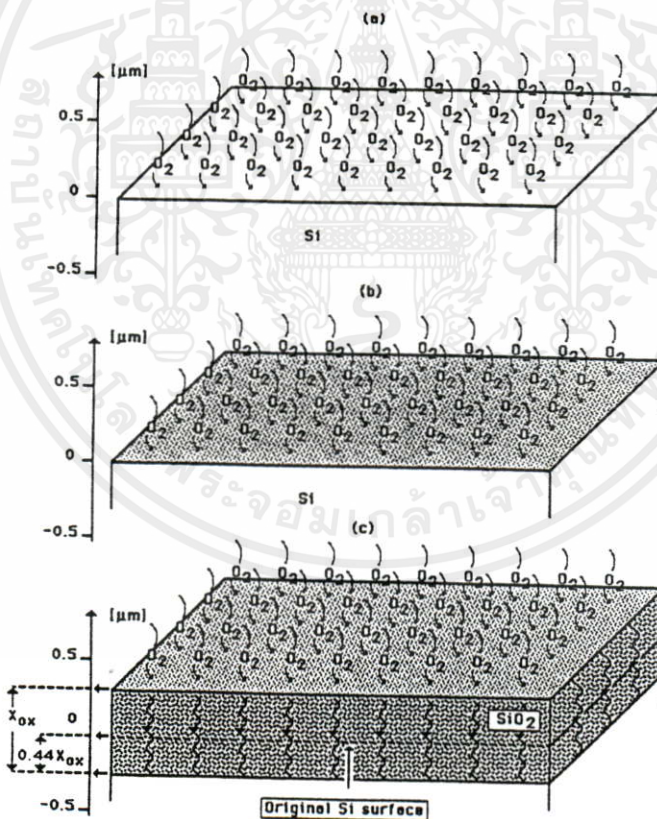
### 4.3 กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

ซิลิกอนไดออกไซด์( $\text{SiO}_2$ ) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและมีลักษณะโปร่งใสสามารถเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ จะถูกสร้างปกคลุมผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวแล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นหน้ากปกป้องกันบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองของวิทยานิพนธ์นี้จะเตรียมมาจากสองวิธีด้วยกันคือวิธีการสปัตเตอร์ริงหรือวิธีการ Thermal oxidation ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการ การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยวิธีดังกล่าว สามารถอธิบายหลักการง่าย ๆ ได้ดังนี้คือ

#### 4.3.1 การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบความร้อน (Thermal oxidation)

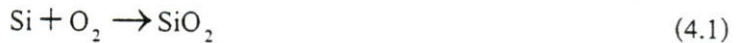
ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยการนำแผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการเตรียมพื้นผิวเรียบร้อยแล้ว ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) หรือไอน้ำ ( $H_2O$ ) ที่อุณหภูมิ  $1,000-1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$  เกิดการออกซิเดชันขึ้น โดยมีปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ดังนี้

รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยกระบวนการออกซิเดชัน[12]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (dry oxidation)



2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation)



โดยการออกซิเดชันแบบแห้งจะให้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาแน่นมาก และมีคุณภาพดี แต่จะใช้เวลาในการเกิดออกไซด์นานกว่าการออกซิเดชันแบบชื้น ซึ่งจะทำให้ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ได้เร็ว แต่ออกไซด์ที่ได้มีคุณภาพต่ำและมีรูพรุนมาก โดยแผนภาพแสดงกระบวนการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 สำหรับความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างจากวิธีนี้สามารถคำนวณได้จากกราฟในภาคผนวก ข

#### 4.3.2 การสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง

การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จากวิธีนี้จะอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “back sputtering” หรืออาจเรียกง่าย ๆ ว่า “sputtering” คือการที่เป้า (target) ถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูงจนมีการปล่อยอะตอมของตัวเป้า ก๊าซอาร์กอน (Ar) ถูกแรงดันไฟกระแสตรงทำให้แตกตัวเป็น  $\text{Ar}^+$  และ  $\text{Ar}^+$  ที่เกิดขึ้นนี้จะถูกร่งด้วยสนามไฟฟ้าจนมีพลังงานสูงวิ่งไปกระทบกับเป้าที่ติดอยู่กับขั้วคาโทดเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่าง  $\text{Ar}^+$  กับอะตอมของตัวเป้า ทำให้อะตอมของตัวเป้าหลุดออกเคลือบบนแผ่นฐานรอง

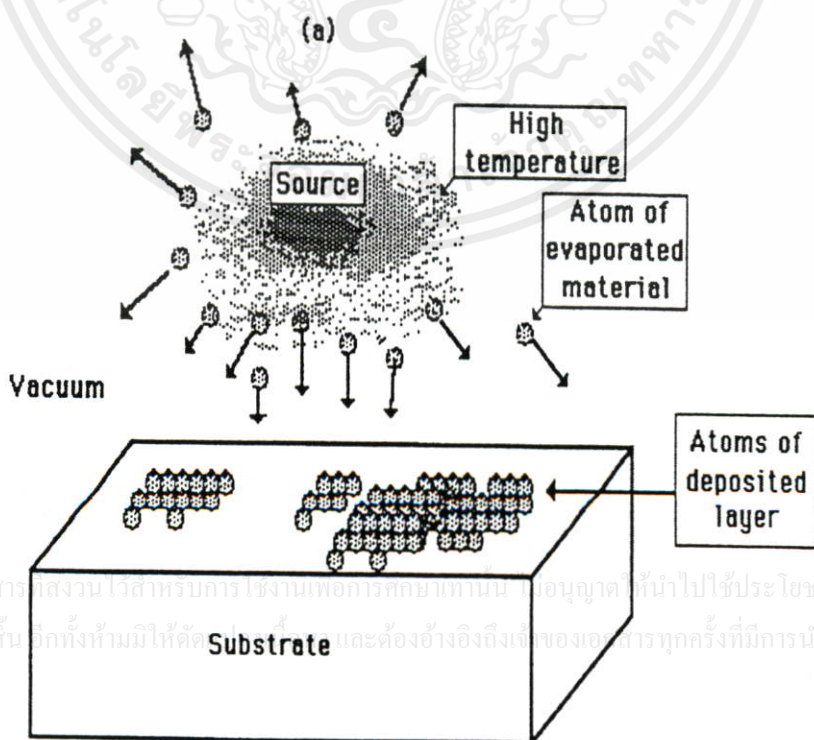
แต่ในกรณีที่ตัวเป้าเป็นฉนวนไฟฟ้า การเกิดดิสชาร์จของเป้าจะไม่เกิดขึ้นเนื่องจากจะเกิดประจุบวกที่ผิวหน้าของฉนวน ดังนั้นการที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จของเป้าจำเป็นต้องใช้พลังงานความถี่คลื่นวิทยุแทนแรงดันไฟกระแสตรงระบบนี้เรียกว่า “ระบบสปัตเตอร์คลื่นความถี่วิทยุ (RF-sputtering)” โดยแผนภาพอธิบายการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงแสดงได้ในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเพื่อประโยชน์ของสังคมไทย  
 ไม่ควรฉีกขาดหรือทำลาย หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ กรุณาแจ้งขอใช้ล่วงหน้า  
 ไม่ควรฉีกขาดหรือทำลาย หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ กรุณาแจ้งขอใช้ล่วงหน้า

1. เป้าเคลือบสารที่ใช้คือ  $\text{SiO}_2$  มีความบริสุทธิ์ 99.99% ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร หน้า 0.8 เซนติเมตร
2. ความต่างศักย์ตกคร่อมเป้า 2 kv
3. ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรอง 3.5 เซนติเมตร
4. อุณหภูมิฐานรอง น้อยกว่า  $100^\circ\text{C}$
5. อัตราการไหลของก๊าซ  $\text{Ar-O}_2$  10 sccm
6. อัตราส่วนก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซออกซิเจน ( $\text{Ar} : \text{O}_2$ ) 85 : 15
7. ความถี่วิทยุที่ใช้ 13.56 MHz
8. กำลังความถี่คลื่นวิทยุ 150 W
9. ความดันขณะใช้งาน 8-10 Pa
10. Presputtering time 15-20 min.

ซึ่งอัตราการเกิดของซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ได้จากการสร้างด้วยเจ็อนไนมีค่าประมาณ  $1,700 \text{ \AA/hr}$ .

รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง [12]



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

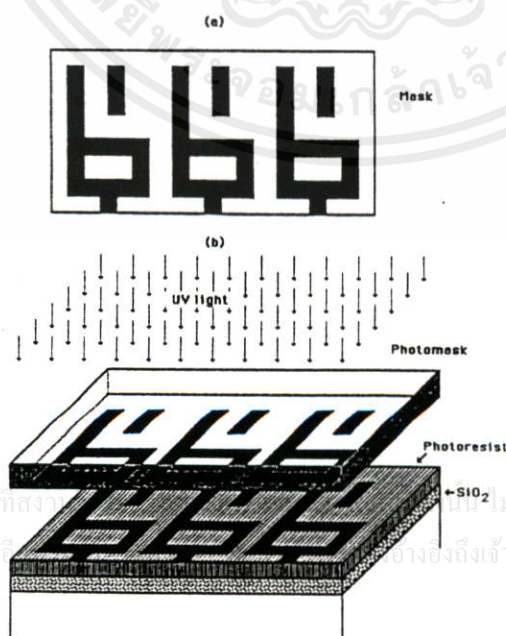
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายลวดลายจากกระจกต้นแบบลงบนผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน โดยการใช้น้ำยาไวแสง (Photo resist) เพื่อทำการเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หรือกำหนดพื้นที่บริเวณที่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น โดยใช้น้ำยาไวแสงเข้าช่วย ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.6 ปกติแล้วน้ำยาไวแสงที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) เช่น OMR, DTFR Way coat เป็นต้น น้ำยาไวแสงชนิดนี้จะมีคุณสมบัติคือเมื่อผ่านการฉายแสงอุลตราไวโอเลตบริเวณส่วนที่โดนแสงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดการแข็งตัว ส่วนบริเวณที่ไม่โดนแสงจะถูกลอกออกได้ในน้ำยา Developer

2. น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) AZ-1350, AZ-1350 J, AZ 4700, AZ 5014 เป็นต้น น้ำยาไวแสงชนิดพวกนี้จะมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับน้ำยาไวแสงชนิดลบ กล่าวคือบริเวณส่วนที่โดนแสงสามารถลอกออกได้ในน้ำยา Developer ส่วนพื้นที่ที่ไม่โดนแสงจะยังคงอยู่เหมือนเดิม

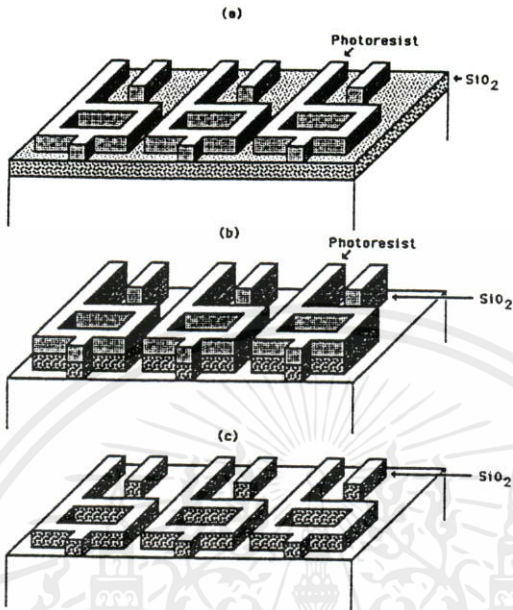
สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ (DTFR way coat) ในการทดลอง

รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอน Photolithography ของน้ำยาไวแสง (a) ชนิดบวก (b) ชนิดลบ [12]

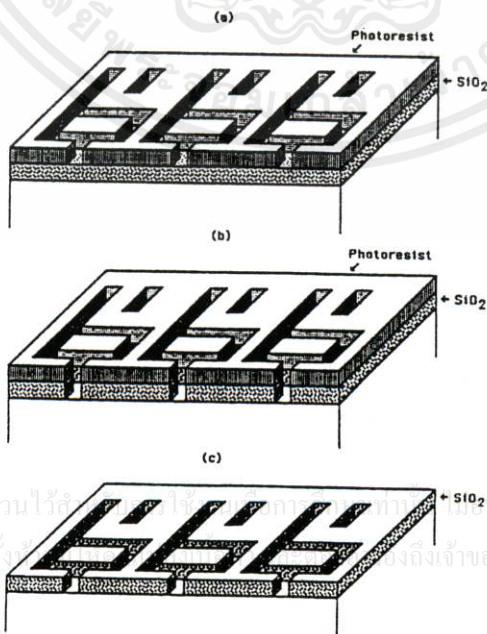


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์สงวนอยู่แก่เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) น้ำยาไวแสงชนิดบวก



(b) น้ำยาไวแสงชนิดลบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการเรียนการสอนเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร

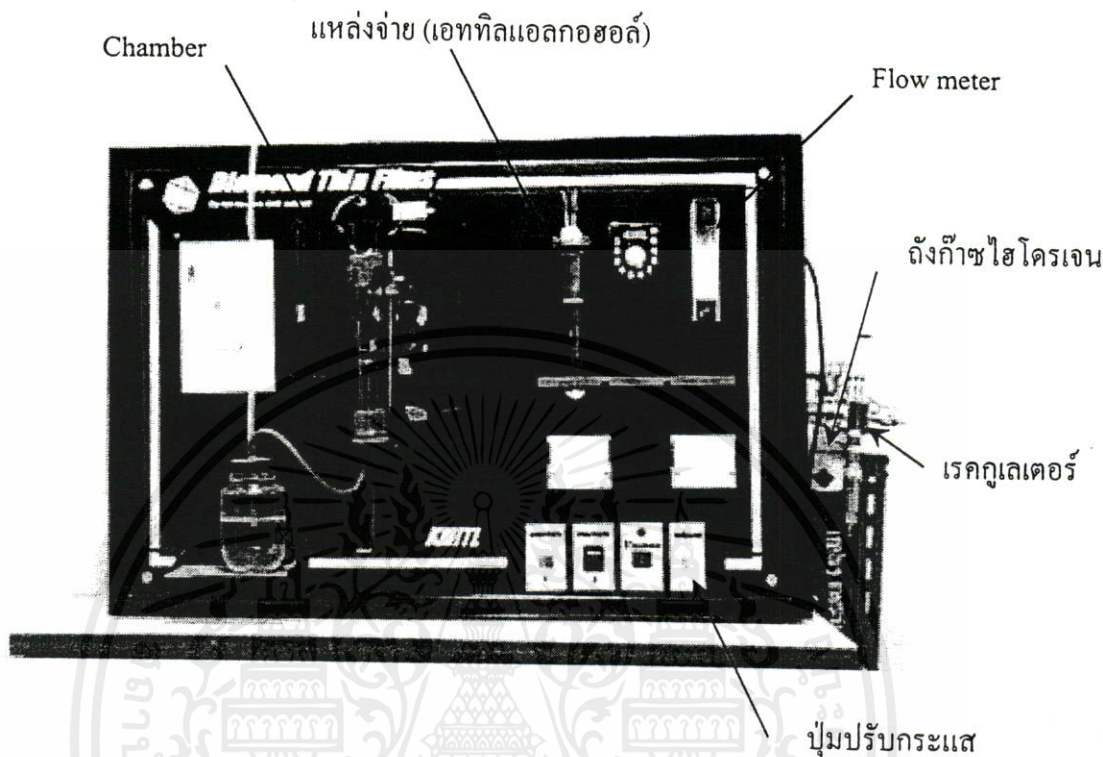
สำหรับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรนั้น จะใช้วิธีการ CVD แบบความร้อนจากระบบที่ประกอบขึ้นเองดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7

จากรูปชุดทดลองสร้างฟิล์มเพชรประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ต่อไปนี้คือ

1. ถังก๊าซไฮโดรเจน
2. เรคกูเลเตอร์ (ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของก๊าซไฮโดรเจน)
3. Flow meter (ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผ่านเข้าไปในแหล่งจ่าย)
4. แหล่งจ่าย (เอททิลแอลกอฮอล์)
5. Chamber ทำจากท่อควอตซ์ทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร
6. ขั้วจ่ายไฟกระแสตรง
7. นาฬิกาจับเวลา
8. สวิตช์พัลลคมระบายความร้อน
9. สวิตช์ Power
10. ปุ่มปรับกระแส
11. DC-Voltmeter
12. DC-Ampmeter
13. แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 3 ชุค
14. ขวดใส่น้ำสำหรับเช็คก๊าซไฮโดรเจนที่ไหลออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลองที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร



ซึ่งกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรสามารถพิจารณาได้ง่าย ๆ จากแผนภาพในรูปที่ 4.8 โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบวาล์ว 1 ให้อยู่ตำแหน่งเปิดออก และปั๊มปรับกระแสให้อยู่ตำแหน่งซ้ายสุด
2. เปิดถังก๊าซไฮโดรเจนปรับเรกกูเลเตอร์ที่ถังก๊าซเพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนให้มีค่า 200 ml/min จับเวลา 15 นาที
3. ปรับวาล์ว 1 เพื่อแบ่งก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนไหลผ่าน Flow meter พร้อมกับปรับวาล์ว 2 ของ Flow meter ให้มีอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 10 ml/min
4. ปรับวาล์ว 1 ให้ได้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเหลือ 70 ml/min พร้อมทั้งปรับวาล์ว 2 เพื่อให้ได้อัตราการไหลของก๊าซที่ผ่าน Flow meter เป็น 10 ml/min คงที่ จับเวลาอีก 15 นาที
5. เปิดวาล์ว 3 เพื่อตรวจสอบระบบว่าเป็นก๊าซไฮโดรเจน โดยจุดไฟเผาก๊าซในหลอด จากนั้นปิดวาล์ว 3 ตามลำดับ
6. เปิดสวิทช์ Power และเปิดสวิทช์พัฒนาความร้อน

7. ค่อย ๆ เพิ่มการจ่ายกระแสอย่างช้า ๆ โดยการหมุนปุ่มปรับกระแสไปทางขวา ขณะนี้กระแสไฟจะถูกจ่ายให้กับไส้หลอดทั้งสแตน ทำการจ่ายกระแสไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้อุณหภูมิที่ไส้หลอดตามต้องการ (ประมาณ 2,000 °C)
8. ปรับระยะห่างระหว่างไส้หลอดทั้งสแตนกับฐานรองซิลิกอนให้ได้ระยะที่เหมาะสม
9. สร้างฟิล์มเพชรตามเวลาที่ต้องการ
10. เมื่อครบเวลาสร้างฟิล์มเพชรที่กำหนดแล้วค่อยๆลดการจ่ายกระแส โดยปรับปุ่มจ่ายกระแสไปทางซ้ายมืออย่างช้า ๆ พร้อมทั้งปิดถังก๊าซไฮโดรเจนปิดสวิตช์ Power
11. รอจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนที่ค้างอยู่ในระบบไหลออกหมด โดยสังเกตจากฟองน้ำในขวดรูปชมพู่
12. เปิดวาล์ว 2 รอจนกระทั่งระบบเย็น ปิดสวิตช์พัสดุเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร นำชิ้นงานที่ได้ไปตรวจสอบต่อไป

#### 4.6 การทดลอง

##### 4.6.1 ศึกษาถึงผลของกระบวนการเตรียมพื้นผิวที่มีต่อการเกิดฟิล์มเพชร

การทดลองนี้เป็นการหาค่าความหนาแน่นการนิวเคลียชันของเพชรที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์มเพชรให้เกิดเป็นลวดลายตามกำหนด ค่าความหนาแน่นการนิวเคลียชันนี้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะผิวหน้าของฐานรอง ซึ่งการทดลองนี้จะทำการสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยเงื่อนไขต่างกัันดังนี้

1. แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยคริมเพชรขนาด 0.25  $\mu\text{m}$
2. แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยคริมเพชรขนาด 1  $\mu\text{m}$
3. แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยคริมเพชรขนาด 5  $\mu\text{m}$
4. แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการอูตราโซนิกในผงเพชรขนาด 0.05  $\mu\text{m}$
5. แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการอูตราโซนิกในผงเพชรขนาด 0.5  $\mu\text{m}$

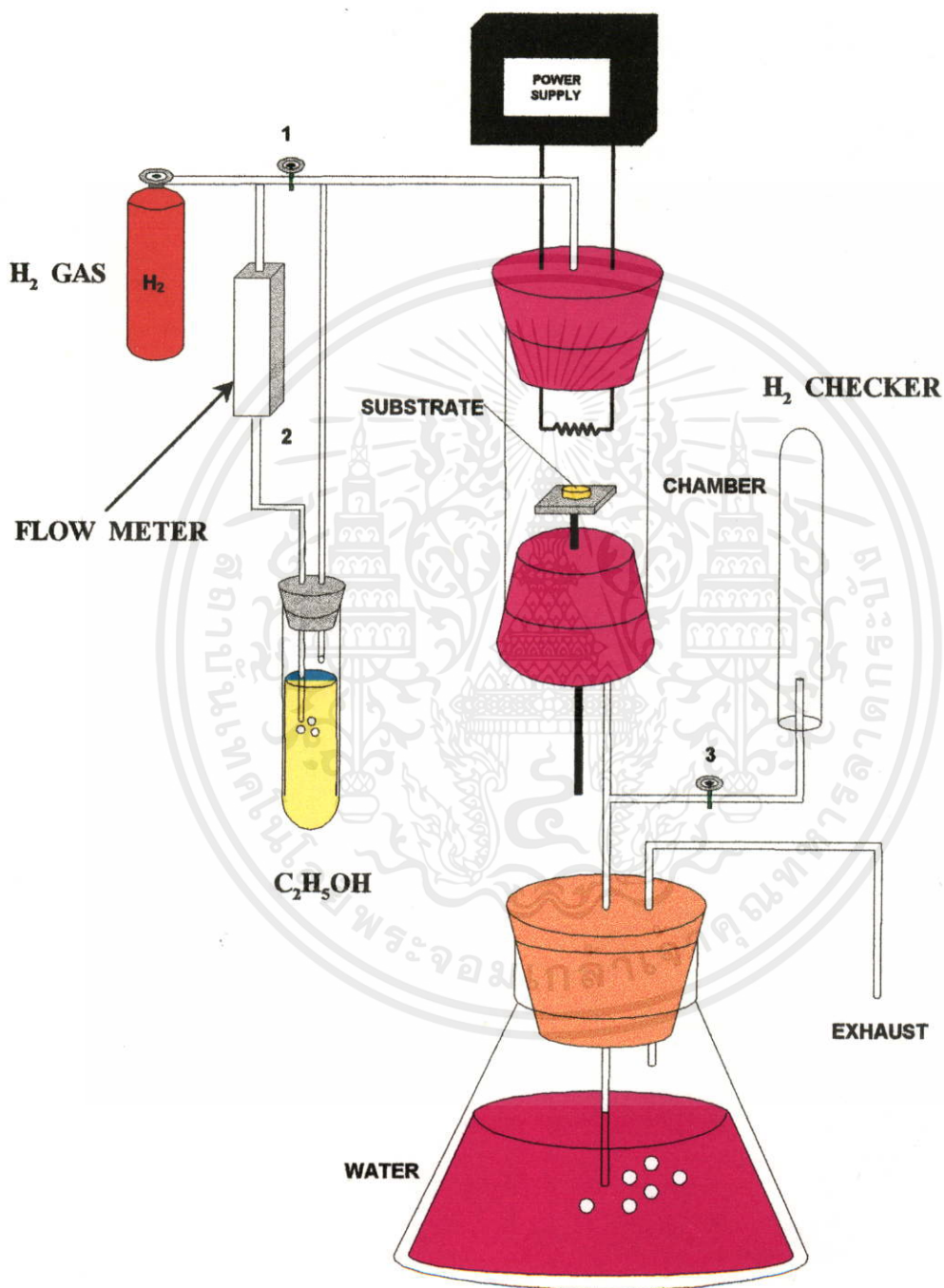
6. แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการขัดมันเป็นกระจกเงา

7. แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

โดยเวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรจะแปรค่าตั้งแต่ 15 นาที, 30 นาที, 45 นาที, 60 นาที,

75 นาที และ 90 นาที

รูปที่ 4.8 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรให้เกิดตามลวดลายที่กำหนด

ในการทดลองนี้จะใช้ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกันบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น
2. ใช้ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงาเป็นบริเวณที่ไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชร

ซึ่งทั้งสองวิธีดังกล่าวมีหลักการอย่างเดียวกันคือ สร้างความแตกต่างระหว่างพื้นผิวฐานรอง โดยพื้นที่ที่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรจะมีการเตรียมพื้นผิว ส่วนพื้นที่ที่ไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรจะมีลักษณะพื้นผิวเรียบ ซึ่งลักษณะพื้นผิวฐานรองที่แตกต่างกันจะมีผลต่อการนิวเคลียสของเพชรที่ต่างกันด้วย สำหรับขั้นตอนของวิธีดังกล่าวมีดังนี้

##### 4.6.2.1 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายโดยเทคนิคสร้างหน้ากากป้องกันจากชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

1. นำแผ่นซิลิกอนระนาบ {100} มาทำความสะอาดพื้นผิวเริ่มต้นด้วยกระบวนการตามหัวข้อ 4.1.1
2. ทำการเตรียมพื้นผิวฐานรอง โดยการขัดด้วยครีมเพชรหรืออุลตราโซนิคในผงเพชรด้วยกระบวนการตามหัวข้อ 4.1.2 หรือ 4.1.3
3. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ปกคลุมผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนโดยแปรค่าความหนาตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการ	ความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ (Å)										
	500	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
Thermal oxidation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sputtering	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เคลือบนำยาไวแสงชนิดลบ (Way coat) ลงบนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการเคลือบนำยาไวแสงชนิดลบ (Way coat)

ลำดับที่	กระบวนการ	อุณหภูมิ	เวลา	หมายเหตุ
1.	อบแผ่นซิลิกอน	100°C	1 ชั่วโมง	ไล่ความชื้นของแผ่นซิลิกอน
2.	เคลือบนำยาไวแสงบนชั้นซิลิกอน-ไดออกไซด์ด้วยเครื่อง Spinning ขนาด 5,000 รอบ/นาที	-	20 วินาที	-
3.	อบแผ่นซิลิกอน	90-100°C	30 นาที	ให้นำยาไวแสงแห้ง

5. สร้างลวดลายจากกระจกมาสก์ลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ลำดับที่	กระบวนการ	อุณหภูมิ	เวลา	หมายเหตุ
1.	ฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตผ่านกระจกมาสก์ด้วยเครื่อง Mask aligner บนนำยาไวแสง	-	10 วินาที	แหล่งกำเนิดแสง หลอดเมอร์คิวรี $\lambda = 5000 \text{ \AA}$
2.	Developer ใน Xylene แก้วที่ 1	-	1.30 วินาที	-
	Developer ใน Xylene แก้วที่ 2	-	1.30 วินาที	-
	จุ่มใน Isopropyl แก้วที่ 1	-	30 วินาที	-
	จุ่มใน Isopropyl แก้วที่ 2	-	30 วินาที	-
	จุ่มในน้ำ DI	-	30 วินาที	-
3.	เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน	-	-	-
4.	อบแผ่นซิลิกอน	90-100°C	20 นาที	ให้นำยาไวแสงแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แม้ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารฉบับนี้

6. ลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ในสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีส่วนผสมของ  $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}$  โดยสารละลายบัฟเฟอร์จะมีอัตราการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 Å /นาทิต
7. เป่าแผ่นซิลิกอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
8. ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่ด้วยกระบวนการดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงขั้นตอนการลอกน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way coat)

ลำดับที่	กระบวนการ	อุณหภูมิ	เวลา
1.	แช่แผ่นซิลิกอน ในกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) แก้วที่ 1	60-70°C	5 นาที
2.	แช่แผ่นซิลิกอน ในกรดซัลฟูริก แก้วที่ 2	60-70°C	5 นาที
3.	แช่ในน้ำ DI แก้วที่ 1	60-70°C	5 นาที
4.	ต้มในน้ำ DI แก้วที่ 2	60-70°C	5 นาที
5.	เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน	-	-

9. นำแผ่นซิลิกอนที่ได้ไปสร้างฟิล์มเพชรตามกระบวนการในหัวข้อ 4.5
10. นำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการสร้างฟิล์มเพชรเสร็จแล้วมาลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่เป็นหน้ากากออกในสารละลายบัฟเฟอร์
11. ล้างสารละลายบัฟเฟอร์ในน้ำ DI
12. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เป็นอันเสร็จกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรให้เกิดตามพื้นที่ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์และตรวจสอบต่อไป ซึ่งแผนภาพอธิบายกระบวนการที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายโดยเทคนิคสร้างหน้ากากป้องกันจากชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

1. แผ่นซิลิกอนเริ่มต้น



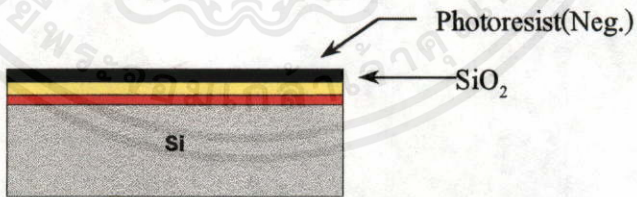
2. เตรียมพื้นผิวฐานรอง



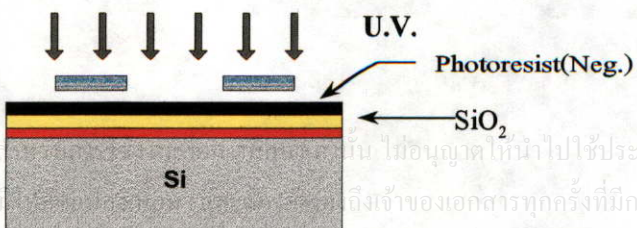
3. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์



4. เคลือบน้ำยาไวแสง



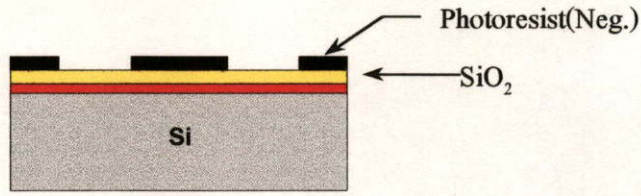
5. โฟโตลิโธกราฟี



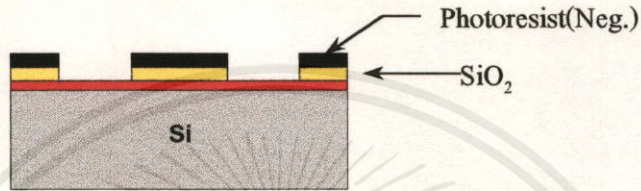
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม

เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. Developer



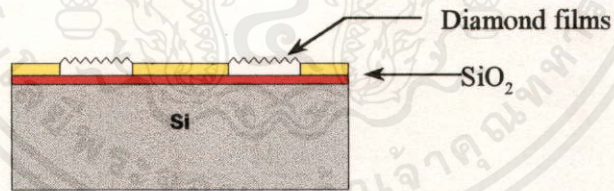
## 7. เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์



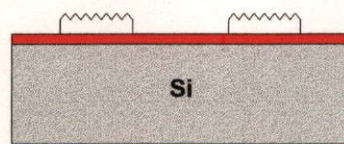
## 8. ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออก



## 9. สร้างฟิล์มเพชร



## 10. ลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหลือออกด้วยสารละลายบัฟเฟอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีถ่านนำไปใช้

#### 4.6.2.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายโดยเทคนิคใช้ผิวกระจกของแผ่นซิลิกอน ป้องกันการเกิดเพชร

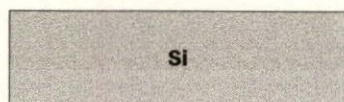
1. นำแผ่นซิลิกอนระนาบ {100} มาทำความสะอาดพื้นผิวเริ่มต้นด้วยกระบวนการตามหัวข้อ 4.1.1
2. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ปกคลุมผิวหน้าซิลิกอนให้มีความหนาประมาณ 15,000 Å
3. เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Way coat) บนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดังข้อ 4 ในหัวข้อ 4.6.2.1
4. สร้างลวดลายจากกระจกมาสก์ลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีตามเงื่อนไขเดียวกับข้อ 5 ในหัวข้อ 4.6.2.1
5. กัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ในสารละลายบัฟเฟอร์ จนกระทั่งซิลิกอนไดออกไซด์ถูกลอกออกจนหมด
6. เป่าแผ่นซิลิกอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
7. นำแผ่นซิลิกอนไปอุลตราโซนิกในสารละลายของเอทิลแอลกอฮอล์กับผงเพชรจนครบเวลาที่ต้องการ
8. อุลตราโซนิกแผ่นซิลิกอนในน้ำ DI เพื่อล้างผงเพชรออก
9. ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออก
10. ลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหลือออกในสารละลายบัฟเฟอร์
11. ล้างแผ่นซิลิกอนในน้ำ DI
12. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
13. นำแผ่นซิลิกอนไปสร้างฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการในหัวข้อ 4.5

เมื่อครบเวลาสร้างที่ต้องการแล้ว นำชิ้นงานมาตรวจสอบและวิเคราะห์ต่อไป รายละเอียดขั้นตอนการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายด้วยวิธีนี้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลาย โดยเทคนิคใช้ผิวกระจก  
ของแผ่นซิลิกอนป้องกันการเกิดเพชร

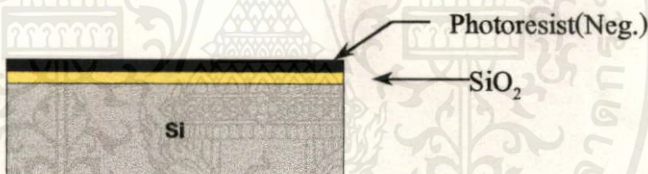
1. แผ่นซิลิกอนเริ่มต้น



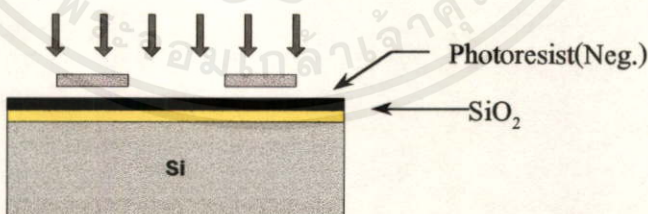
2. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์



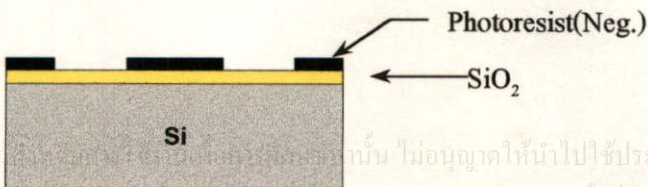
3. เคลือบน้ำยาไวแสง



4. โฟโตลิโธกราฟี

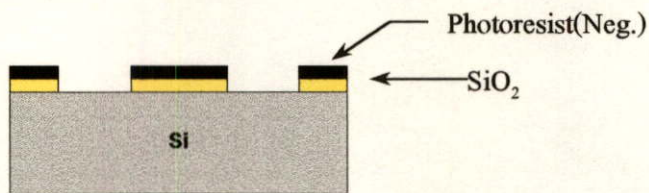


5. Developer

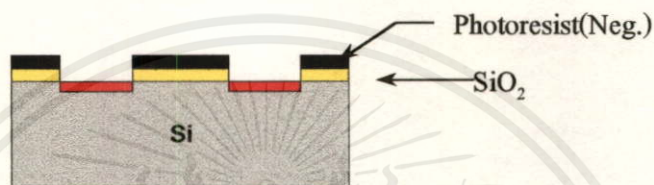


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6. เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์



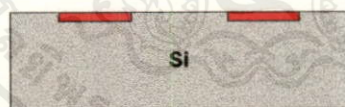
### 7. อุลตราโซนิกในผงเพชร



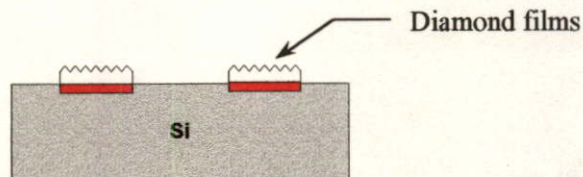
### 8. ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออก



### 9. ลอกซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหลือในสารละลายบัฟเฟอร์



### 10. สร้างฟิล์มเพชร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 5.1 ลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยเทคนิคต่าง ๆ

หัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ถึงลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการเตรียมพื้นผิวด้วยเทคนิคต่าง ๆ กัน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 เพื่อใช้เป็นข้อมูลต่อไปในการศึกษาถึงการเกิดฟิล์มเพชร

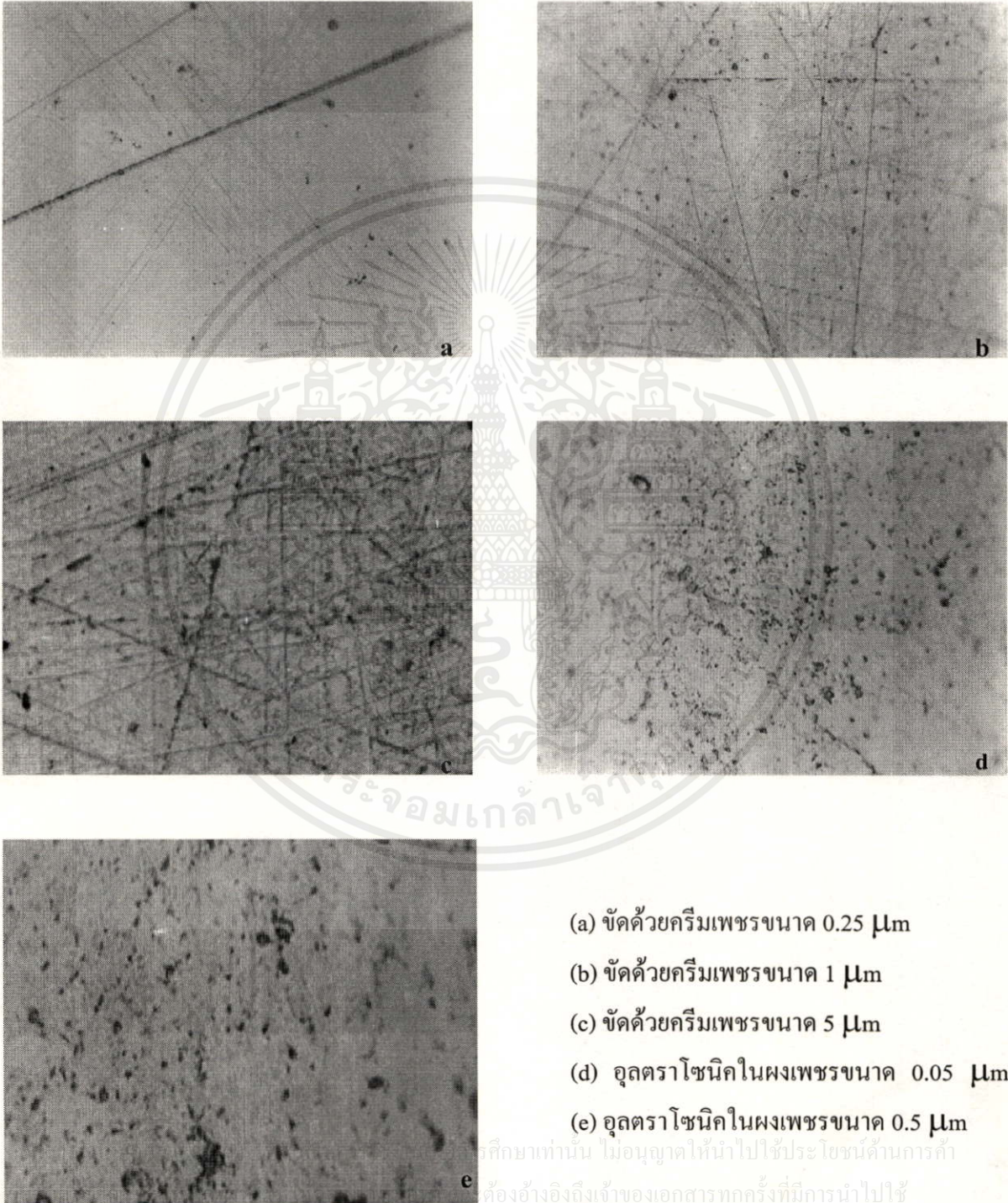
- การเตรียมพื้นผิวโดยการขัดด้วยครีมเพชร

ครีมเพชรที่ใช้ในการทดลองมี 3 ขนาด คือ  $0.25\ \mu\text{m}$ ,  $1\ \mu\text{m}$  หรือ  $5\ \mu\text{m}$  เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าแผ่นซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์ และ SEM แล้วพบว่าผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนจะมีรอยขีดเล็กๆ กระจายทั่วแผ่น โดยรอยขีดที่เกิดจากการขัดด้วยครีมเพชรที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะมีขนาดใหญ่กว่ารอยขีดที่เกิดจากการใช้ครีมเพชรที่มีขนาดอนุภาคเล็กลักษณะผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ได้จากการขัดด้วยครีมเพชรที่มีขนาดอนุภาคต่างกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1a - 5.1c

- การเตรียมพื้นผิวโดยการอุลตราโซนิคในผงเพชร

ในการทดลองนี้ผงเพชรที่ใช้อุลตราโซนิคจะมีอยู่สองขนาดคือ  $0.05\ \mu\text{m}$  และ  $0.5\ \mu\text{m}$  เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่เตรียมพื้นผิวด้วยวิธีนี้ พบว่าผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนจะมีลักษณะเป็นหลุมเล็กๆ อันเกิดจากการกระแทกด้วยผงเพชรกระจายอยู่ทั่วแผ่น สำหรับลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการอุลตราโซนิคในผงเพชรสามารถแสดงได้ในรูป 5.1d - 5.1e

รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 500 เท่า)



ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองที่มีต่อการเกิดฟิล์มเพชร

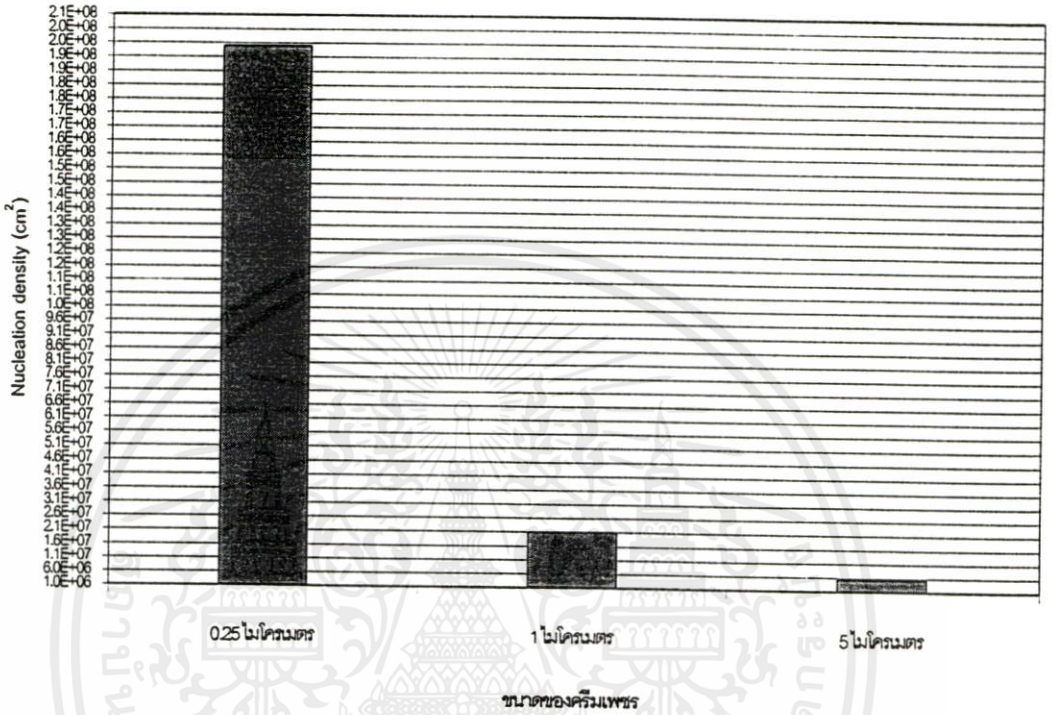
จากการทดลองสร้างฟิล์มเพชรบนพื้นผิวต่าง ๆ กัน 7 ชนิดคือ

1. ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดเป็นกระจกเงา
2. ผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์
3. ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25 \mu\text{m}$
4. ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $1 \mu\text{m}$
5. ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $5 \mu\text{m}$
6. ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการอุตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05 \mu\text{m}$
7. ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการอุตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5 \mu\text{m}$

โดยเวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรจะแปรค่าตั้งแต่ 15 นาที, 30 นาที, 45 นาที, 60 นาที, 75 นาที และ 90 นาที ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรจะเกิดขึ้นช้ามากบนพื้นผิวที่มีความเรียบ (ในที่นี้คือ ซิลิกอนไดออกไซด์และผิวกระจกของแผ่นซิลิกอน) เมื่อเทียบกับพื้นผิวที่มีรอยขีดหรือกระแทก (จากการขัดด้วยครีมเพชร หรืออุตราโซนิกในผงเพชร) และหากพิจารณาเฉพาะกรณีพื้นผิวผ่านการขัดด้วยครีมเพชร จะพบอีกว่าค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรจะสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคของครีมเพชรที่ใช้ กล่าวคือ ความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรจะมีค่าสูงเมื่ออนุภาคของครีมเพชรที่ใช้มีขนาดเล็ก ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่เวลาสร้างเท่า ๆ กัน แผ่นซิลิกอนที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25 \mu\text{m}$  จะมีการนิวเคลียสของเพชรที่เกิดขึ้นได้เร็วกว่าแผ่นซิลิกอนที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $1 \mu\text{m}$  และ  $5 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรกับขนาดอนุภาคของครีมเพชรที่ใช้ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.2

สำหรับฐานรองที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยการอุตราโซนิกในผงเพชร จะพบว่าขนาดของผงเพชรที่ใช้มีผลต่อการเกิดการนิวเคลียสของเพชรเช่นกัน กล่าวคือฐานรองซิลิกอนที่อุตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5 \mu\text{m}$  จะมีค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสสูงกว่าฐานรองซิลิกอนที่อุตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05 \mu\text{m}$  ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของผงเพชรกับขนาดของผงเพชรที่ใช้ในการเตรียมพื้นผิวแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรกับขนาดอนุภาคของครีมเพชรที่ใช้ในการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัด

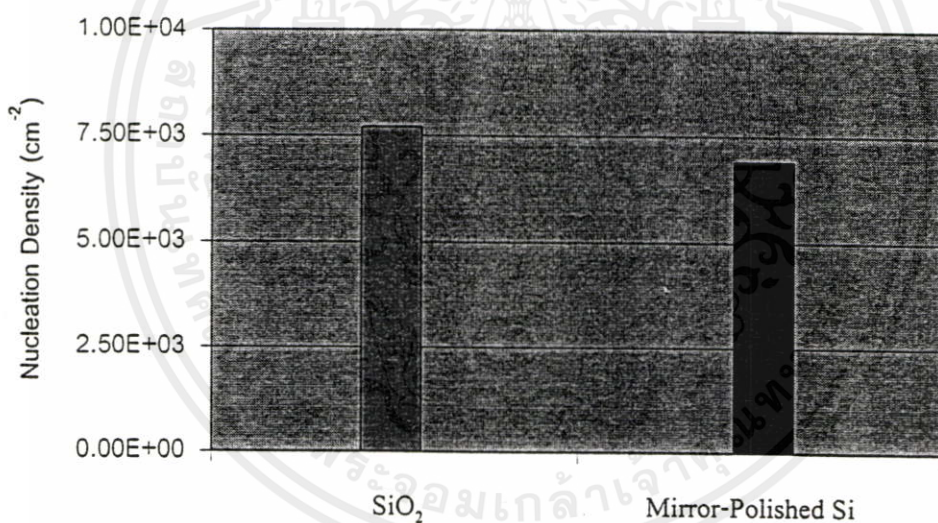


รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรกับขนาดอนุภาคของผงเพชรที่ใช้ในการเตรียมพื้นผิวด้วยการอุลตราโซนิก



ส่วนพื้นผิวของฐานรองอีกสองชนิดที่เหลือคือ ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการขัดมันเป็นกระจกและผิวหน้าของซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างบนแผ่นซิลิกอนพบว่าการเกิดนิวเคลียสของเพชรจะมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว ๆ กระจายห่าง ๆ กัน มีบางผลึกที่เกาะตัวเป็นฟิล์มบาง แต่เป็นขนาดพื้นที่ที่เล็กๆ โดยแต่ละผลึกจะมีขนาดใหญ่กว่าผลึกที่เกิดบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมฐานรองสำหรับความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรบนพื้นผิวทั้งสองชนิดนี้มีค่าน้อยมาก ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.4

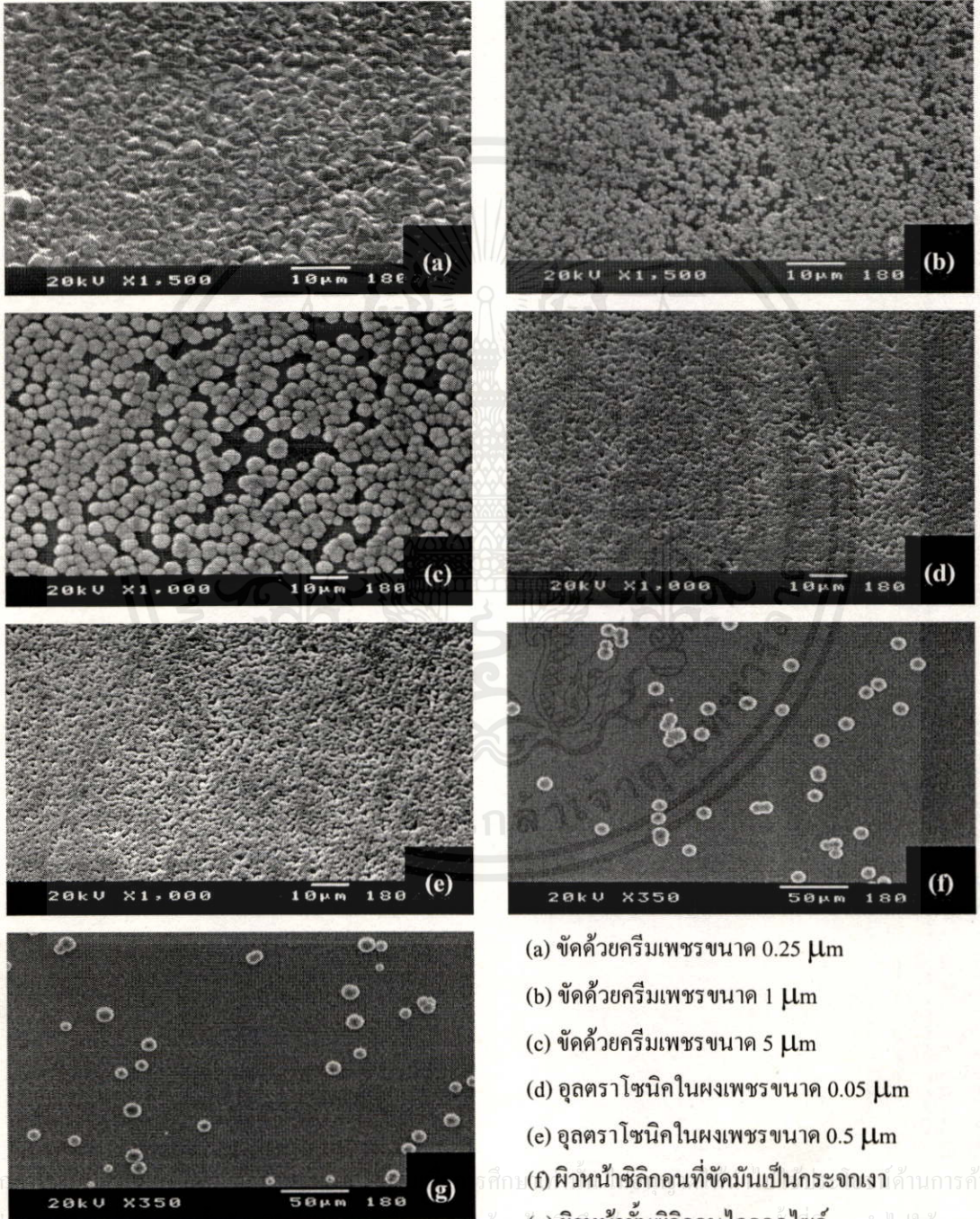
รูปที่ 5.4 แสดงค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรบนพื้นผิวที่มีลักษณะเรียบ



จากการทดลองสร้างฟิล์มเพชรบนพื้นผิวต่างกันทั้ง 7 ชนิด โดยแปรค่าเวลาต่างๆ กัน สามารถแสดงผลได้เป็นลำดับดังรูปที่ 5.5-5.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที (อุณหภูมิฐานรองประมาณ 950°C อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนในเอททิลแอลกอฮอล์ 10 ml/min)



(a) จัดด้วยคริมเพชรขนาด 0.25  $\mu\text{m}$

(b) จัดด้วยคริมเพชรขนาด 1  $\mu\text{m}$

(c) จัดด้วยคริมเพชรขนาด 5  $\mu\text{m}$

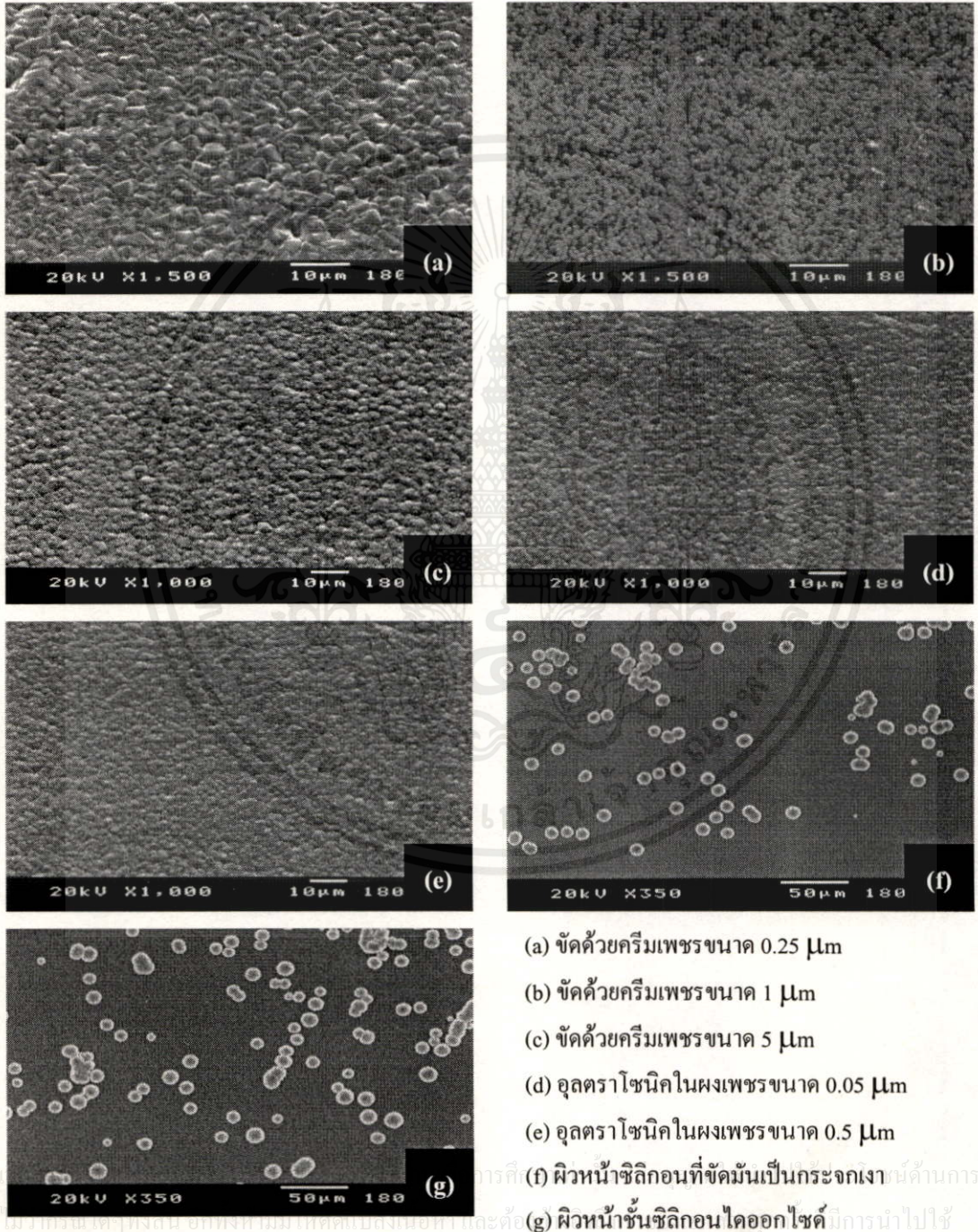
(d) อุตราโซนิกในผงเพชรขนาด 0.05  $\mu\text{m}$

(e) อุตราโซนิกในผงเพชรขนาด 0.5  $\mu\text{m}$

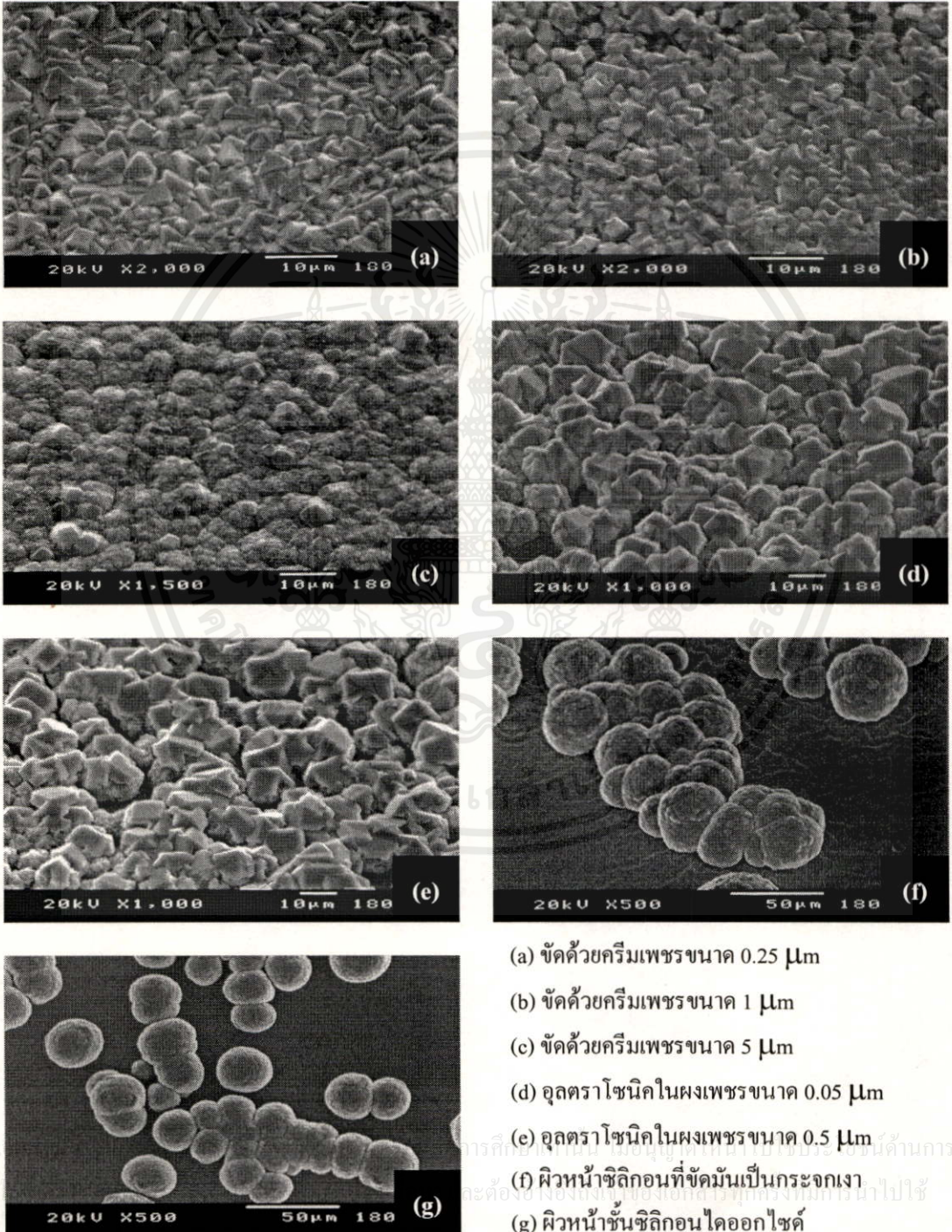
(f) ผิวหน้าซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา ด้านการค้า

(g) ผิวหน้าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ด้านการนำไฟฟ้า

รูปที่ 5.6 แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กันเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที (อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $950^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนในเอทิลแอลกอฮอล์  $10\text{ ml / min}$ )

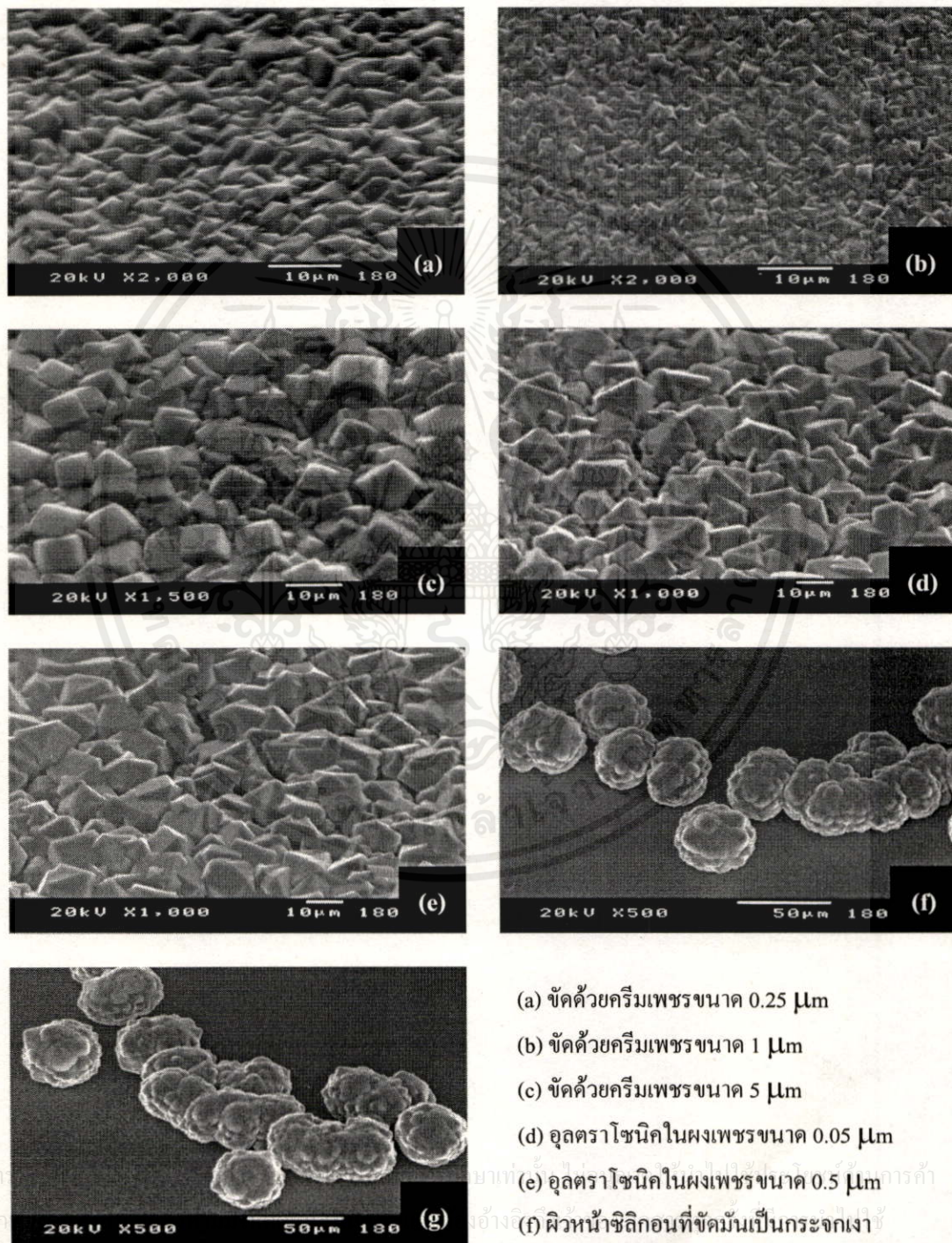


รูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กันเมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที (อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $950^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนในเอทิลแอลกอฮอล์  $10\text{ ml / min}$ )



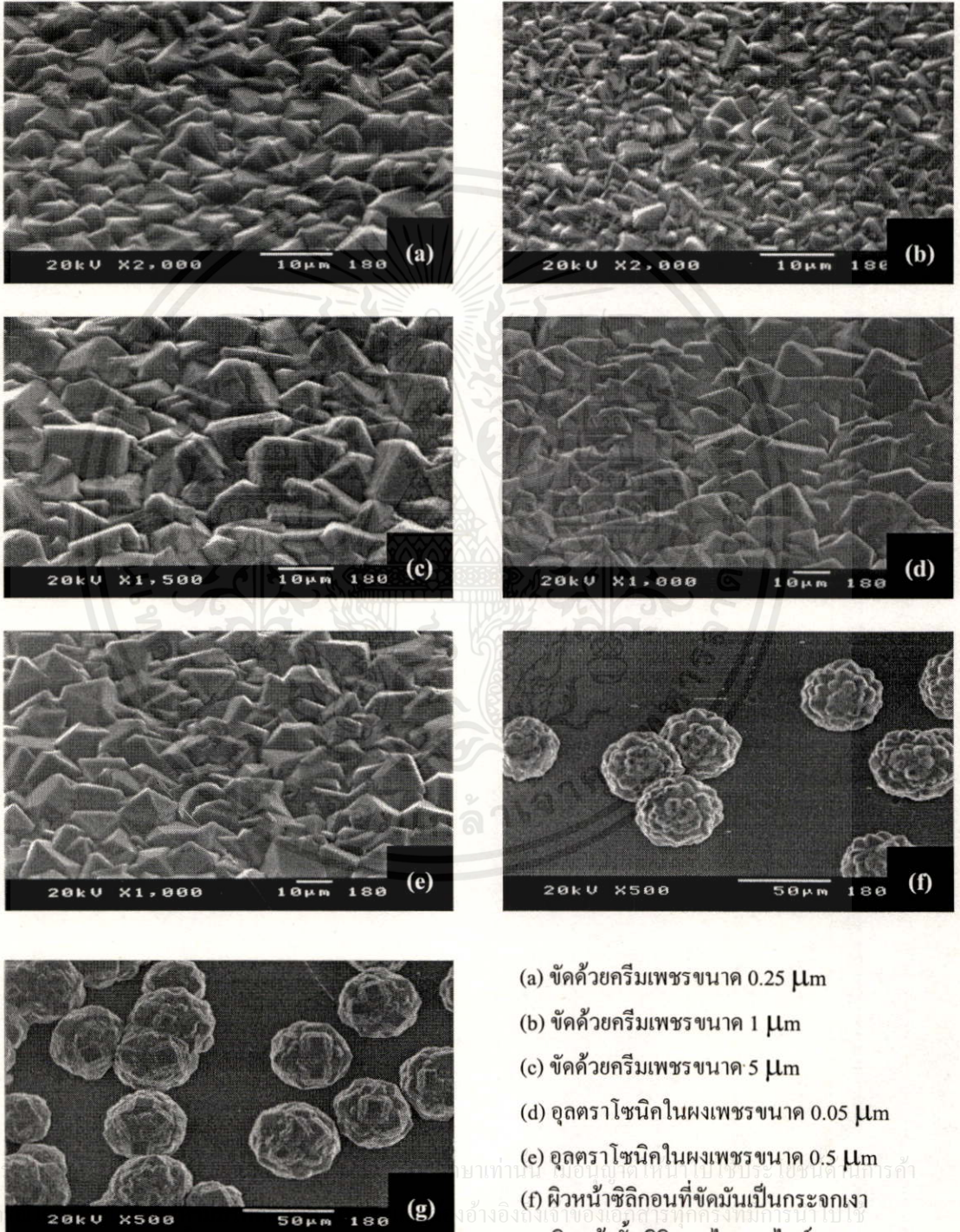
- (a) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25\ \mu\text{m}$   
 (b) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $1\ \mu\text{m}$   
 (c) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $5\ \mu\text{m}$   
 (d) อุตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05\ \mu\text{m}$   
 (e) อุตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5\ \mu\text{m}$   
 (f) ผิวหน้าซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา  
 (g) ผิวหน้าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

รูปที่ 5.8 แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กันเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที (อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $950^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนในเอททิลแอลกอฮอล์  $10\text{ ml / min}$ )



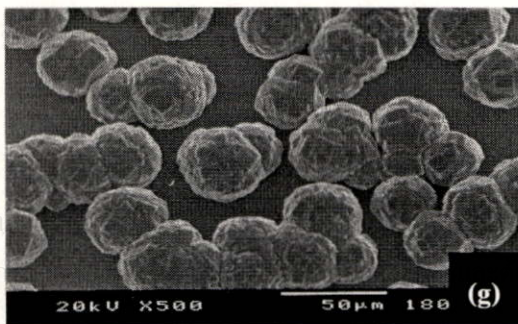
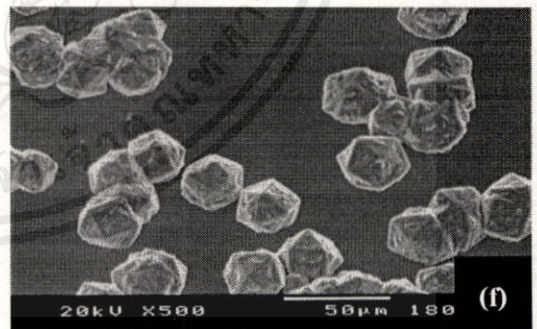
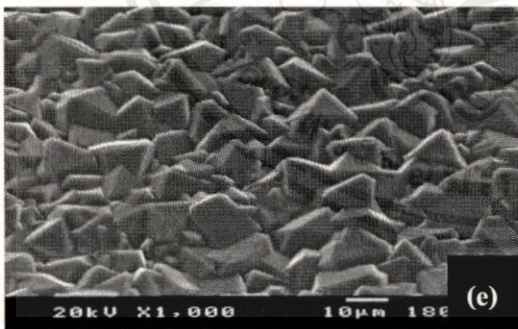
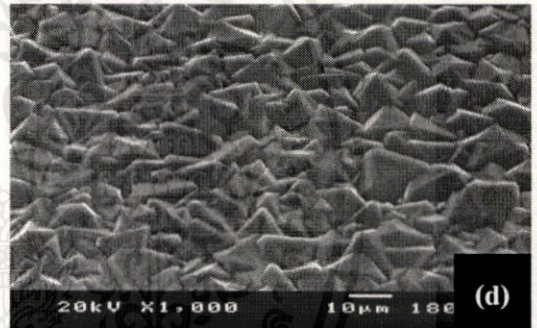
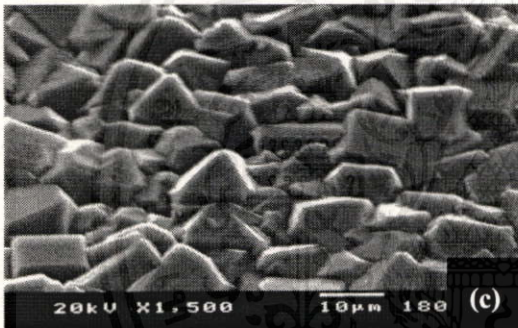
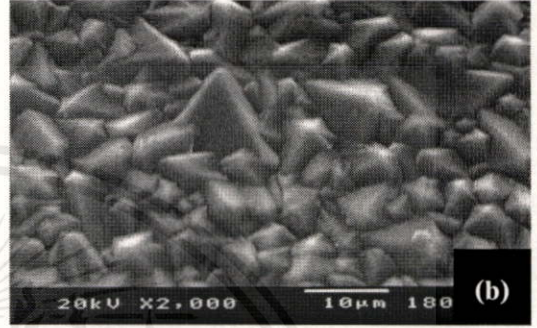
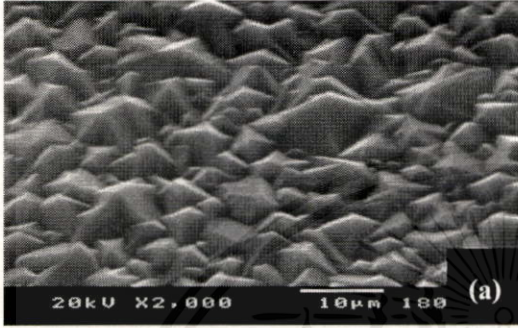
- (a) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25\ \mu\text{m}$   
 (b) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $1\ \mu\text{m}$   
 (c) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $5\ \mu\text{m}$   
 (d) อุลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05\ \mu\text{m}$   
 (e) อุลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5\ \mu\text{m}$   
 (f) ผิวหน้าซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา  
 (g) ผิวหน้าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

รูปที่ 5.9 แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน เมื่อเวลาผ่านไป 75 นาที (อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $950^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนในเอททิลแอลกอฮอล์  $10\text{ ml / min}$ )



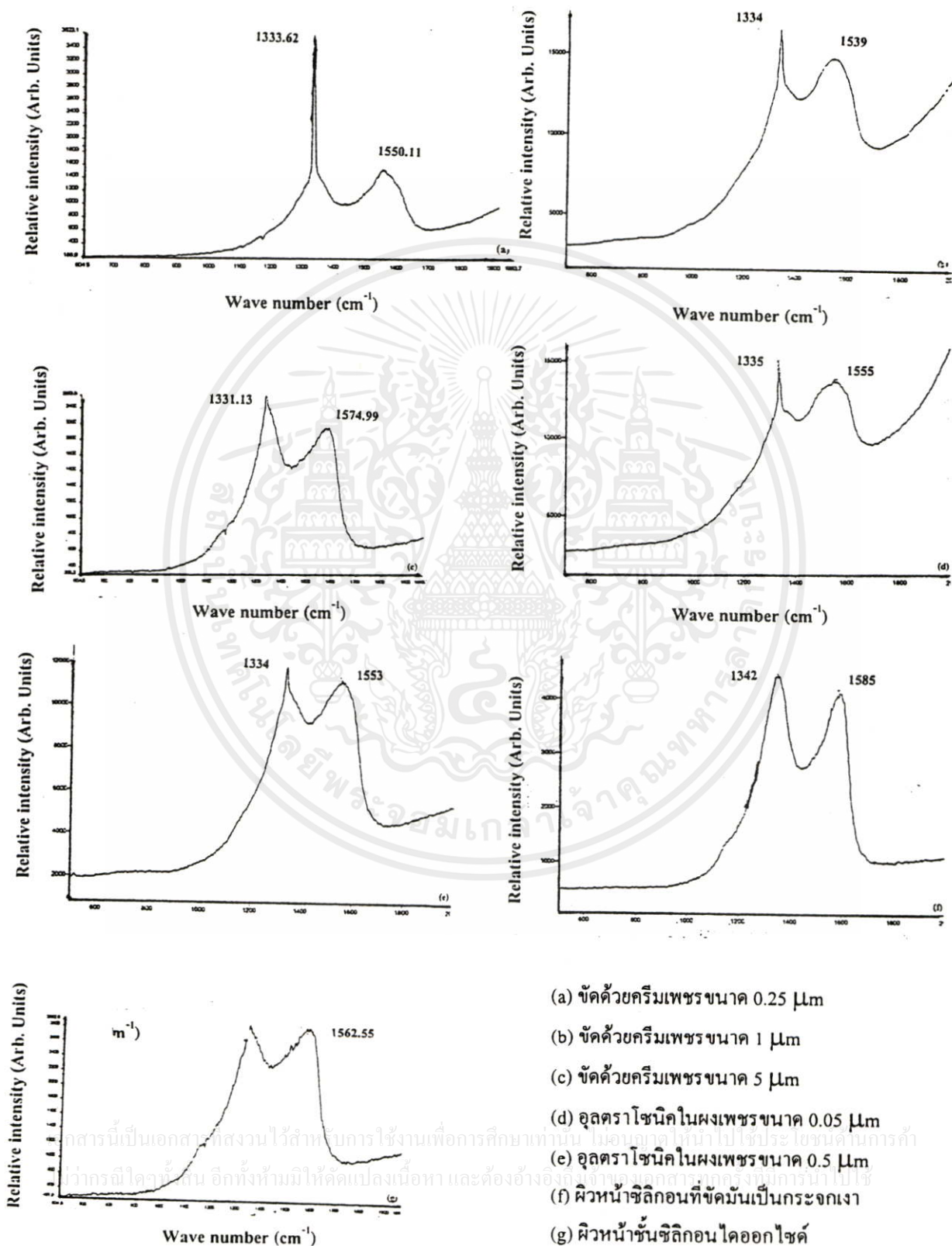
- (a) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25\ \mu\text{m}$   
 (b) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $1\ \mu\text{m}$   
 (c) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $5\ \mu\text{m}$   
 (d) อุตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05\ \mu\text{m}$   
 (e) อุตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5\ \mu\text{m}$   
 (f) ผิวหน้าซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา  
 (g) ผิวหน้าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

รูปที่ 5.10 แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการเกิดเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กันเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที (อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $950^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนในเอททิลแอลกอฮอล์  $10\text{ ml / min}$ )



- (a) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25\ \mu\text{m}$
- (b) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $1\ \mu\text{m}$
- (c) ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $5\ \mu\text{m}$
- (d) อุดตราไซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05\ \mu\text{m}$
- (e) อุดตราไซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5\ \mu\text{m}$
- (f) ผิวหน้าซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา
- (g) ผิวหน้าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

รูปที่ 5.11 แสดงผลจากการวัดด้วย Raman spectroscopy ของชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน (ที่เวลาในการสร้างฟิล์มเพชร 15 นาที)



(a) ชัดด้วยครีมนเพชรขนาด  $0.25 \mu\text{m}$

(b) ชัดด้วยครีมนเพชรขนาด  $1 \mu\text{m}$

(c) ชัดด้วยครีมนเพชรขนาด  $5 \mu\text{m}$

(d) อุลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05 \mu\text{m}$

(e) อุลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5 \mu\text{m}$

(f) ผิวหน้าซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา

(g) ผิวหน้าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

เมื่อพิจารณาถึงขั้นตอนการเกิดฟิล์มเพชรบนพื้นผิวที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีต่าง ๆ เทียบกับ เวลาที่ใช้สร้าง สรุปได้ว่าฟิล์มเพชรเกิดบนผิวหน้าที่ขัดด้วยคริมเพชรขนาด  $0.25 \mu\text{m}$  อย่างสมบูรณ์ โดยจะใช้เวลาประมาณ 15 นาทีเท่านั้น ซึ่งเป็นเวลาที่น้อยที่สุด (รูปที่ 5.5a) ส่วนผิวหน้าฐานรอง ที่ขัดด้วยคริมเพชรขนาด  $1 \mu\text{m}$  ,อุลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05 \mu\text{m}$  หรือ  $0.5 \mu\text{m}$  จะเริ่มเกิด ฟิล์มเพชรขึ้นมาเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 45 นาที แต่ฟิล์มที่เกิดขึ้นยังไม่มีความสม่ำเสมอ (รูปที่ 5.7b, 5.7d และ 5.7e) จนกระทั่งเวลาผ่านไป 60 นาที ฟิล์มเพชรจะเกิดอย่างสมบูรณ์ (รูปที่ 5.8b, 5.8d และ 5.8e) ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีขัดผิวหน้าฐานรองด้วยคริมเพชรขนาด  $5 \mu\text{m}$  พบว่าต้องใช้ เวลาสร้างประมาณ 60 นาที (รูปที่ 5.8c) จะเริ่มเกิดฟิล์มเพชรขึ้นมาเท่านั้นแต่ฟิล์มที่ได้ยังไม่ดีพอจน กระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 75 นาทีขึ้นไป (รูปที่ 5.9c) จึงจะได้ฟิล์มเพชรที่มีความสม่ำเสมอและ สมบูรณ์

สำหรับผิวหน้าที่มีความเรียบซึ่งในที่นี้มี 2 ชนิดคือ ผิวหน้าของซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา และผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ จากการทดลองสร้างฟิล์มเพชรพบว่าเกิดผลึกเดี่ยว ๆ กระจายบาง ๆ ที่แผ่นฐานรอง (รูปที่ 5.5f และ 5.5g) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปผลึกเดี่ยว ๆ นั้นจะมีขนาด ใหญ่ขึ้นและมีโอกาสที่จะเกาะกับผลึกข้าง ๆ เกาะกันเป็นฟิล์มเพชรขึ้นมาได้ดังรูปที่ 5.10f และ รูป ที่ 5.10g

จากการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นบนฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการเตรียม ด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กันด้วยเทคนิค Raman spectroscopy พบว่าในกรณีสร้างฟิล์มเพชรด้วยเวลาเพียง 15 นาที Raman spectrum ของฟิล์มที่เกิดบนแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยคริมเพชรขนาด  $0.25 \mu\text{m}$  (รูป 5.5a) จะมีค่ายอดสูงสุดที่ตำแหน่ง  $1333.62 \text{ cm}^{-1}$  อย่างชัดเจน ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียง กับ Raman spectrum ของเพชรธรรมชาติ ( $1332 \text{ cm}^{-1}$ ) มาก โดยมีค่ายอดที่ตำแหน่ง  $1550.11 \text{ cm}^{-1}$  เกิดขึ้นด้วย แต่ความสูงของยอดกราฟต่ำมากเมื่อเทียบกับยอดที่ตำแหน่ง  $1333.62 \text{ cm}^{-1}$  จึงเป็น เครื่องแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติเป็นเพชร ซึ่ง Raman spectrum ของชิ้นงานที่แสดง ในรูป 5.5a สามารถแสดงได้ในรูป 5.11 a เมื่อพิจารณา Raman spectrum ของผลึกหรือฟิล์มที่เกิด ขึ้นดังรูป 5.5b-5.5g พบว่าลักษณะของ Raman spectrum ที่ได้จะมีค่ายอดแรกที่ตำแหน่งประมาณ  $1331-1342 \text{ cm}^{-1}$  และยอดที่สองที่ตำแหน่งประมาณ  $1539-1585 \text{ cm}^{-1}$  มีความสูงของกราฟใกล้เคียง กันมาก ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.11b-5.11g ตามลำดับ นั้นหมายความว่าลักษณะของผลึกหรือฟิล์มที่ เกิดขึ้นจะมีปริมาณของคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นเพชรใกล้เคียงกับคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็น กราไฟต์หรืออมอร์ฟัสคาร์บอน ซึ่งเมื่อพิจารณาด้วยภาพถ่าย SEM พบว่าลักษณะของผลึกหรือ ฟิล์มที่เกิดขึ้นจะแสดงระนาบไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับฟิล์มที่มีคุณสมบัติเป็นเพชร (รูป 5.5a) จึงเป็น เครื่องแสดงให้เห็นว่าผลึกหรือฟิล์มของการนิเวศลิเซชันที่เกิดขึ้นก่อนจะเกิดฟิล์มเพชรที่มีคุณสมบัติ

ไม่เป็นเพชรแต่จะมีองค์ประกอบของคาร์บอนในรูปของเพชร และคาร์บอนในรูปอื่น ๆ (กราไฟต์ หรือออร์ไฟสคาร์บอน) ในปริมาณใกล้เคียงกัน

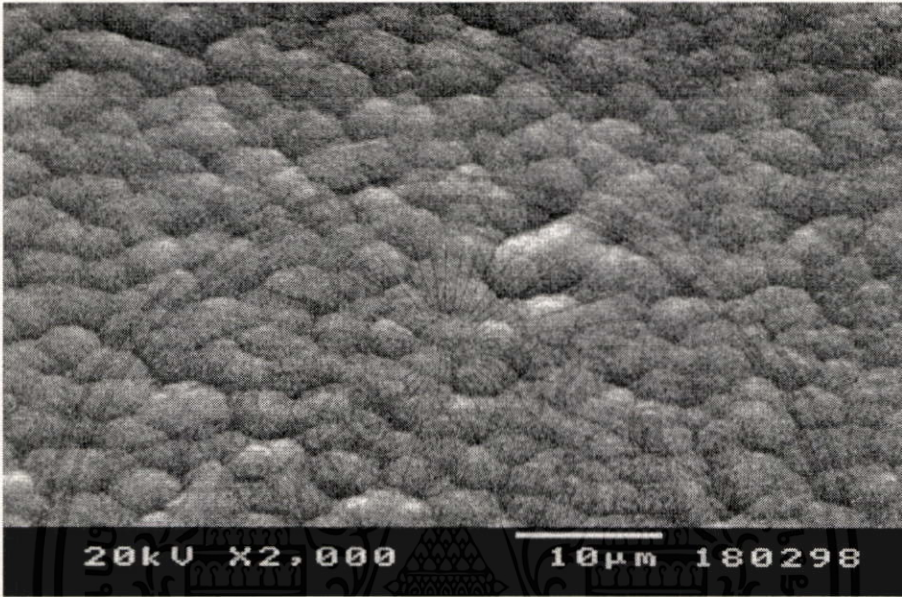
ในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มเวลาในการสร้างฟิล์มเพชรนานขึ้น (30 นาที, 45 นาที, 60 นาที, 75 นาที หรือ 90 นาที) Raman spectrum ที่ได้จากการวัดผลึกหรือฟิล์มที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับกรณีการสร้างที่เวลา 15 นาที คือสำหรับฟิล์มที่แสดงระนาบอย่างเด่นชัด Raman spectrum จะมีค่ายอดสูงสุดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ  $1332\text{ cm}^{-1}$  อย่างชัดเจน แต่หากผลึกหรือฟิล์มที่เกิดขึ้นเป็นของการนิวคลีเอชันที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดฟิล์มเพชร Raman spectrum จะมีค่ายอดที่ตำแหน่งประมาณ  $1332\text{ cm}^{-1}$  และ  $1550\text{-}1580\text{ cm}^{-1}$  มีความสูงของกราฟใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลึกหรือฟิล์มของการนิวคลีเอชันยังไม่มีคุณสมบัติเป็นเพชร

### 5.3 ผลของอุณหภูมิฐานรองที่มีต่อการเกิดฟิล์มเพชร

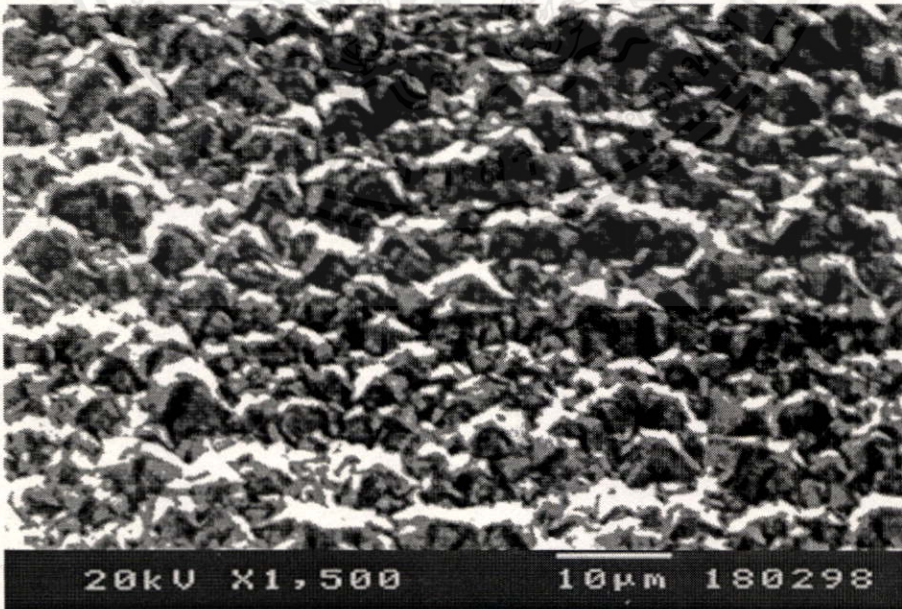
จากการทดลองสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อนพบว่าอุณหภูมิของฐานรองเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเกิดฟิล์มเพชร กล่าวคือมีอุณหภูมิฐานรองช่วงหนึ่งเท่านั้นที่อะตอมคาร์บอนเกิดการจับตัวกันเป็นโครงสร้างเพชร โดยหากอุณหภูมิฐานรองมีค่าต่ำหรือสูงกว่านี้ อะตอมคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างอื่นที่ไม่ใช่เพชร ตัวอย่างเช่น ออร์ไฟสคาร์บอนหรือกราไฟต์ดังแสดงได้ดังในรูปที่ 5.12 ดังนั้นในการสร้างฟิล์มเพชรจึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิฐานรองให้มีความเหมาะสม นอกจากนี้แล้วอุณหภูมิของฐานรองยังมีผลต่อการเกิดระนาบของฟิล์มเพชรด้วย ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.12-5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.12 แสดงผลที่เกิดขึ้นจากการสร้างฟิล์มเพชรที่ (a) อุณหภูมิฐานรองมีค่าต่ำเกินไป (อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $930^{\circ}\text{C}$ ) และ (b) อุณหภูมิฐานรองมีค่าสูงเกินไป (อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $980^{\circ}\text{C}$ )



(a)



(b)

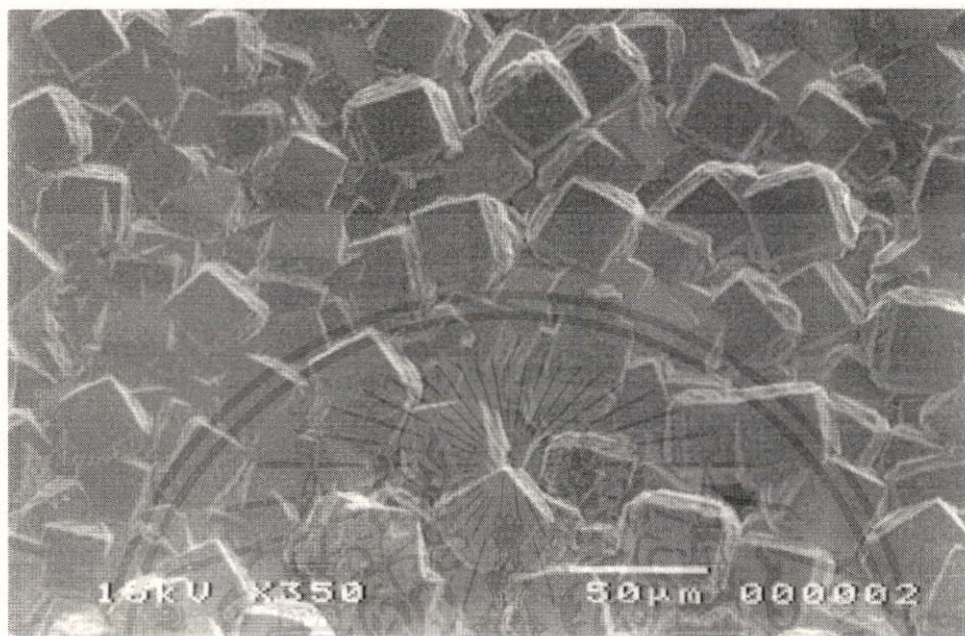
เอกสารนี้เป็น

ไม่ว่ากรณีใด

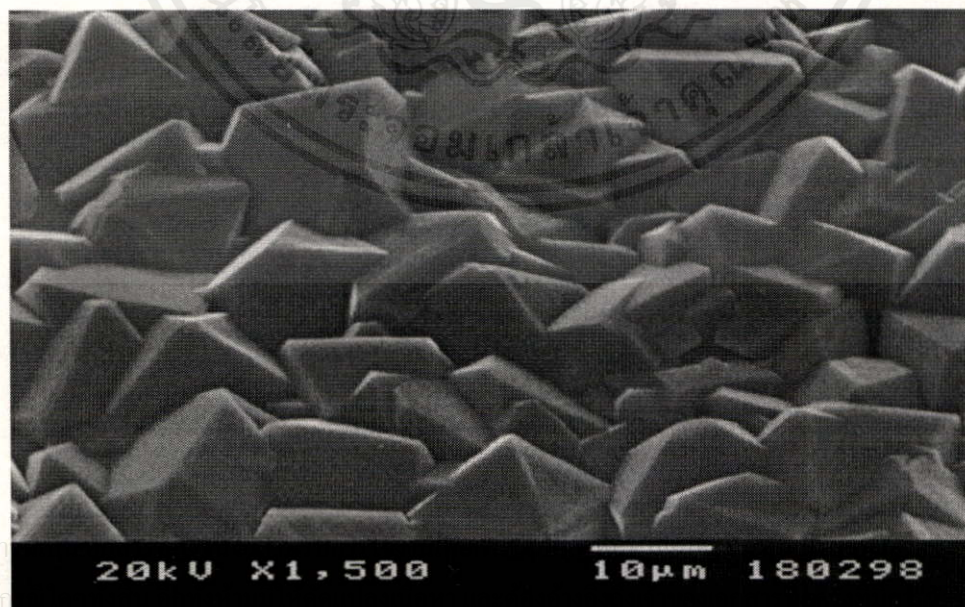
ทั้งนี้ หอสมุดฯ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องขอโทษขอสงวนใจของเอกสารทุกฉบับที่ตรงกันเป็

งานการค้า

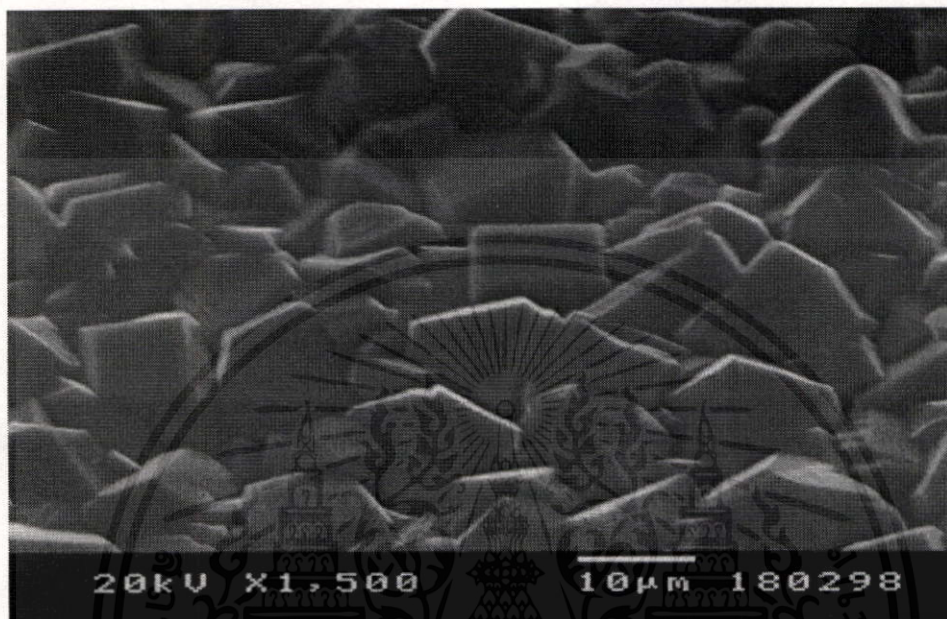
รูปที่ 5.13 แสดงฟิล์มเพชรระนาบ {100} ที่สร้างขึ้นได้ (อุณหภูมิฐานรองประมาณ 940°C)



รูปที่ 5.14 แสดงฟิล์มเพชรระนาบ {111} ที่สร้างขึ้นได้ (อุณหภูมิฐานรองประมาณ 960°C)



รูปที่ 5.15 แสดงฟิล์มเพชรระนาบรวม (Polycrystalline) ที่สร้างขึ้นได้ (อุณหภูมิฐานรอง ประมาณ  $950^{\circ}\text{C}$ )



#### 5.4 ผลการศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายที่กำหนด

ฟิล์มเพชรจะถูกสร้างให้เกิดตามลวดลายที่ถูกออกแบบไว้ด้วยวิธีการตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.5 เพื่อศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบเป็นวงจรต่อไป อาทิเช่นค่าระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างลวดลาย หรือค่าความกว้างน้อยสุดของลวดลาย และจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.2 ทำให้เราทราบว่า การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดแผ่นซิลิกอนด้วยครีမ်เพชรขนาด  $0.25\ \mu\text{m}$  จะใช้เวลาในการเกิดเป็นฟิล์มเพชรน้อยที่สุด ดังนั้นเราจึงเลือกใช้การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดแผ่นซิลิกอนด้วยครีမ်เพชรขนาด  $0.25\ \mu\text{m}$  เนื่องจากทำให้มีค่าความหนาแน่นการนิวเคลิเอชันของเพชรสูง และใช้เวลาในการเกิดเป็นฟิล์มเพชรน้อยที่สุด ทำให้สามารถลดโอกาสที่จะเกิดผลึกหรือฟิล์มเพชรที่ไม่ต้องการบนชั้นซิลิกอนได้ออกไซด์ให้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 5.1 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

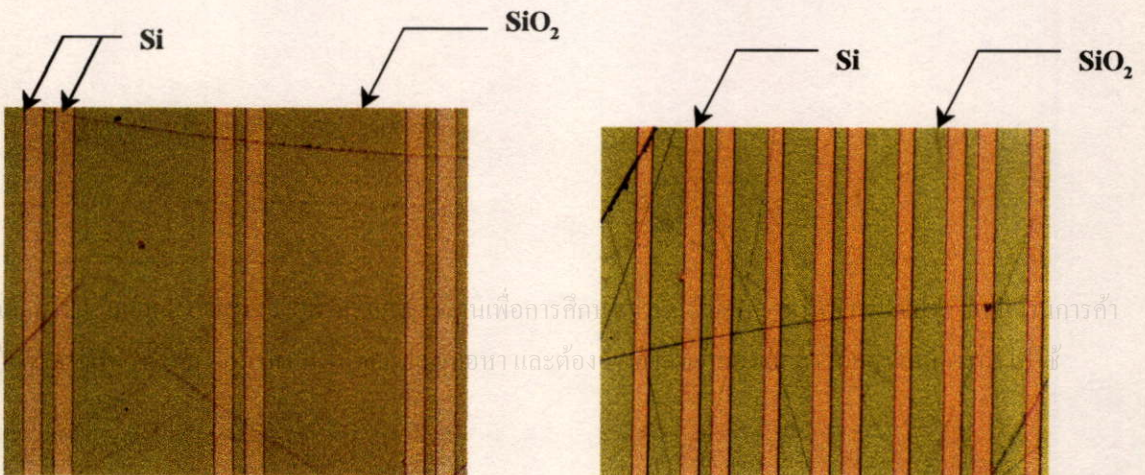
อุณหภูมิไร้หลอด	$\approx 2,000\text{ }^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิฐานรอง	$940\text{-}960\text{ }^{\circ}\text{C}$
อัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนที่ไหลผ่านเอททิลแอลกอฮอล์	14% โดยปริมาตร
ความดัน	1 atm
ระยะห่างระหว่างไร้หลอดกับฐานรอง	1.0-1.3 มิลลิเมตร
ระยะเวลาในการสร้าง	10-45 นาที

ภายหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรเสร็จแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำมาวิเคราะห์ถึงผลที่ได้จากการสร้างว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดในแต่ละวิธีการ เช่นการเกิดฟิล์มเพชรหรือผลึกเพชรบนพื้นที่ที่ไม่ต้องการให้เกิด, ลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นในแต่ละวิธี, ความผิดพลาดของค่าระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร รวมไปถึงค่าความกว้างน้อยสุดของลวดลายฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น เมื่อเทียบกับค่าที่ได้ออกแบบไว้

#### 5.4.1 ผลจากการสร้างลวดลายฟิล์มเพชรโดยวิธีใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากักป้องกัน

การสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้จะใช้ชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมกระบวนการในหัวข้อที่ 4.6.2.1 เรียบร้อยแล้ว ทำการสร้างฟิล์มเพชรตามเงื่อนไขตารางที่ 5.1 ตัวอย่างของลวดลายก่อนทำการสร้างฟิล์มเพชรแสดงดังรูปที่ 5.16

รูปที่ 5.16 แสดงตัวอย่างลวดลายที่ใช้ในการทดลอง(กำลังขยาย 100 เท่า)

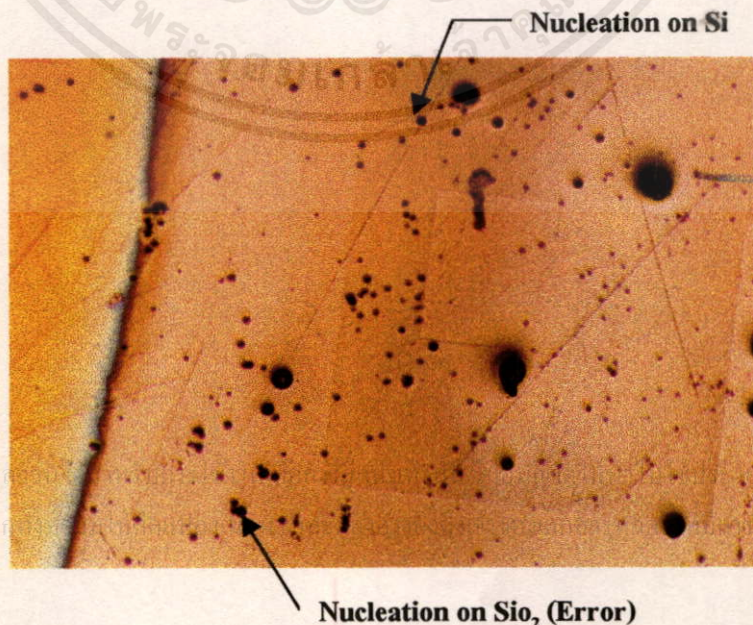


กล้องจุลทรรศน์หรือ SEM เพื่อดูลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นต่อไป ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่าการเกิดลวดลายของฟิล์มเพชรจะขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ด้วย กล่าวคือ สำหรับชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน ภายหลังจากการสร้างเสร็จสิ้นพบว่าจะไม่เกิดฟิล์มเพชรตามลวดลายที่ต้องการ แต่จะเกิดเป็นผลึกเพชรเดี่ยวๆกระจายทั่วทั้งบริเวณผิวหน้าของซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ถ้าหากชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สร้างด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงจะพบว่าฟิล์มเพชรจะเกิดขึ้นตามลวดลายที่กำหนดไว้อย่างดี ซึ่งผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

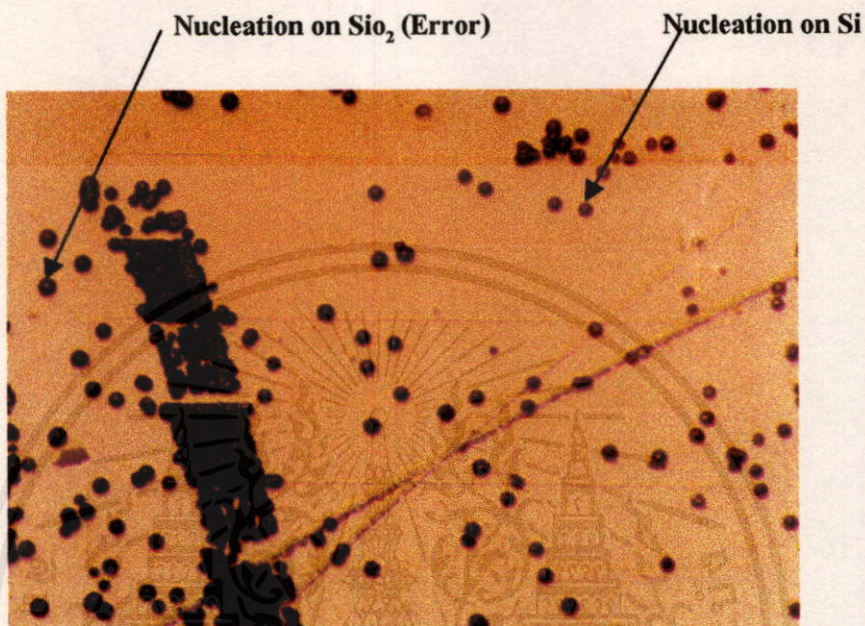
#### -ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน

ในกรณีของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน ภายหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรแล้ว พบว่าผลที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นฟิล์มเพชรตามลวดลายที่ต้องการ แต่จะเป็นผลึกเดี่ยวๆ กระจายบางๆ ทั่วไปทั้งผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน และผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.17-5.19

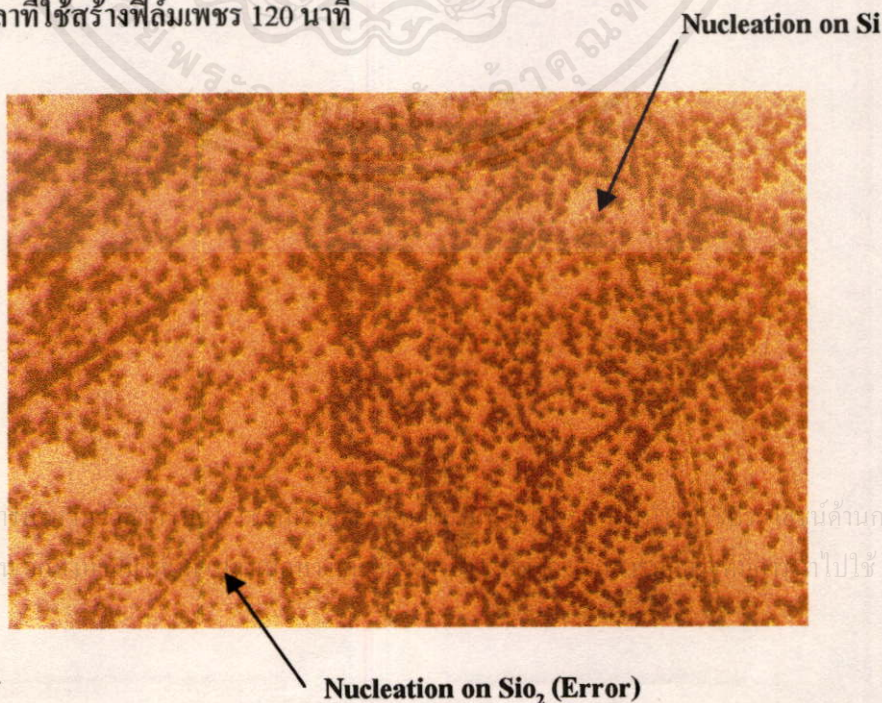
รูปที่ 5.17 แสดงผลที่เกิดขึ้นหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายกรณีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน ความหนาของ  $\text{SiO}_2$  2,000 อังสตรอม เวลาที่ใช้สร้างฟิล์มเพชร 30 นาที



รูปที่ 5.18 แสดงผลที่เกิดขึ้นหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรตามกลศาสตร์ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์  
สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน ความหนาของ  $\text{SiO}_2$  5,000 อังสตรอม เวลาที่  
ใช้สร้าง ฟิล์มเพชร 45 นาที



รูปที่ 5.19 แสดงผลที่เกิดขึ้นหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรตามกลศาสตร์ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์  
สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน ความหนาของ  $\text{SiO}_2$  10,000 อังสตรอม  
เวลาที่ใช้สร้างฟิล์มเพชร 120 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

นับด้านการค้า  
ไปใช้

Nucleation on  $\text{SiO}_2$  (Error)

จากรูปที่ 5.17-5.19 แสดงให้เห็นถึงผลของการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร สำหรับกรณีใช้ หน้ากากป้องกันจากซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน สำหรับสาเหตุที่ไม่เกิดฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามต้องการ แต่เกิดผลึกเพชรกระจายทั่วทั้งหมุด สันนิษฐานได้ว่าในกระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อนนี้จะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ดังสมการ 4.1 และ 4.2 เกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ลึกลงไปที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน ประมาณ 44% ของความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ทั้งหมด[12] ดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นเมื่อทำการลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกเพื่อเปิดช่องลวดลายขึ้น ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ถูกลอกออกไปจะมีผลต่อรอยขีดที่เกิดจากการขีดด้วยครีมเพชร (ซึ่งรอยขีดที่เกิดขึ้นนี้มีผลต่อการกระตุ้นการนิวเคลิเอชันของเพชรให้เกิดเร็วขึ้น) กล่าวคือจะไปทำลายรอยขีดที่เกิดขึ้นให้น้อยลง ดังนั้นจึงเป็นการลดการนิวเคลิเอชันของเพชรให้น้อยลงด้วย ซึ่งจากรูปที่ 5.17-5.19 พบว่าแม้เวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรจะมากกว่าเวลาปกติที่ใช้ในการเกิดฟิล์มเพชรสำหรับกรณีขีดแผ่นซิลิกอนด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25 \mu\text{m}$  คือ 15 นาที (30 นาที, 45 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ) ผลที่เกิดขึ้นก็ยังไม่เป็นฟิล์มเพชร แต่จะเป็นเพียงผลึกเดี่ยว ๆ กระจายทั่วไปเท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อนนี้ไม่สามารถใช้เป็นหน้ากากป้องกันในการสร้างลวดลายฟิล์มเพชรได้

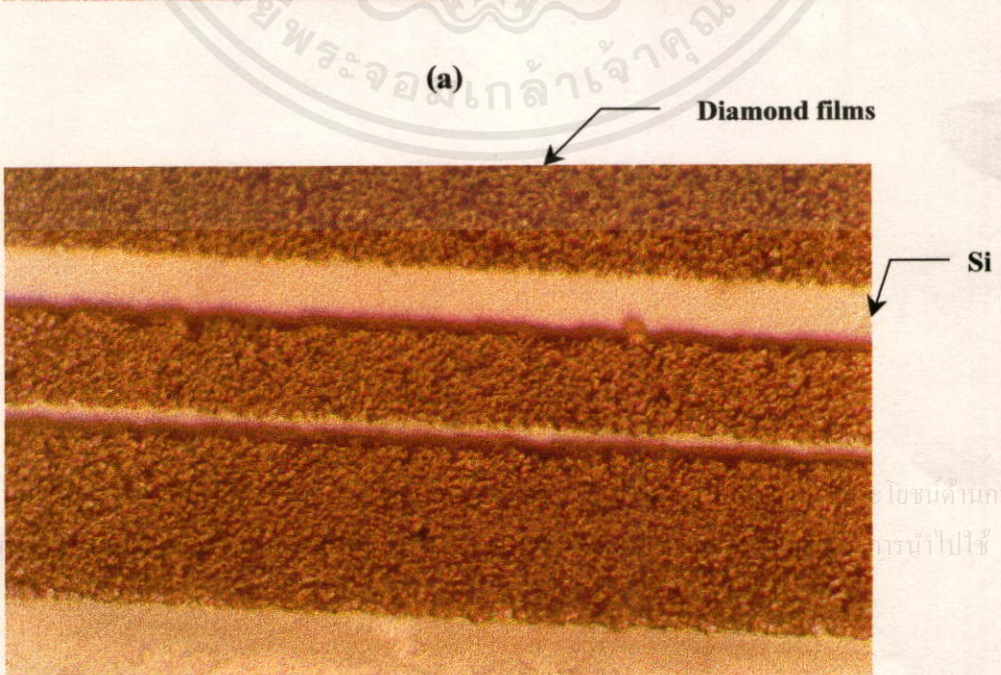
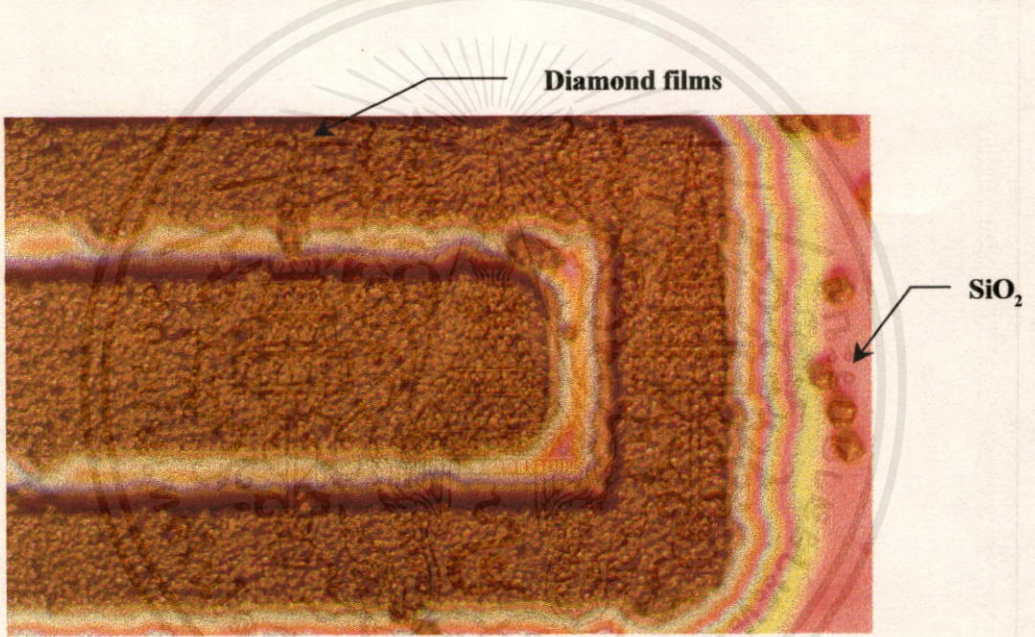
### -ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

จากผลการทดลองพบว่าซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง สามารถใช้เป็น หน้ากากป้องกัน ได้เป็นอย่างดี เมื่อเทียบกับซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน คือจะเกิดฟิล์มเพชรตามลวดลายที่กำหนดไว้ โดยที่บริเวณชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จะเกิดผลึกเพชรเดี่ยว ๆ เกิดกระจายเป็นจุด ๆ ทั่วไป (รูปที่ 5.20a และ 5.2a) ซึ่งบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น ดังนั้นชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จะถูกนำไปลอกในสารละลายบัฟเฟอร์เพื่อกำจัดผลึกเพชรให้หลุดออกไป ท้ายสุดจะได้ฟิล์มเพชรเกิดบนฐานรองซิลิกอนเป็นลวดลายตามต้องการดังรูปที่ 5.20b และ 5.21b

สำหรับเหตุผลที่ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงสามารถนำมาใช้ในการป้องกันการเกิดฟิล์มเพชรได้โดยไม่ส่งผลถึงการลดลงของการนิวเคลิเอชันของเพชรเหมือนกับกรณีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างจากวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน สันนิษฐานได้ว่าเนื่องจากการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงนี้จะต่างจากวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน กล่าวคือในวิธีสปัตเตอร์ริง ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นจะเกิดจากอะตอมของซิลิกอน ไดออกไซด์ที่แตกออกจากตัวเป้า ตกลงบนผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนเกิดการเกาะตัวขึ้นเป็นชั้นซิลิกอนได

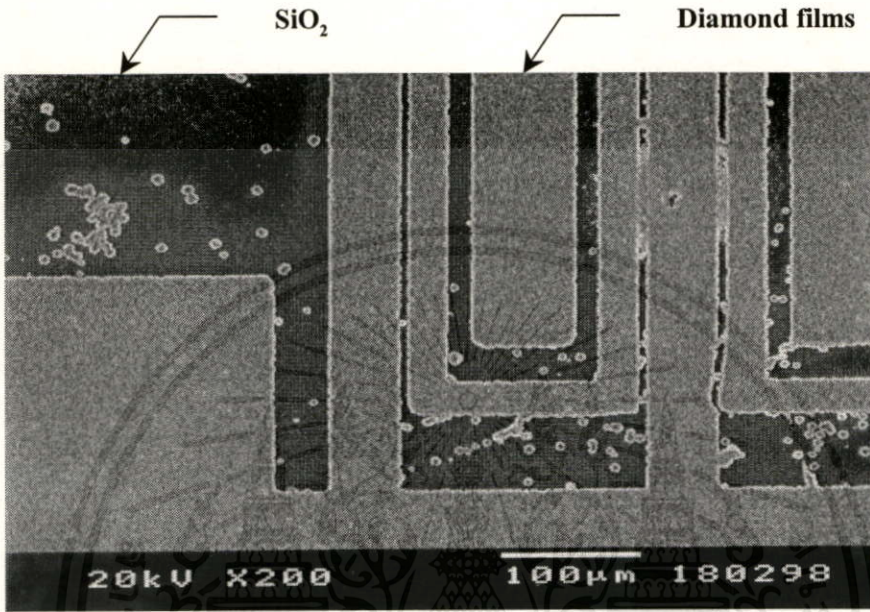
ออกไซด์ขึ้นมา คังแผนภาพในรูปที่ 4.5 ดังนั้นเมื่อทำการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ออกเป็นสวดลายเพื่อทำการสร้างฟิล์มเพชร ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ถูกลอกออกไปจะไม่มีผลกับรอยขีดที่เกิดขึ้นจากการเตรียมพื้นผิวฐานรอง ทำให้รอยขีดที่เกิดขึ้นยังคงสภาพเดิมไม่ถูกทำลายไป ดังนั้นเมื่อนำไปสร้างฟิล์มเพชรจึงเกิดฟิล์มเพชรขึ้นตามพื้นที่ที่กำหนดไว้

รูปที่ 5.20 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร(กำลังขยาย 500 เท่า) (a)ก่อนลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (b)ลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกแล้ว

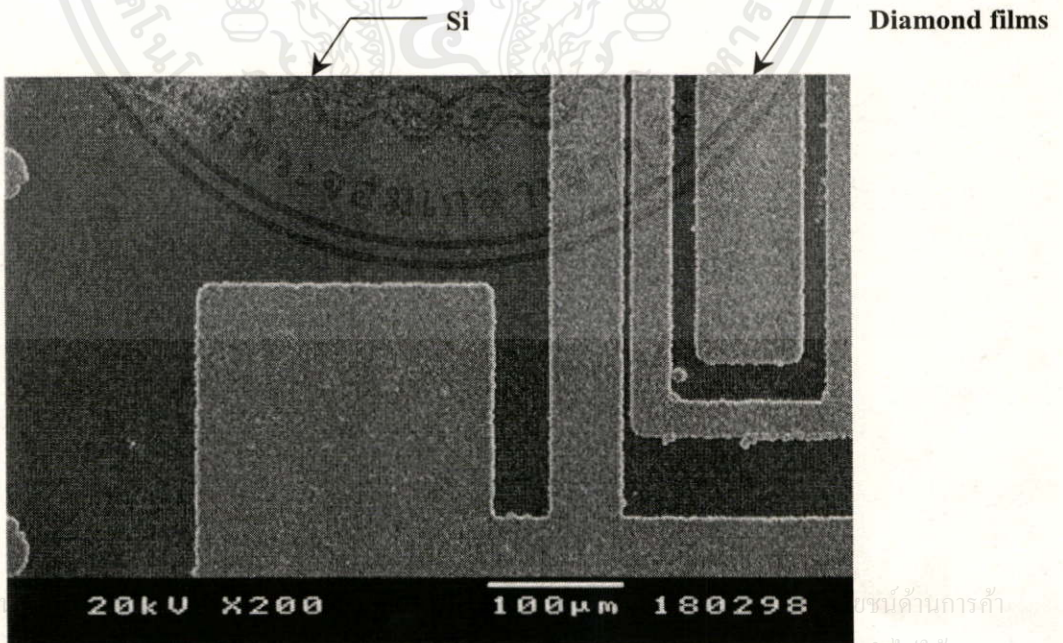


(b)

รูปที่ 5.21 ภาพถ่าย SEM แสดงลวดลายของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร  
(a) ก่อนลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (b) ลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกแล้ว



(a)

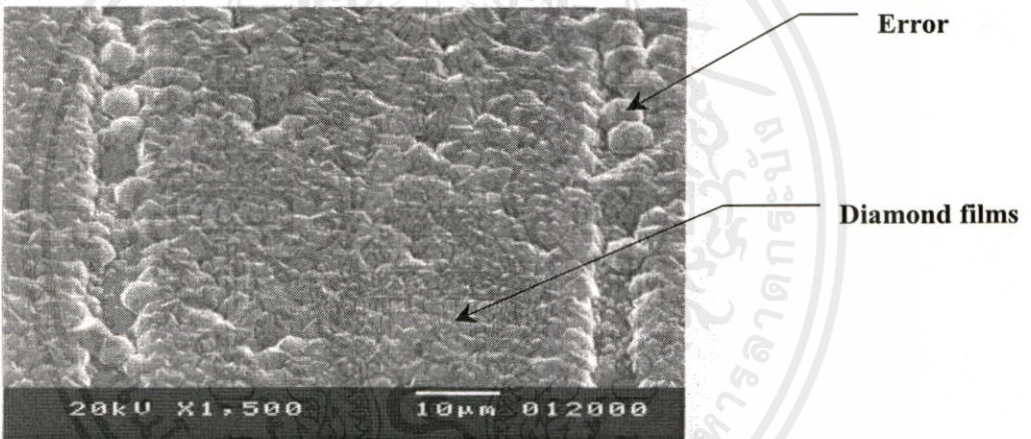


(b)

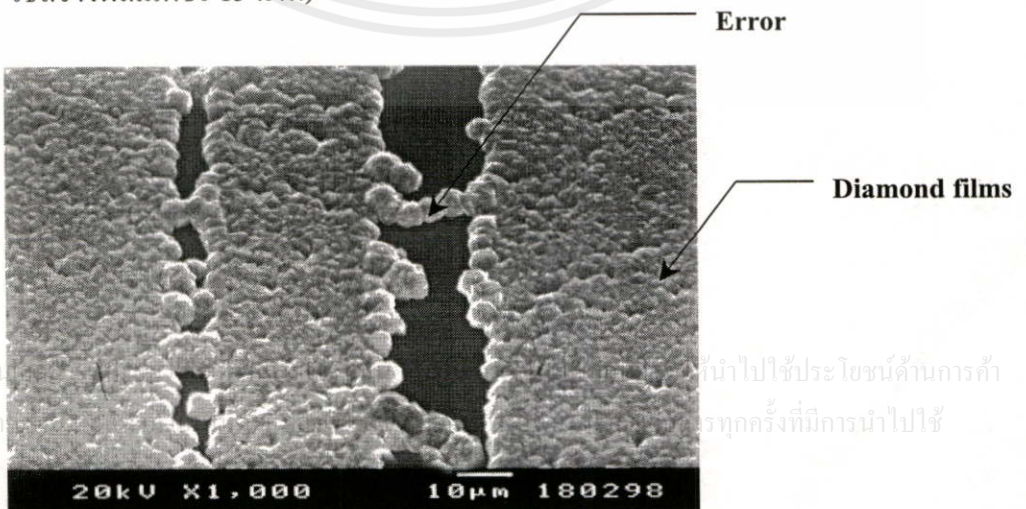
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งนั้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องขอขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้  
ทางด้านการค้า

อย่างไรก็ตามจากการทดลองยังพบอีกว่าความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ยังมีผลต่อการเกิดลวดลายของฟิล์มเพชรด้วย หากความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าน้อยเกินไป (ผลการทดลองพบว่าต่ำกว่า 5,000 Å) ลวดลายของฟิล์มเพชรที่ได้จะไม่คมชัด และมีข้อผิดพลาดสูงเนื่องจากเกิดผลึกเพชรขึ้นบนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร โดยถ้าหากความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าน้อย ลวดลายของฟิล์มเพชรจะไม่คมชัดและเกิดข้อผิดพลาดสูง แต่ถ้าซิลิกอนไดออกไซด์มีความหนาเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดของลวดลายก็จะลดลง ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.22-5.25

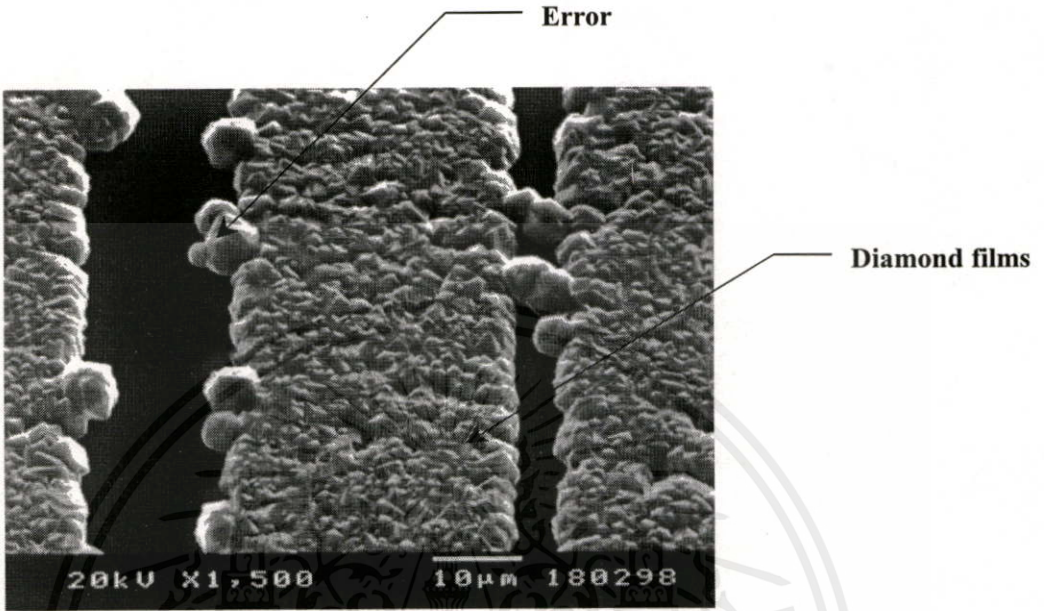
รูปที่ 5.22 แสดงผลที่เกิดขึ้นกับการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร (ความหนาของ  $\text{SiO}_2$  500 Å, เวลาที่ใช้สร้างฟิล์มเพชร 15 นาที)



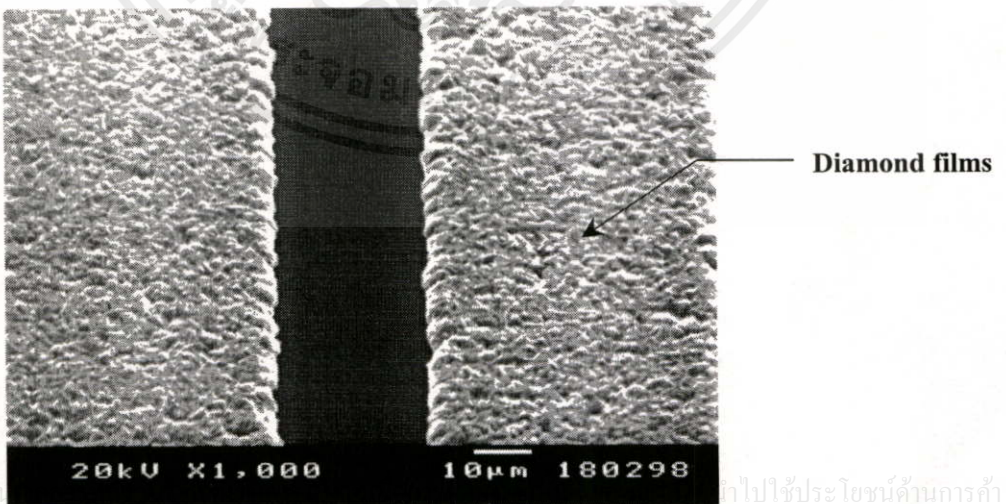
รูปที่ 5.23 แสดงผลที่เกิดขึ้นกับการสร้างลวดลายฟิล์มเพชร (ความหนาของ  $\text{SiO}_2$  1,000 Å, เวลาที่ใช้สร้างฟิล์มเพชร 15 นาที)



รูปที่ 5.24 แสดงผลที่เกิดขึ้นกับการสร้างสวดลายฟิล์มเพชร (ความหนาของ  $\text{SiO}_2$  3,000 Å, เวลาที่ใช้สร้างฟิล์มเพชร 15 นาที)



รูปที่ 5.25 แสดงผลที่เกิดขึ้นกับการสร้างสวดลายฟิล์มเพชร ความหนาของ  $\text{SiO}_2$  5,000 Å, เวลาที่ใช้สร้างฟิล์มเพชร 15 นาที)



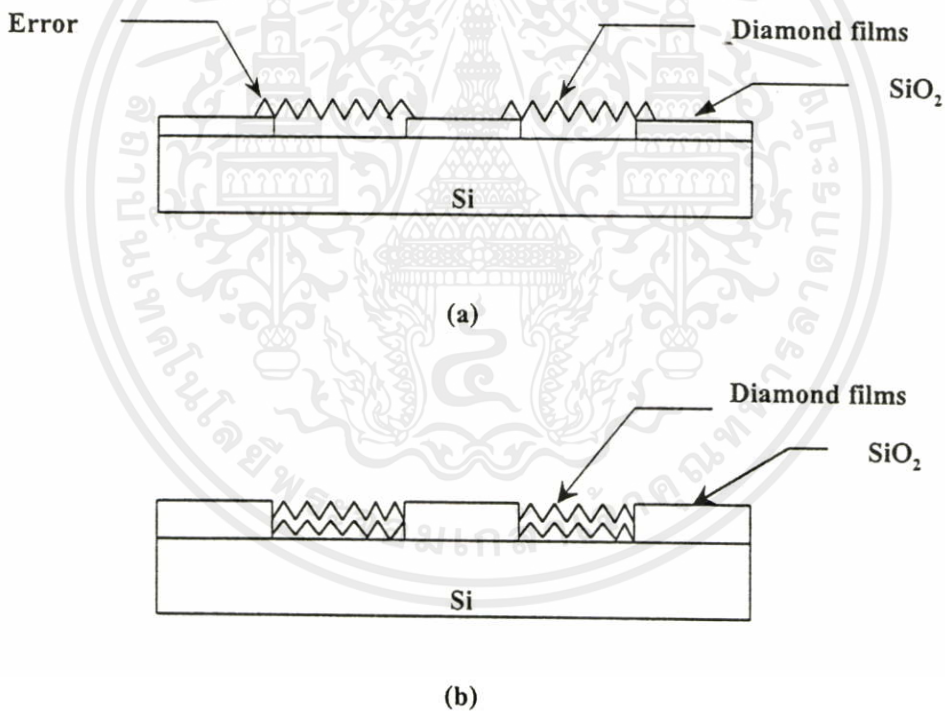
เอกสารนี้เป็น

ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสาเหตุที่เกิดข้อผิดพลาดระหว่างลวดลายฟิล์มเพชรมากในกรณีที่มีความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าน้อย ๆ สันนิษฐานได้ว่าอาจเกิดจากการที่ผลึกเพชรที่บริเวณขอบของลวดลายเกินออกมาบนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ดังแผนภาพในรูปที่ 5.26 แต่ถ้าหากซิลิกอนไดออกไซด์มีความหนาพอ โอกาสที่ผลึกเพชรบริเวณขอบของลวดลายเกินออกมาที่ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จะลดลง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรไม่ควรต่ำกว่า 5,000 Å

รูปที่ 5.26 แผนภาพแสดงผลของความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีต่อการเกิดลวดลายของฟิล์มเพชร (a) กรณีซิลิกอนไดออกไซด์บาง ๆ และ (b) กรณีซิลิกอนไดออกไซด์หนา



จากการทดลองสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายที่ออกแบบไว้ จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรดังนี้คือ

1. ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลาย  $5 \mu\text{m}$  นั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2. ขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลาย  $10 \mu\text{m}$

3. ความผิดพลาดเนื่องจากการเกิดฟิล์มเพชร นอกเหนือจากลวดลายจะขึ้นอยู่กับขนาดของลวดลายฟิล์มเพชร แต่จะมีค่าสูงสุดประมาณ 23.5 % สำหรับขนาดความกว้างของลวดลายต่ำสุด 10  $\mu\text{m}$
4. ความผิดพลาดของระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายฟิล์มเพชร จะขึ้นอยู่กับค่าระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายฟิล์มเพชร แต่จะมีค่าสูงสุดประมาณ 15.3% สำหรับระยะห่างระหว่างลวดลายต่ำสุด 5 $\mu\text{m}$

ซึ่งค่าความผิดพลาดเนื่องจากการเกิดฟิล์มเพชร นอกเหนือจากลวดลายที่ออกแบบไว้นี้จะมีค่าลดลงเมื่อขนาดความกว้างของลวดลายที่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 5.2 และค่าความผิดพลาดของระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายฟิล์มเพชรก็จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มค่าระยะห่างมากขึ้นดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการเกิดฟิล์มเพชรนอกเหนือจากลวดลายที่ออกแบบ

ขนาดความกว้างของลวดลายที่ออกแบบ ( $\mu\text{m}$ )	ขนาดความกว้างของลวดลายที่วัดได้โดยเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	ความแตกต่างที่เกิดขึ้น ( $\mu\text{m}$ )	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
10	12.35	2.35	+23.50 %
20	22.71	2.71	+13.55 %
30	31.97	1.97	+6.57 %
40	42.23	2.23	+5.76 %
50	52.64	2.64	+5.28 %
60	62.39	2.39	+3.98 %
80	81.76	1.76	+2.20 %
100	101.33	1.33	+1.33 %
120	121.18	1.18	+0.98 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ... ..  
 ... ..  
 ... ..

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

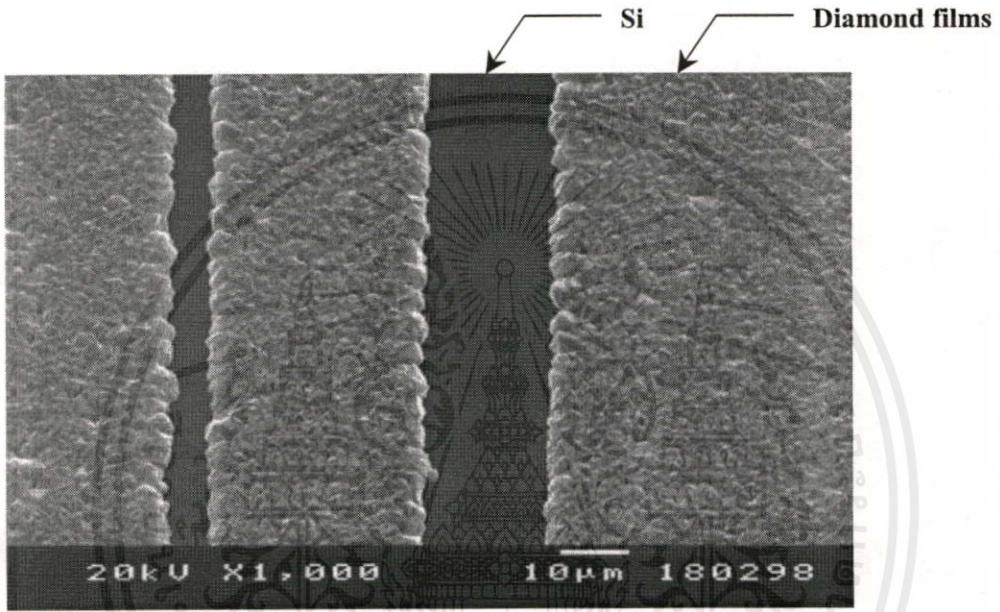
ตารางที่ 5.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร

ระยะห่างใกล้ที่สุดของลวดลายที่ออกแบบ ( $\mu\text{m}$ )	ระยะห่างใกล้ที่สุดของลวดลายที่วัดได้โดยเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	ความแตกต่างที่เกิดขึ้น ( $\mu\text{m}$ )	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด
5	4.24	-0.76	-15.3 %
10	8.93	-1.07	-10.72 %
20	18.93	-1.07	-5.36 %
30	28.66	-1.34	-4.47 %
40	38.56	-1.44	-3.61 %
50	48.76	-1.24	-2.48 %
60	59.32	-0.68	-1.14 %
80	79.34	-0.66	-0.83 %
100	99.30	-0.70	-0.69 %
120	119.38	-0.62	-0.52 %
...	...	...	...

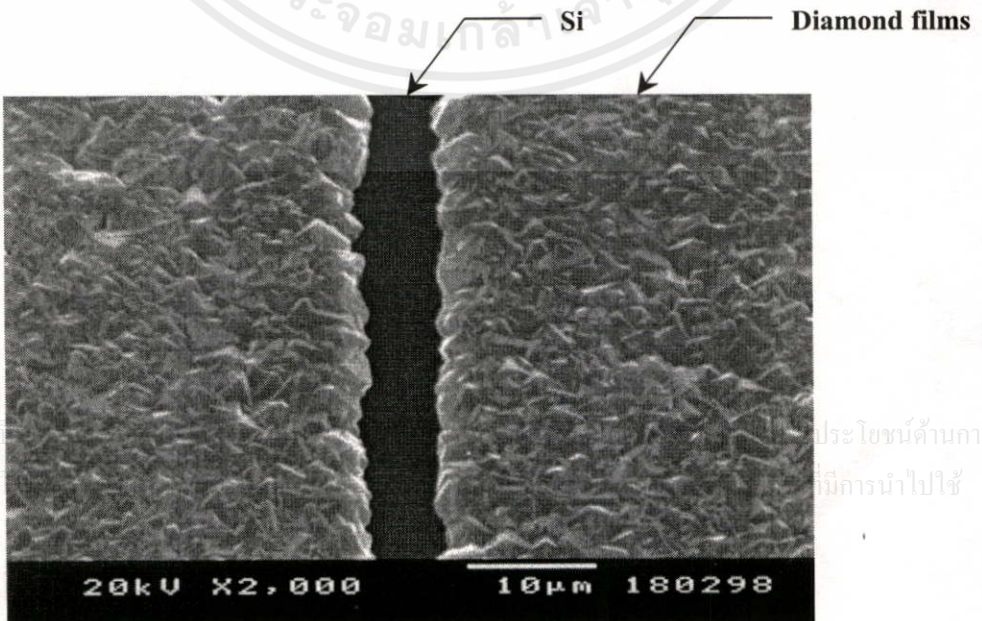
สำหรับเหตุผลที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าสูงที่ค่าความกว้างของลวดลายฟิล์มเพชรต่ำ ๆ เนื่องจากขนาดของผลึกเพชรที่เกิดขึ้น โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ  $2 \mu\text{m}$  ซึ่งขนาดของผลึกเพชรที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชร เช่น ค่าความหนาแน่นการนิวเคลียส, เทคนิคที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร[9] โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างฟิล์มเพชรในการทดลองนี้จะทำให้ได้ขนาดของผลึกเพชรประมาณ  $2 \mu\text{m}$  ดังนั้นที่บริเวณขอบด้านนอกของลวดลายจะเกิดฟิล์มเพชรเกินออกมาจากลวดลายที่ออกแบบไว้บ้างเนื่องจากขนาดของผลึกเพชรมันเอง โดยจะสังเกตได้ว่าขนาดของลวดลายที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มจากค่าที่ออกแบบไว้ ประมาณ  $2 \mu\text{m}$  เสมอ ดังนั้นเมื่อทำการวัดขนาดของลวดลายฟิล์มเพชรที่สร้างได้กับขนาดลวดลายที่ออกแบบไว้จึงพบว่า ที่ขนาดความกว้างของลวดลายฟิล์มเพชรต่ำ ๆ จะมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูง แต่ถ้าหากขนาดความกว้างของลวดลายฟิล์มเพชรเพิ่มขึ้น อัตราส่วนระหว่างลวดลายฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นจริงกับที่ออกแบบไว้จะต่างกันมากทำให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าต่ำลง เนื่องจากขนาดของผลึกเพชรที่เกินออกมามีค่าคงที่ (ประมาณ  $2 \mu\text{m}$ ) มันเอง ส่วนสาเหตุที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระยะ

ห่างไกลที่สุดระหว่างลวดลายฟิล์มเพชร มีค่าสูงที่ระยะห่างระหว่างลวดลายต่ำ ๆ และลดลงที่ระยะห่างระหว่างลวดลายมีค่ามากขึ้นด้วยเหตุผลเดียวกัน โดยความผิดพลาดของลวดลายฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดขึ้นเท่า ๆ กันทุกทิศทางของพื้นที่ที่ออกแบบ

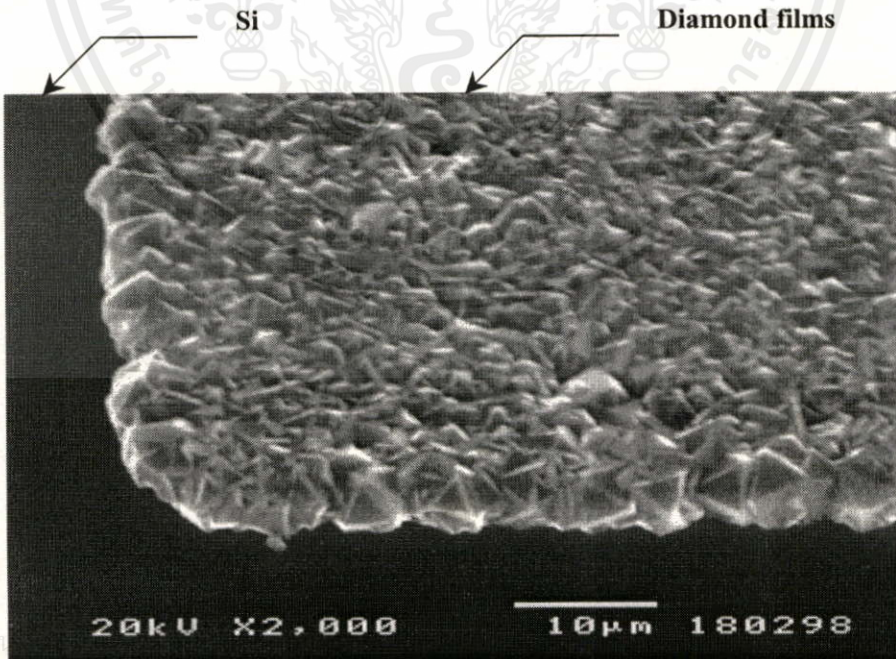
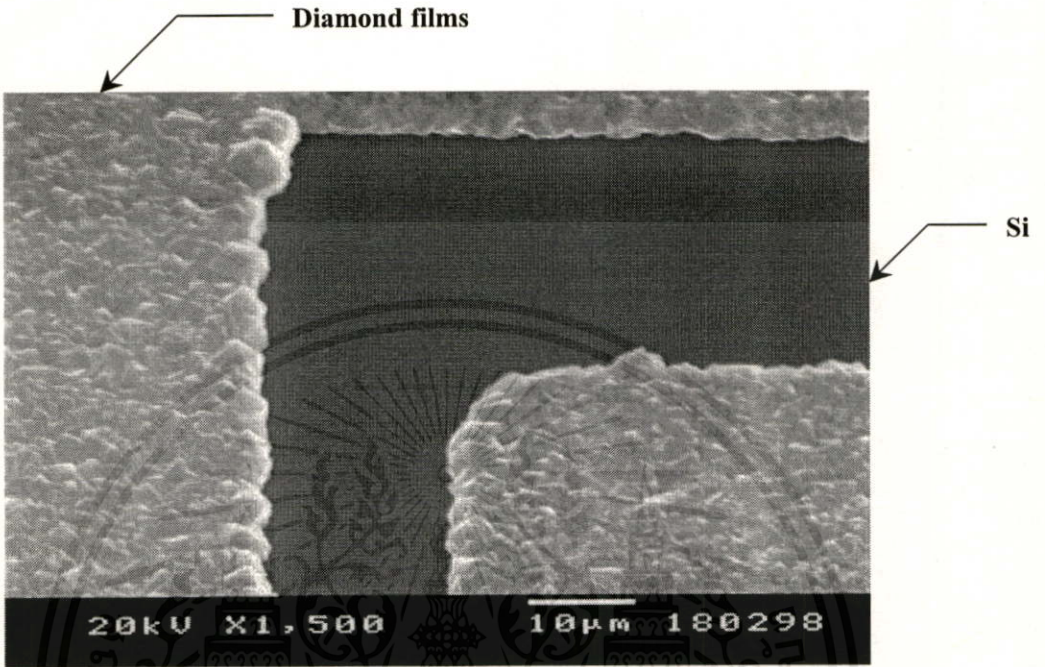
รูปที่ 5.27 ภาพถ่าย SEM แสดงระยะห่างระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชรขนาด 5  $\mu\text{m}$  และ 20  $\mu\text{m}$



รูปที่ 5.28 ภาพถ่าย SEM แสดงระยะห่างไกลที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชรที่สร้างได้



รูปที่ 5.29 ภาพถ่ายแสดงความคมชัดบริเวณมุมของสวดตายฟิล์มเพชรที่สร้างได้

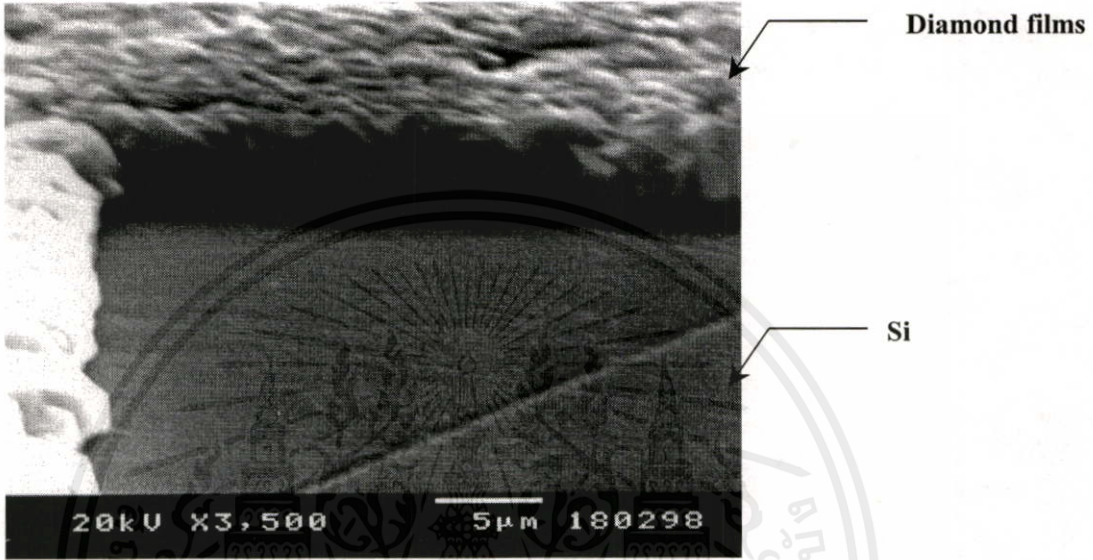


เอกสารนี้เป็น

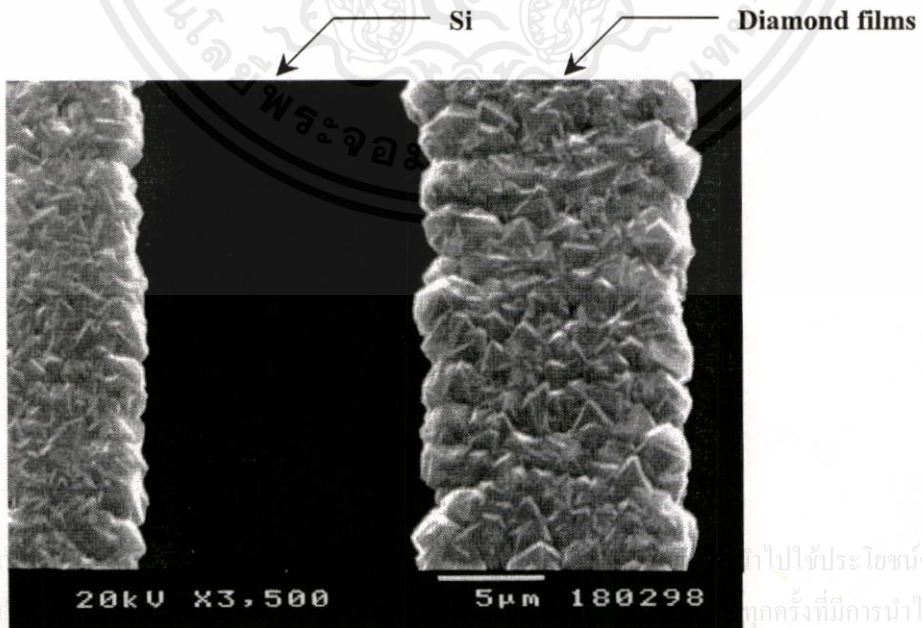
งานการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

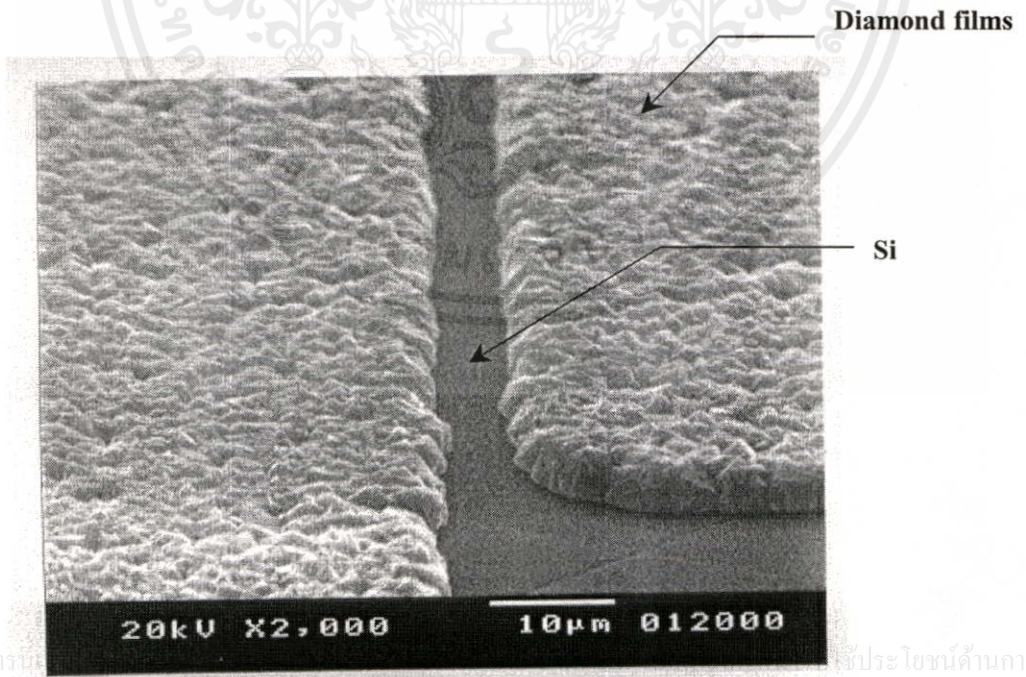
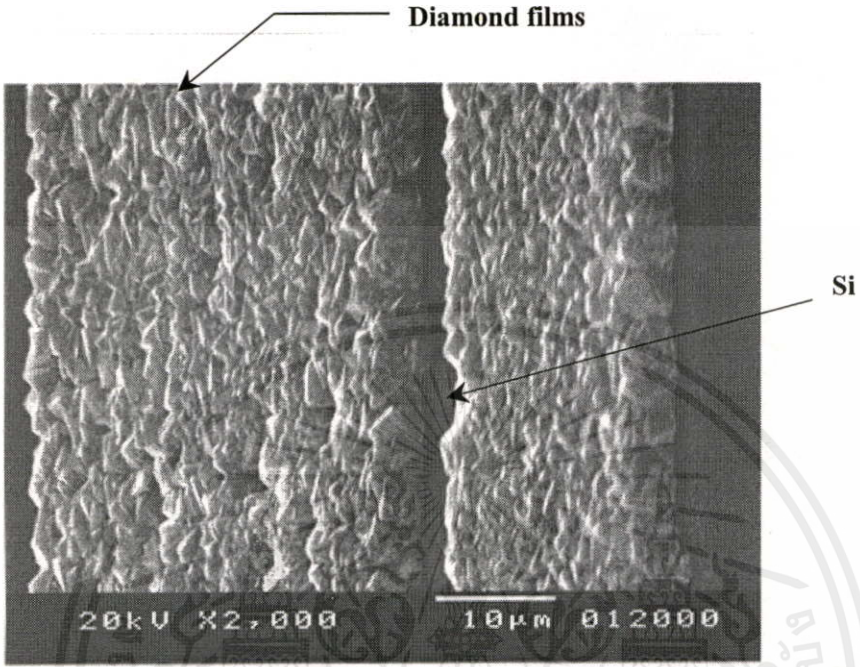
รูปที่ 5.30 ภาพถ่ายแสดงความหนาของลวดลายฟิล์มเพชร (ประมาณ  $3\mu\text{m}$  ที่เวลาในการสร้างฟิล์มเพชร 15 นาที)



รูปที่ 5.31 ภาพถ่าย SEM แสดงขนาดความกว้างต่ำสุดของฟิล์มเพชรที่สร้างได้ในห้องปฏิบัติการ (ประมาณ  $10\mu\text{m}$ )



รูปที่ 5.32 ภาพถ่ายแสดงด้านขอบของลวดลายฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้น

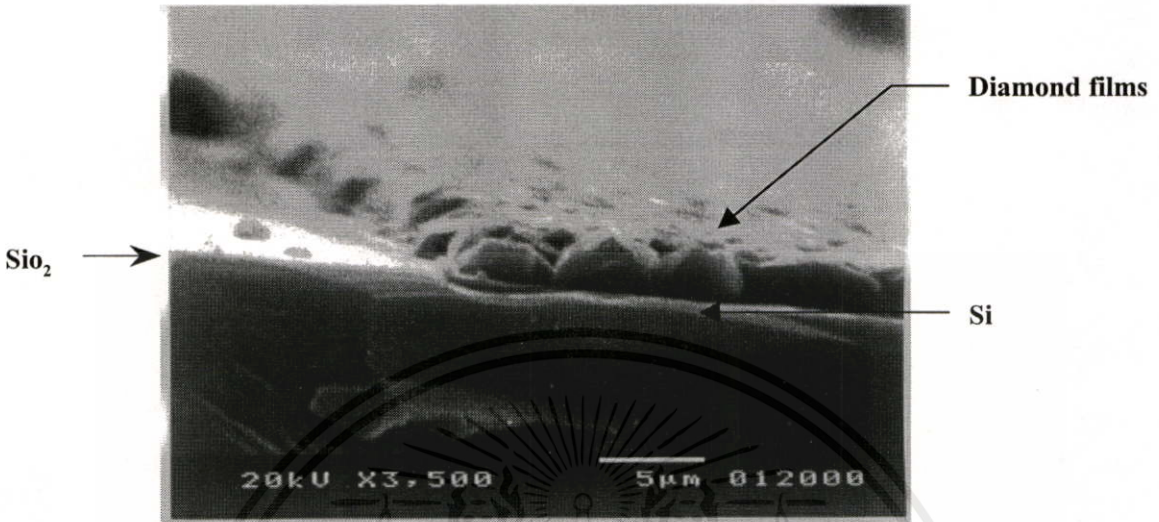


เอกสารนี้

ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

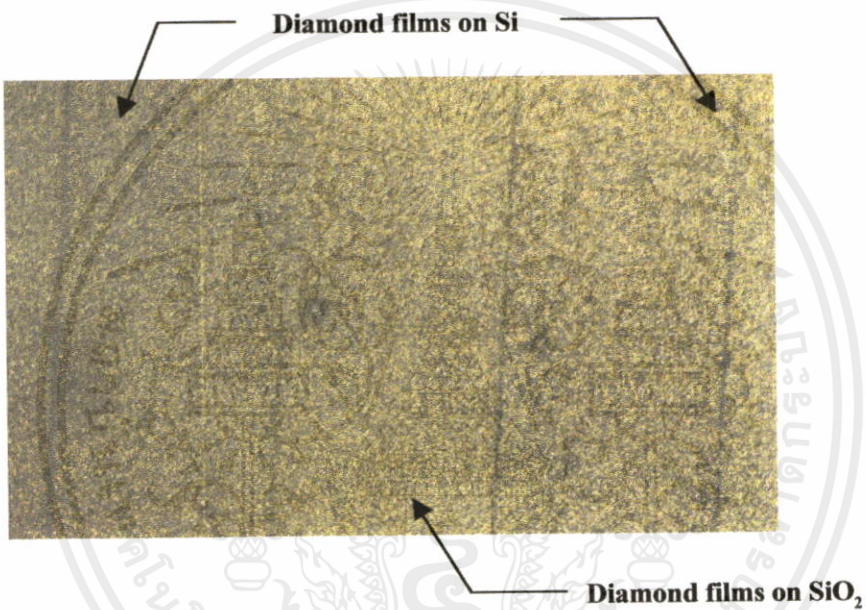
รูปที่ 5.33 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการเกิดฟิล์มเพชรในลวดลายที่กำหนด



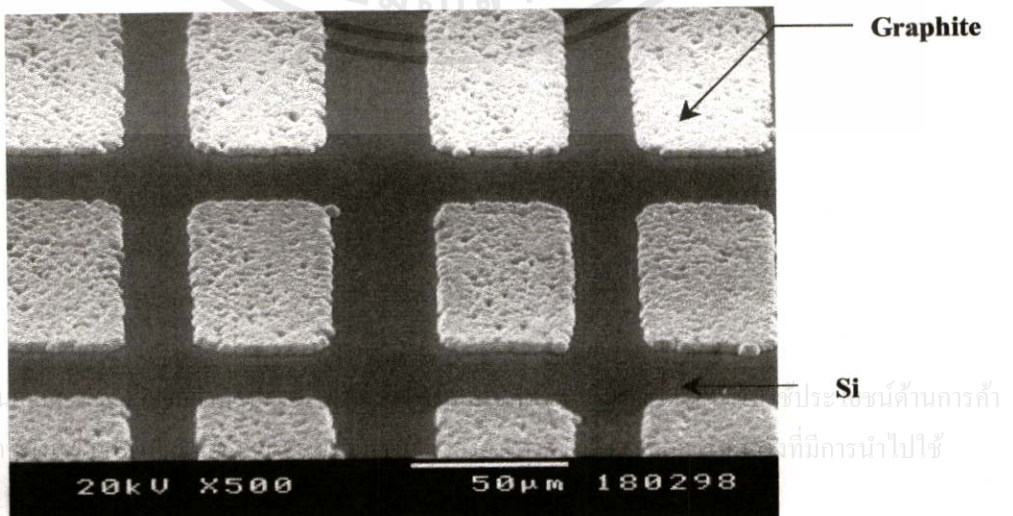
จากการทดลองสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายพบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในบางครั้งจะมีข้อผิดพลาดทำให้ลวดลายของฟิล์มเพชรเสียหาย ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรระวังไม่ให้เกิดขึ้น ตัวอย่างของข้อผิดพลาดที่พบคือ การใช้เวลาในการสร้างฟิล์มเพชรน้อยเกินไป (น้อยกว่า 12 นาที) ทำให้ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่สมบูรณ์คือยังมีการนิวเคลียชันของเพชรอยู่หรือเกิดเพชรขึ้นแล้ว แต่การเกิดฟิล์มเพชรยังไม่สมบูรณ์ (ตัวอย่างเช่น รูปที่ 5.5 b-5.5e) แต่ถ้าหากใช้เวลาในการสร้างนานเกินไป (ตั้งแต่ 30 นาทีขึ้นไปสำหรับกรณีขัดแผ่นซิลิกอนด้วยครีมเพชรขนาด 0.25  $\mu\text{m}$ ) จะเกิดฟิล์มเพชรทั่วไปหมดทั้งในลวดลายและพื้นที่ที่ไม่ต้องการ ซึ่งจะไม่สามารถลอกฟิล์มเพชรออกได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.34 , อุณหภูมิของฐานรองไม่เหมาะสมคือถ้าอุณหภูมิฐานรองต่ำเกินไปฟิล์มที่ได้จะไม่ใช่ฟิล์มเพชรดังรูปที่ 5.35 ซึ่งจากการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าเป็นกราไฟต์ ในขณะที่ถ้าอุณหภูมิฐานรองสูงเกินไปจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นการนิวเคลียชันให้มากขึ้น ทำให้เกิดฟิล์มเพชรขึ้นบนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นมา ซึ่งในบางครั้งไม่สามารถกำจัดออกได้ นอกจากนี้กระบวนการเตรียมพื้นผิวฐานรองยังมีผลต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น กล่าวคือในการขัดผิวหน้าแผ่นซิลิกอนหากมีวัสดุอื่นที่ไม่ใช่ครีมเพชรเจือปน (ส่วนมากที่พบเป็นเศษของแผ่นซิลิกอนที่แตกระหว่างการขัด) จะทำให้ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนเกิดรอยขีดที่ไม่ใช่รอยที่เกิดจากครีมเพชรขึ้นมา ซึ่งเมื่อนำไปสร้างฟิล์มเพชรแล้ว บางครั้งจะเกิดผลึกเพชรเกาะตัวตามรอยเสียหายนี้ และไม่สามารถลอกออกได้ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างลวดลาย ตัวอย่างของความผิดพลาดกรณีนี้แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 5.36 ดังนั้นในกระบวนการเตรียมพื้นผิวจึงควรระมัดระวังอย่าให้มีรอยขีดนี้เกิดขึ้น

ความผิดพลาดอีกชนิดหนึ่งที่พบคือ ความผิดพลาดที่เกิดเนื่องจากขั้นตอนการเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ กล่าวคือในการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ หากใช้ระยะเวลาในการลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์นานเกินไปทำให้เกิดการเซาะซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณรอบ ๆ พื้นที่ของช่วงที่เปิด เมื่อเรานำชิ้นงานไปสร้างฟิล์มเพชร พบว่าจะมีฟิล์มเพชรเกิดลามออกมานอกวงลวดลายที่กำหนดไว้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.37

รูปที่ 5.34 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้เวลาสร้างฟิล์มเพชรนานเกินไป (30 นาที)



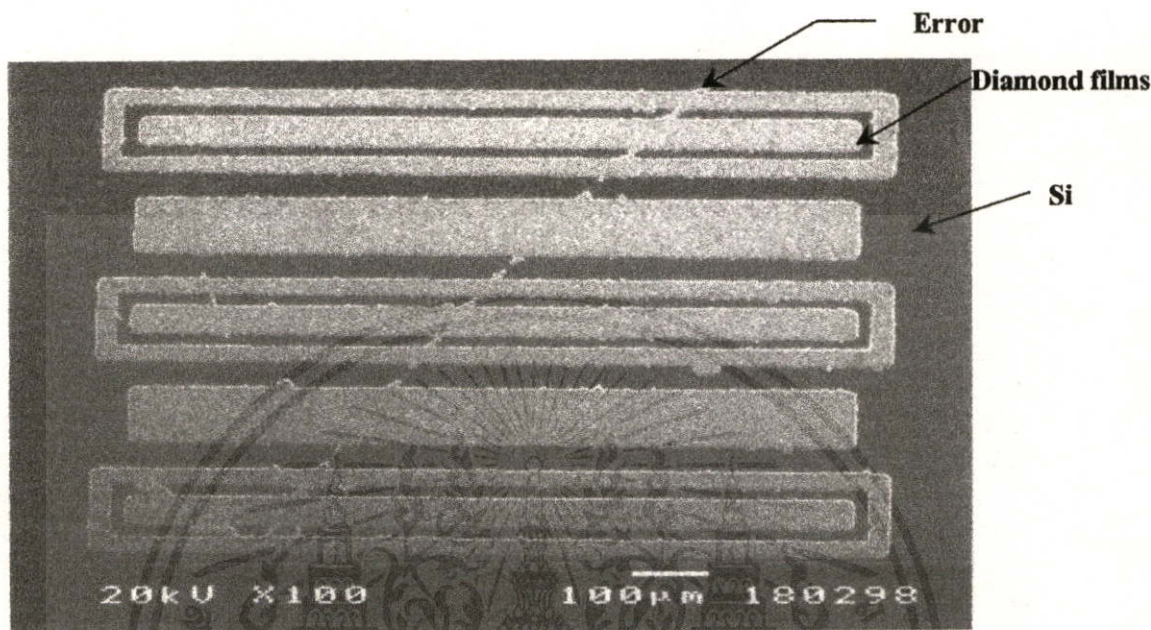
รูปที่ 5.35 แสดงตัวอย่างของลวดลายฟิล์มเพชรสร้างในอุณหภูมิที่ต่ำเกินไป (ประมาณ 930°C)



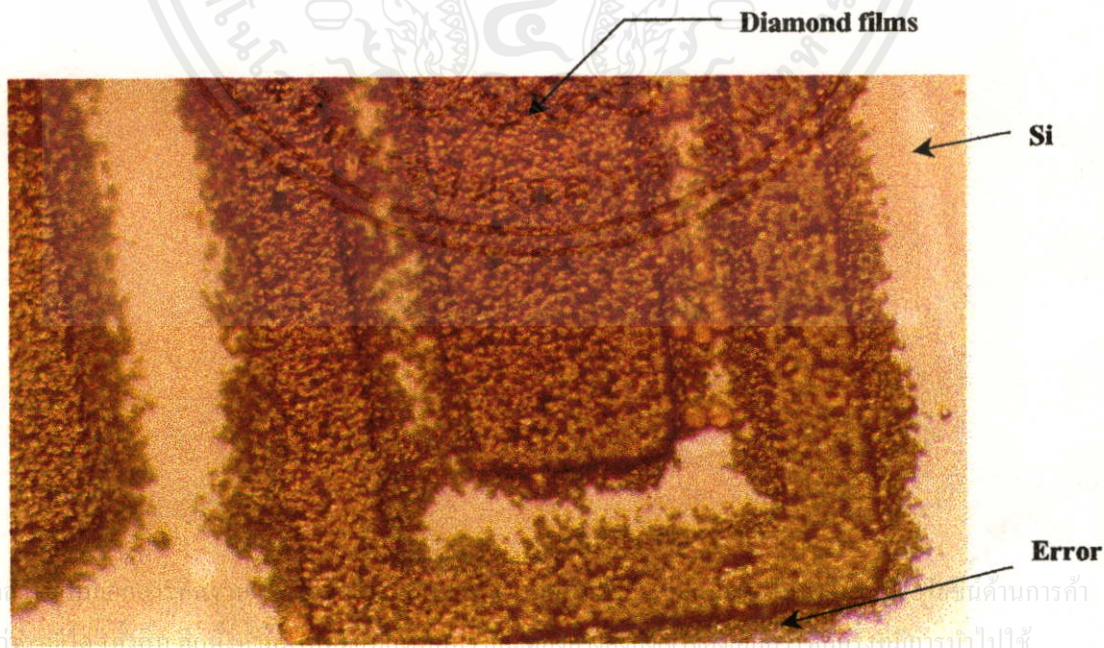
เอกสารนี้เป็น  
ไม่ว่ากรณีใด

ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า  
จึงได้มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.36 แสดงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นของลวดลายฟิล์มเพชรอันเกิดจากกระบวนการเตรียมพื้นผิวฐานรอง



รูปที่ 5.37 แสดงความผิดพลาดเนื่องจากการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ไม่คมชัด (กำลังขยาย 500 เท่า)



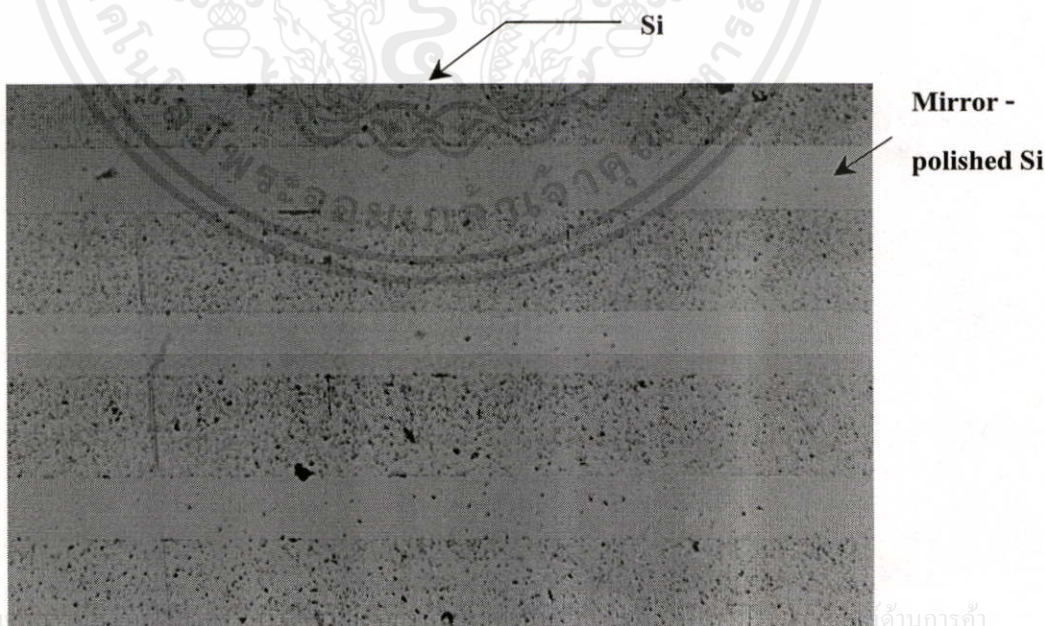
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

จากที่กล่าวมาทั้งหมด สรุปได้ว่าการสร้างฟิล์มเพชรให้เกิดเป็นลวดลายจำเป็นที่จะต้องพิถีพิถัน และควบคุมขั้นตอนต่าง ๆ ในการสร้างอย่างละเอียดรอบคอบ มิฉะนั้นแล้วผลที่ได้จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งจะไม่เป็นผลดีต่อการนำไปใช้งานต่อไป อย่างไรก็ตามหากมีการควบคุมขั้นตอนต่าง ๆ อย่างเหมาะสม ก็จะได้ฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่ต้องการเพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

#### 5.4.2 ผลจากการสร้างลวดลายฟิล์มเพชรโดยใช้ผิวกระจกของแผ่นซิลิกอนเป็นหน้าฉากป้องกัน

การสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้ จะใช้ชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมกระบวนการในหัวข้อที่ 4.6.2.2 มาทำการสร้างฟิล์มเพชรด้วยเงื่อนไขดังตารางที่ 5.1 จากผลการทดลองพบว่าเทคนิคการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้ไม่ได้ผลดีดังที่คาดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดความผิดพลาดขึ้นในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

**รูปที่ 5.38** แสดงชิ้นงานที่เตรียมพื้นผิว โดยเทคนิคการใช้ผิวกระจกของแผ่นซิลิกอนเป็นหน้าฉากป้องกันก่อนนำไปสร้างฟิล์มเพชร (กำลังขยาย 200 เท่า)



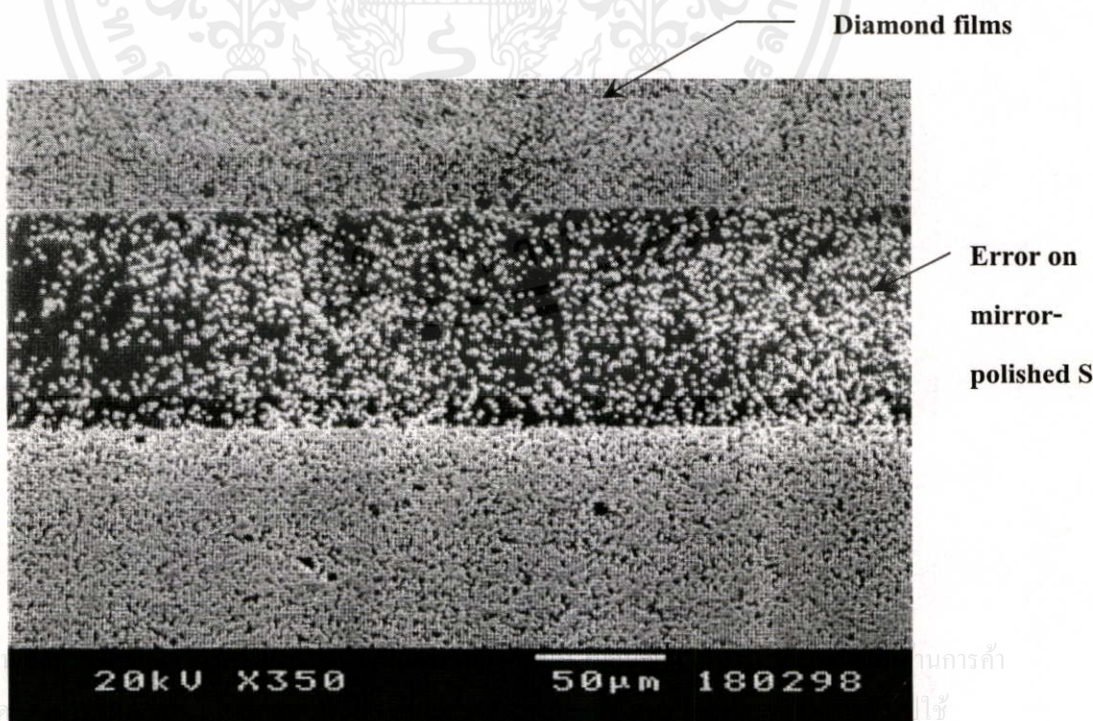
เอกสารนี้เป็น

ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.38 จะสังเกตได้ว่าผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนจะแบ่งออกเป็นสองส่วนอย่างเห็นได้ชัด ส่วนแรกเป็นบริเวณที่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น ผิวหน้าบริเวณนี้จะมีหลุมเล็กๆ ที่เกิดจากการอุลตราโซนิกในผงเพชรอย่างแน่นหนา ส่วนบริเวณที่สองเป็นบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น ซึ่งในเทคนิคนี้จะเป็นบริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกที่มีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาๆ (15,000 Å) สร้างคลุมไว้ก่อนการนำชิ้นงานไปอุลตราโซนิกในผงเพชร แต่จากภาพถ่ายที่แสดง พบว่าพื้นที่บริเวณนี้จะมีหลุมเล็กๆ ที่เกิดจากการกระแทกของผงเพชรอยู่บ้าง แต่ไม่หนาแน่นเท่าพื้นที่ในส่วนที่ต้องการให้มีฟิล์มเพชรเกิดขึ้น ซึ่งจุดนี้เองเป็นข้อผิดพลาดในการเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีนี้ ดังนั้นเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมแล้วไปสร้างฟิล์มเพชร ผลที่ได้จึงเกิดความเสียหายมากดังตัวอย่างในรูปที่ 5.39 แม้ว่า จะทดลองเพิ่มน้ำยาไวแสงที่เคลือบบนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ให้หนาขึ้นตาม แต่ในขั้นตอนการอุลตราโซนิกชิ้นงานในผงเพชร เพื่อเตรียมพื้นผิวฐานรอง จะพบว่าน้ำยาไวแสงที่เคลือบบนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หลุดออกมา ทำให้ไม่สามารถช่วยป้องกันข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

รูปที่ 5.39 แสดงชิ้นงานที่เตรียมพื้นผิวโดยเทคนิคการใช้ผิวกระจกของแผ่นซิลิกอนเป็นหน้าากปกป้องกันหลังจากผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรแล้ว



จะเห็นได้ว่าพื้นที่บริเวณที่เราไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชร จะมีผลึกเพชรเกิดขึ้นเต็มไปหมดแม้ว่าจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าภายในลวดลายที่ต้องการ แต่ผลึกเพชรที่เกิดขึ้นภายในบริเวณนี้ไม่สามารถกำจัดออกได้ ดังนั้นการสร้างลวดลายฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้จึงแทบจะไม่ได้ผลเลยเมื่อเทียบกับเทคนิคการใช้ชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกัน ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่ามาก

## 5.5 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ของผลึก และลักษณะของฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นได้ โดยทั่วไปแล้วมักใช้เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบระนาบที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จาก Bragg's law

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

จากการนำตัวอย่างฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นไปทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 5.40 สังเกตได้ว่ากราฟที่ได้จากการวัดแต่ละชั้นงานจะให้ยอดกราฟแตกต่างกันแล้วแต่ระนาบที่เกิดขึ้น สำหรับการคำนวณหาค่า interplanar spacing (d) แสดงให้เห็นได้ดังนี้

### ชั้นงานตัวอย่าง A

จากกราฟรูปที่ 5.40a พบว่ามียอดกราฟแรกที่ตำแหน่งมุม  $44^\circ$  นั่นคือ

$$2\theta = 44^\circ$$

$$\theta = 22^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และเนื่องจากค่าที่ได้จากการวัดเป็นค่าจากการเลี้ยวเบนลำดับแรก ( $n=1$ ) แหล่งจ่ายรังสีเอ็กซ์ที่ใช้เป็นของ  $\text{Cu}_{(\text{K}\alpha)}$  ซึ่งจะมีค่าความยาวคลื่น  $1.5418 \text{ \AA}$  นำค่าที่ได้แทนใน Bragg's law

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

$$d = \frac{1 \times 1.5418}{2 \times \sin 22^\circ} = 2.059 \text{ \AA}$$

ทำนองเดียวกัน ขอดกราฟที่ตำแหน่ง  $2\theta = 75.2^\circ$ ,  $\theta = 37.6^\circ$

$$\text{ดังนั้น} \quad d = \frac{1 \times 1.5418}{2 \sin 37.6^\circ} = 1.263 \text{ \AA}$$

และ ขอดกราฟที่ตำแหน่ง  $2\theta = 91.4^\circ$ ,  $\theta = 45.7^\circ$

$$\text{ดังนั้น} \quad d = \frac{1 \times 1.5418}{2 \sin 45.7^\circ} = 1.077 \text{ \AA}$$

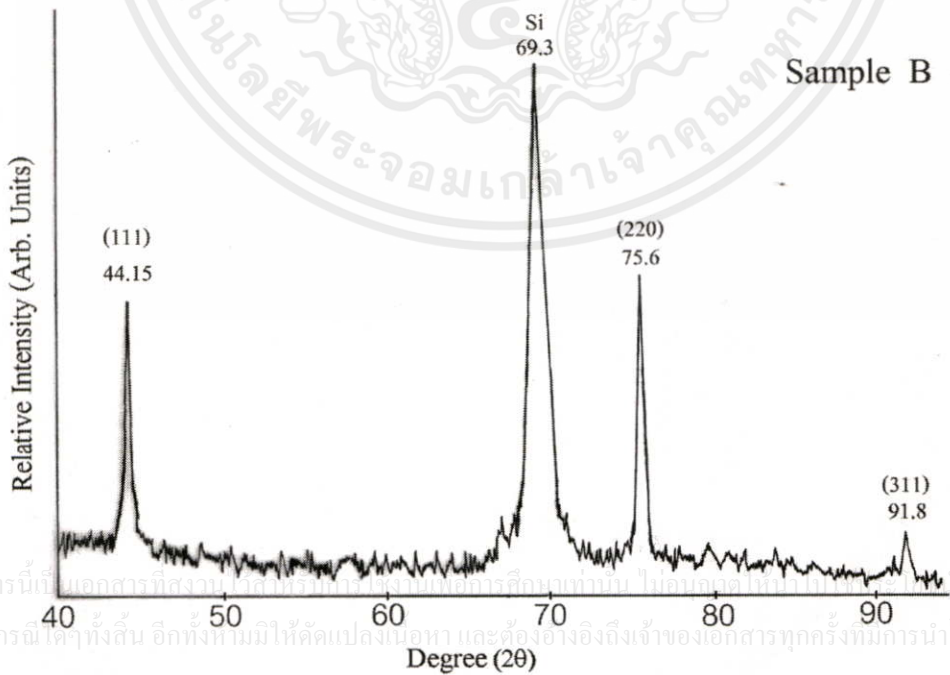
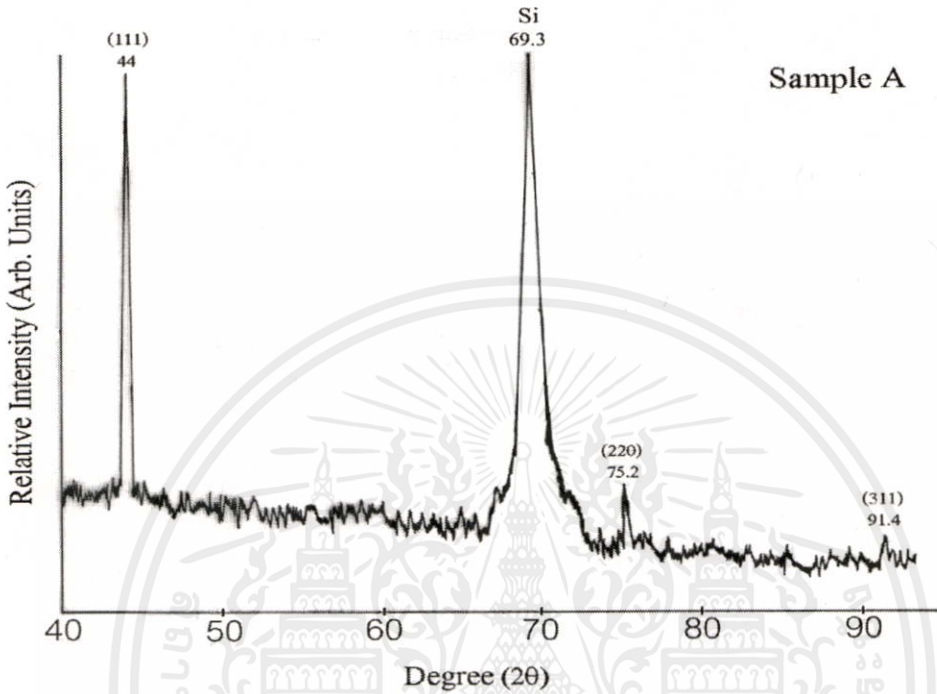
ซึ่งเมื่อเทียบค่า interplanar spacing ที่คำนวณได้กับค่ามาตรฐาน ASTM(6-675) พบว่าที่ค่า  $d \approx 2.059 \text{ \AA}$  จะมี Miller indices  $h, k, l$  เป็น 1, 1, 1 ส่วนที่ค่า  $d \approx 1.263 \text{ \AA}$  มีค่า  $h, k, l$  เป็น 2, 2, 0 และ  $d \approx 1.077 \text{ \AA}$  มีค่า  $h, k, l$  เป็น 3, 1, 1 ตามลำดับ สำหรับค่า interplanar spacing ที่คำนวณได้จากชั้นสารตัวอย่าง B แสดงได้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงค่า interplanar spacing ของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เทียบกับค่ามาตรฐาน ASTM(6-675)

ASTM 6-675		ชั้นงานตัวอย่าง	
(hkl)	Interplanar spacing (Å)	A	B
111	2.06	2.059	2.059
220	1.261	1.263	1.258
311	1.0754	1.077	1.073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง 311 มีให้คัดแปลง 1.0754 และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้

รูปที่ 5.40 แสดงผลจากการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชร  
(a) ชั้นงาน A และ (b) ชั้นงาน B



(b)

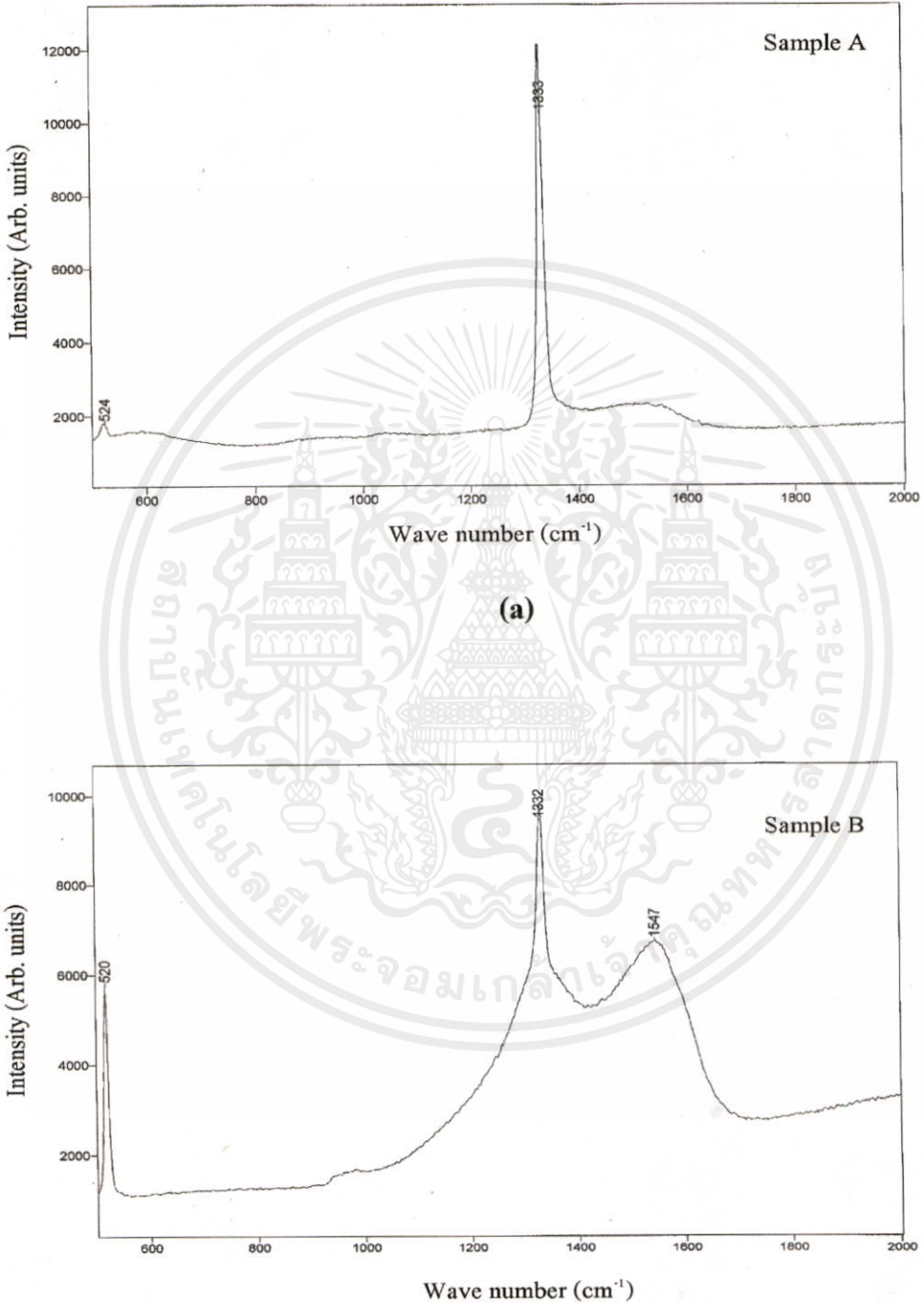
จากค่าในตารางที่ 5.4 พบว่าระนาบหลักของเพชรที่ตรวจสอบได้มี 3 ชนิดคือ ระนาบ (111), ระนาบ (220) และระนาบ (311) สังเกตได้ว่าระนาบของการเลี้ยวเบนจะเป็นจำนวนคู่หรือคี่ทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของเพชรมีลักษณะสมมูลเป็นผลึกแบบ cubic และจากกราฟ 5.40a และ 5.40b จะพบยอดของกราฟที่ตำแหน่งมุม  $2\theta = 69.3^\circ$  อย่างชัดเจน เมื่อคำนวณหาค่า interplanar spacing ของมุมดังกล่าวจะได้ค่า 1.36 ซึ่งจากค่ามาตรฐาน ASTM พบว่าเป็นของซิลิกอนระนาบ {100} ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จากการทดลองเป็นสวดลสายของฟิล์มเพชร ดังนั้นจึงมียอดกราฟของซิลิกอน ซึ่งเราใช้เป็นฐานรองปรากฏออกมาด้วยทุกครั้ง

## 5.6 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

การวัดคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ส่วนมากแล้วมักจะใช้ในการตรวจสอบพันธะของคาร์บอน ดังนั้นผลที่ได้สามารถแยกชนิดของคาร์บอนได้ว่าเป็นเพชร, กราไฟต์, amorphous carbon และ diamond-like carbon ได้ โดยแสดงผลออกมาเป็น Raman spectrum สำหรับเพชรธรรมชาติแล้วจะมี Raman spectrum ที่ตำแหน่ง  $1332 \text{ cm}^{-1}$  ส่วนฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน จะมียอดสูงสุดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับค่า  $1332 \text{ cm}^{-1}$  และมีอีกยอดหนึ่งเป็นแถบความกว้างบริเวณตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $1500 \text{ cm}^{-1}$  อันเป็นค่า Raman spectrum ของ microcrystalline graphite, amorphous carbon, diamond-like carbon หรือ graphite อันเป็นสิ่งที่พบเป็นปกติในเพชรที่สังเคราะห์ขึ้น คุณภาพของเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นอาจพิจารณาได้จากปริมาณของสิ่งเหล่านี้ว่ามีมากหรือน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับเพชรที่เกิดขึ้น สำหรับตัวอย่างของชิ้นงาน A และ B ฟิล์มเพชรถูกสร้างขึ้นโดยมีอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนผ่านเอททิลแอลกอฮอล์ 14% โดยปริมาตร อุณหภูมิฐานรองประมาณ  $950^\circ\text{C}$  เท่ากัน แต่ในชิ้นงาน A จะใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที ในขณะที่ชิ้นงาน B จะใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที ส่วนชิ้นงาน C จะแตกต่างตรงที่อุณหภูมิฐานรองจะต่ำกว่าชิ้นงาน A และ B คือประมาณ  $930^\circ\text{C}$  และใช้เวลาในการสร้าง 15 นาทีเท่านั้น ซึ่งผลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ของชิ้นงานดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 5.41

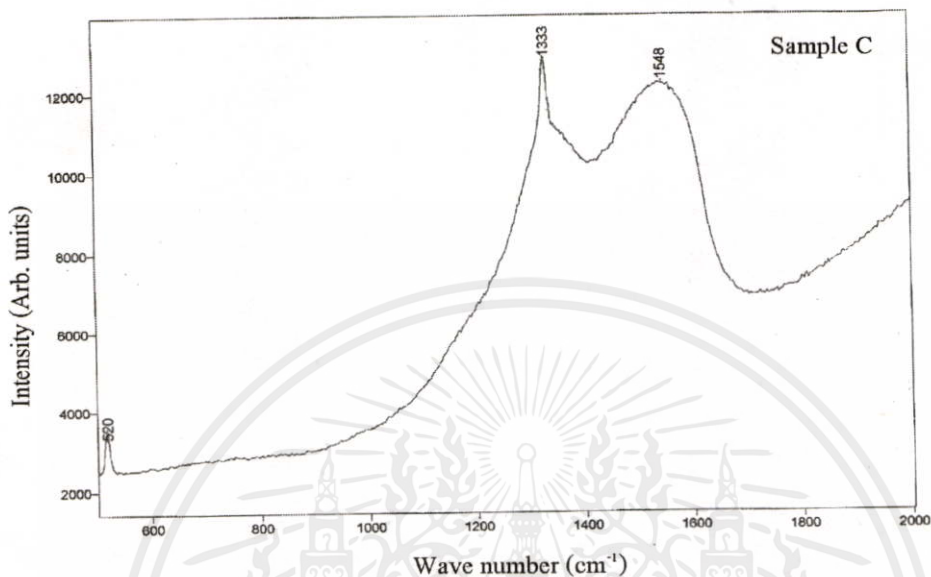
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.41 แสดงตัวอย่างของ Raman spectrum ที่ได้จากการวัดชิ้นงานตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (b) กษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.41 (ต่อ) แสดงตัวอย่างของ Raman spectrum ที่ได้จากการวัดชิ้นงานตัวอย่าง



(c)

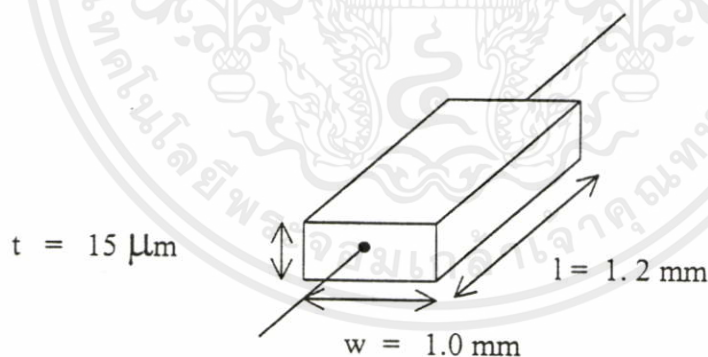
เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 5.41 จะเห็นว่า Raman spectrum ที่ได้มียอดคลื่นอยู่ 2 ตำแหน่งคือ  $524 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1333 \text{ cm}^{-1}$ , และแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ  $1550 \text{ cm}^{-1}$  โดยตำแหน่งยอดคลื่นที่  $524 \text{ cm}^{-1}$  จะใกล้เคียงกับตำแหน่ง Raman spectrum ของซิลิกอน ( $520 \text{ cm}^{-1}$ ) ส่วนที่ตำแหน่ง  $1333 \text{ cm}^{-1}$  แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ สำหรับยอดที่ตำแหน่ง  $1550 \text{ cm}^{-1}$  บอกให้ทราบว่าฟิล์มเพชรที่สร้างได้มี amorphous carbon หรือ diamond-like carbon ปะปนบ้างเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับ Raman spectrum ของชิ้นงาน B พบว่ายอดคลื่นสูงสุดที่ได้อยู่ที่ตำแหน่ง  $1332 \text{ cm}^{-1}$  ส่วนยอดที่ตำแหน่ง  $1547 \text{ cm}^{-1}$  มีค่าความเข้มสูงกว่ายอดคลื่นที่ตำแหน่ง  $1550 \text{ cm}^{-1}$  ของชิ้นงาน A มาก หมายความว่าฟิล์มเพชรในชิ้นงาน B มีคุณภาพไม่ดิ่งนักเมื่อเทียบกับฟิล์มเพชรในชิ้นงาน A ส่วนที่ค่า Raman spectrum ของซิลิกอนในชิ้นงาน B มีค่าสูงกว่าชิ้นงาน A อาจเป็นเนื่องมาจากฟิล์มเพชรในชิ้นงาน B ใช้เวลาในการสร้างน้อยกว่าฟิล์มเพชรในชิ้นงาน A ดังนั้นฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นจะบางกว่าฟิล์มเพชรในชิ้นงาน A จนลำแสงเลเซอร์ส่องทะลุไปถึงซิลิกอนได้ สำหรับฟิล์มเพชรในชิ้นงาน C เป็นการสร้างที่เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองต่ำกว่าชิ้นงาน A และ B ซึ่งจากการตรวจสอบด้วย SEM พบว่าฟิล์มมีลักษณะแบบ cauliflower ซึ่งจาก Raman spectrum ที่ได้พบว่าความเข้มของกราฟที่ตำแหน่ง  $1333 \text{ cm}^{-1}$  มีค่ามากกว่าความเข้มของกราฟที่ตำแหน่ง  $1548 \text{ cm}^{-1}$  เพียงเล็กน้อยเท่านั้น นั่นหมายความว่าฟิล์มเพชรของชิ้นงาน C มีคาร์บอนที่จับตัวเป็นพันธะ

แบบ  $sp^2$  ประเภท amorphous carbon หรือ diamond-like carbon ปะปนอยู่ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับอะตอมคาร์บอนที่จับตัวเป็นเพชร ดังนั้นฟิล์มเพชรในชั้นงาน C มีคุณภาพแย่มากในบรรดาตัวอย่างทั้งหมด ส่วนฟิล์มเพชรในชั้นงาน A และ B มีคุณสมบัติเป็นเพชรทั้งคู่โดยฟิล์มเพชรชั้นงาน A จะมีความดีกว่าฟิล์มเพชรในชั้นงาน B

## 5.7 การวัดผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำจริง ฟิล์มเพชรจะถูกสร้างเป็นตัวต้านทานโดยใช้เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายในการกำหนดขนาดของฟิล์มเพชรที่ต้องการ ดังโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 5.42

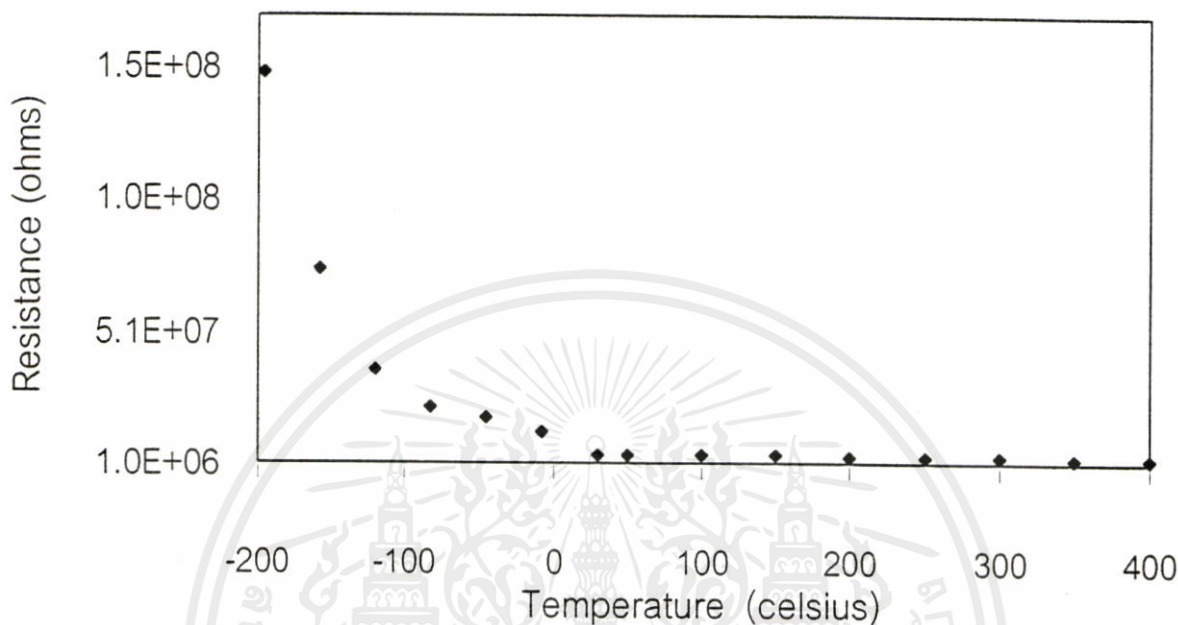
รูปที่ 5.42 แสดง โครงสร้างของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร



โดยตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้ จะมีค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง ( $30^\circ\text{C}$ ) เท่ากับ  $4.4 \text{ M}\Omega$  จากนั้นทำการแปรค่าอุณหภูมิตั้งแต่  $-196^\circ\text{C}$  ถึง  $400^\circ\text{C}$  เพื่อดูค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ดังผลที่แสดงในกราฟรูปที่ 5.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

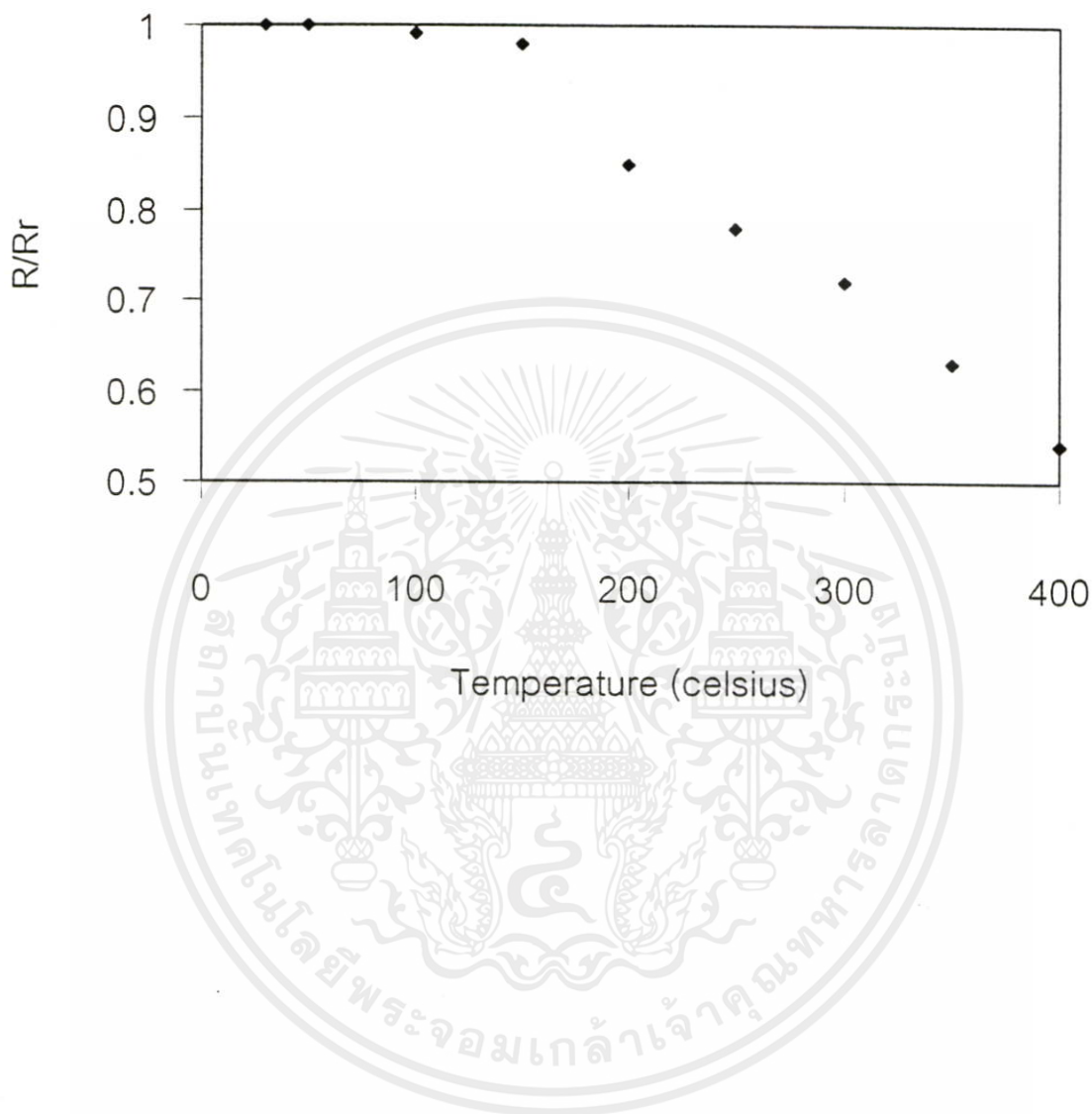
รูปที่ 5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ



จากรูปที่ 5.43 พบว่าตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชรแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ นั่นคือที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (ต่ำกว่า  $30^{\circ}\text{C}$ ) ค่าความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำการวัดคือ  $-196^{\circ}\text{C}$  คือมีค่าสูงถึง  $148.54\text{ M}\Omega$  และในทางกลับกัน ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง (สูงกว่า  $30^{\circ}\text{C}$ ) ค่าความต้านทานแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งอุณหภูมิตั้งแต่  $150^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไปค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น  $2.39\text{ M}\Omega$  ที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  จากข้อมูลที่ได้พบว่าฟิล์มเพชรประพฤติตัวเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำทั่วไปที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและความต้านทานลดลงที่อุณหภูมิสูง

เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชรสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $R/R_r$  กับอุณหภูมิจะแสดงในรูปที่ 5.44 เมื่อ  $R$  คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ และ  $R_r$  คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง ( $30^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งจากกราฟจะพบว่าอัตราส่วน  $R/R_r$  แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิตั้งแต่  $30^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $150^{\circ}\text{C}$  โดยที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นเครื่องยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชรสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่าตัวต้านทานที่สร้างจากซิลิกอนที่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน  $150^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น [9] รั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน  $R/R_r$  กับอุณหภูมิ ( $30^{\circ}\text{C}$  ถึง  $400^{\circ}\text{C}$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์

ผลการวิจัยที่น่าเสนอนี้เป็นการศึกษาถึงการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่กำหนด เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำฟิล์มเพชรไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ต่อไป ฟิล์มเพชรถูกสร้างด้วยระบบ CVD แบบความร้อน โดยมีไอระเหยของเอททิลแอลกอฮอล์ในก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งจ่าย ปฏิกริยาทางเคมีถูกกระตุ้นโดยพลังงานความร้อนจากไส้หลอดทั้งสแตนด์ ทำให้เกิดฟิล์มเพชรบนฐานรอง ฐานรองจะถูกเตรียมพื้นผิวเพื่อเร่งให้เกิดการนิวเคลียสของเพชร ดังนั้นใน ส่วนแรกของงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงการนิวเคลียสของฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กันทั้งหมด 7 วิธีคือ 1. ชัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25\ \mu\text{m}$  2. ชัดด้วยครีมเพชรขนาด  $1\ \mu\text{m}$  3. ชัดด้วยครีมเพชรขนาด  $5\ \mu\text{m}$  4. อุลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05\ \mu\text{m}$  5. อุลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5\ \mu\text{m}$  6. ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจก และ 7. ผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ โดยทำการสร้างฟิล์มเพชรด้วยเงื่อนไขเดียวกันที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน ซึ่งผลการทดลองพบว่า กรณีพื้นผิวฐานรองที่ถูกขัดด้วยครีมเพชร หรืออุลตราโซนิกในผงเพชร ผิวหน้าของฐานรองที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25\ \mu\text{m}$  จะมีความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรสูงที่สุด (ประมาณ  $1.99 \times 10^8/\text{cm}^2$ ) ทำให้ใช้ระยะเวลาในการสร้างฟิล์มเพชรน้อยที่สุด (ประมาณ 10-15 นาที) ส่วนผิวหน้าของฐานรองที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $1\ \mu\text{m}$ , อุลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.05\ \mu\text{m}$  และอุลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5\ \mu\text{m}$  จะมีค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสน้อยกว่ากรณีการขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25\ \mu\text{m}$  คือมีค่า  $2.1 \times 10^7/\text{cm}^2$ ,  $1.2 \times 10^7/\text{cm}^2$  และ  $8.3 \times 10^6/\text{cm}^2$  ตามลำดับ ทำให้ใช้เวลาในการเกิดฟิล์มเพชรนานประมาณ 45-60 นาที โดยผิวหน้าที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $5\ \mu\text{m}$  จะมีค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรต่ำที่สุดคือ มีค่าเพียง  $6.0 \times 10^6/\text{cm}^2$  ใช้เวลาในการเกิดฟิล์มเพชรนานที่สุดคือประมาณ 75 นาที สำหรับกรณีผิวหน้าของฐานรองที่มีความเรียบ (ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ หรือผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา) พบว่ามีค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสต่ำคือมีค่าเพียง  $7.52 \times 10^3/\text{cm}^2$  และ  $6.8 \times 10^3/\text{cm}^2$  ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์ได้มีลักษณะไม่เป็นฟิล์มมากนัก

ผลการทดลองเบื้องต้นจะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการสร้างฟิล์มเพชรให้เป็นสวดลาย โดยในการสร้างสวดลายฟิล์มเพชรจำเป็นต้องสร้างความแตกต่างของการนิเวศของชั้นของเพชรระหว่างพื้นที่บริเวณที่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรกับพื้นที่บริเวณที่ไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรให้มากที่สุด ดังนั้นในการสร้างสวดลายฟิล์มเพชรจะเลือกใช้การเตรียมพื้นผิวฐานรอง โดยการขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25 \mu\text{m}$  และอุตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5 \mu\text{m}$  โดยสวดลายที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรถูกออกแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบวงจรรพื้นฐาน คือค่าขนาดความกว้างต่ำที่สุด และระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของสวดลายฟิล์มเพชร กระบวนการทดลองสร้างฟิล์มเพชรให้เป็นสวดลายจะมี 2 วิธีคือ 1. ใช้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกันการเกิดฟิล์มเพชร และ 2. ใช้ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงาป้องกันการเกิดฟิล์มเพชร โดยในวิธีแรกจะแปรค่าความหนาของ ซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อนไม่สามารถใช้ในการสร้างสวดลายฟิล์มเพชรได้ เนื่องจากผลที่เกิดขึ้นพบว่า เกิดผลึกเพชรขึ้นบนซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ ในจำนวนใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อเทียบกับชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง พบว่าได้ผลดีกว่ามาก คือเกิดฟิล์มเพชรบนซิลิกอนและเกิดผลึกเพชรกระจายในปริมาณเพียงเล็กน้อยบนซิลิกอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าสวดลายของฟิล์มเพชรจะมีค่าความผิดพลาดน้อยเมื่อความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีความหนาตั้งแต่  $5000 \text{ \AA}$  ขึ้นไป แต่ถ้าหากความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าน้อย (ต่ำกว่า  $5000 \text{ \AA}$  ลงมา) จะพบความผิดพลาดเนื่องจากการเกิดฟิล์มเพชรเกินออกจากสวดลายที่กำหนด ส่วนวิธีสร้างสวดลายฟิล์มเพชรโดยใช้ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงาป้องกันการเกิดฟิล์มเพชร ผลการทดลองที่ได้พบว่าเกิดความผิดพลาดสูงมากจนไม่สามารถยอมรับได้ เมื่อเทียบกับวิธีใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกัน ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้เป็นข้อผิดพลาดที่เกิดจากขั้นตอนการอุตราโซนิกในผงเพชร ปรากฏว่าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างทับผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงาไม่สามารถป้องกันการกระแทกจากผงเพชรได้ทำให้เกิดหลุมเล็ก ๆ บริเวณนี้ด้วย เมื่อนำไปสร้างฟิล์มเพชรจึงเกิดผลึกเพชรขึ้นมาจำนวนมาก และไม่สามารถที่จะกำจัดออกได้ ดังนั้นการสร้างสวดลายฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่ไม่ประสบผลสำเร็จ เมื่อเทียบกับวิธีการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากาก ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งที่พบคือ ถึงแม้ว่าเราสามารถป้องกันไม่ให้เกิดรอยกระแทกบนผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองหาความหนาแน่นการนิเวศของชั้นที่กล่าวมาแล้วในส่วนแรก พบว่ายังมีโอกาสที่จะเกิดผลึก หรือฟิล์มเพชรบนผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดมันอยู่ ซึ่งผลึกเพชรหรือฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถถูกกำจัดออกได้เมื่อเทียบกับผลึกเพชรหรือฟิล์มเพชรที่

เกิดบนชั้นซลิคอน ไดออกไซด์ที่ยังสามารถลอกออกได้ ดังนั้นเทคนิคการใช้ผิวกระจกเป็นพื้นที่ที่ไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรจึงเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพไม่ดันทกเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ

จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของลวดลายฟิล์มเพชรได้ผลดังนี้ คือ ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชรมีค่า  $5 \mu\text{m}$  ขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลายฟิล์มเพชร  $10 \mu\text{m}$  ความผิดพลาดในการเกิดฟิล์มเพชรนอกเหนือลวดลายมีค่าสูงสุดประมาณ 23.5% สำหรับขนาดความกว้างของลวดลายต่ำสุด  $10 \mu\text{m}$  และความผิดพลาดของค่าระยะห่างใกล้ที่สุดของลวดลายฟิล์มเพชรมีค่าสูงสุดประมาณ 15.3% สำหรับระยะห่างระหว่างลวดลายที่ใกล้ที่สุด  $5 \mu\text{m}$  ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดนี้จะลดลงเมื่อขนาดความกว้างของลวดลายหรือระยะระหว่างฟิล์มเพชรมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรเป็นไปตามตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชร

อุณหภูมิใส่หลอด	$\approx 2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิฐานรอง	$\approx 950 \text{ }^{\circ}\text{C}$
อัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนที่ไหลผ่านเอททิลแอลกอฮอล์	14 % โดยปริมาตร
ความดัน	1 atm
ระยะห่างระหว่างใส่หลอดกับฐานรอง	1.0 – 1.2 mm
เงื่อนไขการเตรียมพื้นผิวฐานรอง	ขัดด้วยครีมเพชรขนาด $0.25 \mu\text{m}$
กระบวนการสร้างชั้นซลิคอนไดออกไซด์	สปีดเตอร์ริง
ความหนาของชั้นซลิคอนไดออกไซด์	$5000 \text{ \AA}$ ขึ้นไป
ระยะเวลาที่ใช้สร้าง	13 – 20 นาที
ความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้	$2 - 3 \mu\text{m}$

สำหรับการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ อีก 4 ชนิดที่เหลือ ผลการทดลองพบว่าลวดลายของฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไม่ดีมากนัก เนื่องจากต้องใช้เวลาในการสร้างฟิล์มเพชรนาน ทำให้มีโอกาสเกิดฟิล์มเพชรหรือผลึกเพชรบริเวณที่ไม่ต้องการสูง อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังไม่สามารถยืนยันผลได้หลังจากการสร้างแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำไปตรวจสอบด้วยภาพถ่าย SEM เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความหนาของฟิล์มเพชร, ระยะห่างระหว่างลวดลาย, ความผิดพลาดของลวดลาย

ฟิล์มเพชร ตลอดจนลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น จากนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบถึงระนาบของฟิล์มเพชร เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะถูกนำมาตรวจสอบเพื่อศึกษาถึงระนาบของฟิล์มเพชรที่เกิด ผลจากการวัดพบว่า ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีระนาบหลัก 3 ระนาบคือ ระนาบ (111) ระนาบ (220) และระนาบ (311) ซึ่งเมื่อตรวจสอบลักษณะของฟิล์มเพชรจากภาพถ่าย SEM จะเห็นระนาบ (111) และ(311) เป็นรูปสามเหลี่ยม และระนาบ (220) เป็นรูปสี่เหลี่ยม นอกจากนี้แล้วเทคนิค Raman spectroscopy ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบคุณภาพของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น โดยคุณภาพของฟิล์มเพชรจะวิเคราะห์ได้จากความแตกต่างระหว่างความเข้มของยอดกราฟที่ตำแหน่งของเพชร (ประมาณ  $1332\text{ cm}^{-1}$ ) กับความเข้มของยอดกราฟที่ตำแหน่งของคาร์บอนที่มีโครงสร้างไม่ใช่เพชร ซึ่งผลที่ได้จากการวัดยอดกราฟอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ  $1550\text{ cm}^{-1}$  อันเป็นตำแหน่งของ amorphous carbon หรือ diamond-like carbon จากการวิเคราะห์พบว่าถ้าเวลาที่ใช้ในการสร้างน้อยเกินไป (ชิ้นงาน B) คุณภาพของฟิล์มเพชรที่ได้ไม่ดีนัก แต่หากระยะเวลาเหมาะสมแล้วจะได้ฟิล์มเพชรคุณภาพดี (ชิ้นงาน A) ส่วนชิ้นงาน C เป็น Raman spectrum ของตัวอย่างฟิล์มที่สร้างที่อุณหภูมิต่ำเกินไป ซึ่งจะพบว่ามีจำนวนของ amorphous carbon หรือ กราไฟต์ปะปนอยู่จำนวนมาก จึงเป็นฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพไม่ดีนัก นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจสอบว่าฟิล์มเพชรที่สร้างมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำหรือไม่ โดยทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิตั้งแต่  $-196^{\circ}\text{C}$  ถึง  $400^{\circ}\text{C}$  พบว่าที่อุณหภูมิต่ำฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานสูงและ ที่อุณหภูมิสูงฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติโดยทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ อีกทั้งจากการทดลองยังพบอีกว่าความต้านทานของฟิล์มเพชรแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลยที่อุณหภูมิห้อง ( $30^{\circ}\text{C}$ ) ถึง  $150^{\circ}\text{C}$  จึงเป็นเครื่องยืนยันว่าฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีเสถียรภาพดีที่อุณหภูมิสูงถึง  $150^{\circ}\text{C}$

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากฟิล์มเพชรตัวอย่างเช่น ตัวต้านทาน, เทอร์มิสเตอร์ หรือนำไปสร้างเป็นเซ็นเซอร์ชนิดต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรคือ ใต้ทั้งสแตมเมื่อใช้ไปนาน ๆ จะเกิดการเสีรูปร่างไป และเปราะหักง่าย และควรระวังไม่ให้มีรอยเสียหายบริเวณผิวหน้าแผ่นซิลิกอนอันเกิดจากเศษของแผ่นซิลิกอนที่แตกขณะขัดด้วยคริมเพชร ซึ่งอาจทำให้เกิดฟิล์มเพชรตามแนวเสียหายนี้ ทำให้ลวดลายที่ออกแบบไว้เกิดการชอร์ตถึงกันได้ ข้อสังเกตที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือ ภายหลังจากสร้างฟิล์มเพชรเสร็จแล้ว พบว่าชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์จะมีความหนาน้อยกว่าเดิม ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าขณะทำการสร้างฟิล์มเพชรชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บางส่วนจะถูกลอกออกในพลาสมาของก๊าซไฮโดรเจน ส่วนสาเหตุที่แท้จริงจะเกิดจากอะไรนั้นเป็นเรื่องที่น่าสนใจศึกษาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น หากมีการนำออกไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] นริศ จันทร์แดง, “การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชร”, วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538.
- [2] กอบศักดิ์ ศรีประภา, ไมตรี สระทองรอด, นิรุช ปิ่นเกตุ, ผศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง, “การกำหนดพื้นที่ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD แบบความร้อน”, ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20, พ.ศ. 2540.
- [3] สมเกียรติ สุขเดช, “อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2521.
- [4] K. E. Spear, J. P. Dismukes, “Synthetic Diamond : Emerging CVD Science and Technology”, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1994.
- [5] R. F. Davis, “Diamond Films and Coating”, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey 1993, U.S.A.
- [6] “Diamond Films for Electronic Packing”, NASA, USA.
- [7] M. Barbara, “Diamond Thin Film Capacitors Demonstrate Large Capacitance/High Temperature Capability”, Wright Laboratory, USA
- [8] Z.L. Tolt, R.L. Fink “The Status and Future of Diamond Thin Film FED”, Si Diamond Technology, USA.
- [9] L. S. Pan , D. R. Kania, “Diamond Electronic Properties and applications”, Kluwer Academic publishers, London, 1995.
- [10] H. Liu and D. Sdandy, “Studies on Nucleation Process in Diamond CVD : An Overview of Recent Development”, Department of Chemical Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, U.S.A.
- [11] D.S. Dandy, M.E. Coltrin, “Diamond Thin Films Handbook”, Mareel Dekker, Inc., USA.
- [12] W.Maly, “Atlas of IC Technology”, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.

- [13] S. Mirzakuchaki, M. Hajsaid, H. Golestanian, R. Roychoundhury, E. J. Charison, E. M. Charison, and T. Stacy, **“Selective area deposition of diamond thin films on patterns of porous silicon by hot-filament chemical vapor deposition”**, Appl. Phys. Lett. 67 (24), 1995, pp. 3557-3559.
- [14] M. Iida, Y. Akiba, T. Kurosu, Y. Hirose and Y. Matsumae, **“Selective Deposition of Diamond Film on Mirror Polished Si-Water”**, Tokai University .
- [15] J. Narayan and X. Chen, **“Laser patterning of diamond films”**, J. appl. Phys., Vol 71 (8), 15 April 1992, pp 3795-3801.
- [16] J. Sheng Ma, H. Kawarada and T. Yonehara, **“Nucleation control and Selective growth of diamond particles formed with plasma CVD ”**, J. of crystal Growth, 99 (1990), pp. 1206-1210.
- [17] T. Inoue, H. Tachibana, K. Kumagai, K. Miyata, K. Nishimura, K. Kobashi, and A. Nakaue, **“Selected-area deposition of diamond films”**, J. Appl. Phys. 67 (12), 1990, pp. 7329-7336.
- [18] J. Sheng Ma, H. Kawarada, T. Yonehara, J. Suzuki, J. Wei, Y. Yokota and A. Hiraki, **“Selective nucleation and growth of diamond particles by plasma-assisted chemical vapor deposition”** Appl. Phys. Lett, 55 (11), 11 September 1989, pp. 1071-1073.
- [19] J. L. Davidson, C. Ellis and R. Ramesham, **“ Selective deposition of Diamond Films”**, J. of Electronic Materials, Vol. 18, No. 6, 1989, pp. 711-715.
- [20] X. Jiang, E. Boettger, M. Paul and C.-P. Klages, **“Approach of selective nucleation and epitaxy of diamond films on Si(100)”**, Appl. Phys. Lett. 65(12), 1994, pp. 1519-1521.
- [21] R. Ramesham and C. Ellis, **“ Selective growth of diamond crystal on the apex of silicon pyramids”**, Electrical Engineering Department, Alabama Microelectronics Science and Technology Center, Auburn University, Auburn, AL 36849-5201, U.S.A.
- [22] R. Ramesham, **“Selective Growth of Polycrystalline Diamond Thin Films”**, Electrical Engineering Department, Alabama Microelectronics Science and Technology Center, Auburn University, Auburn, AL 36849-5201, U.S.A.
- [23] R. Ramesham and T. Roppel, **“Selective growth of polycrystalline diamond thin films on a variety of substrates using selective damaging by ultrasonic agitation”**, J. Mater. Res. 7, (1992) 1144.

- [24] K. Hirabayashi, Y. Taniguchi, O. Takamatsu, T. Ikeda, K. Ikama and N. Iwasaki-kurihara, **“Selective deposition of diamond crystal chemical vapor deposition using a tungsten-filament method”**, Appl. Phys. Lett., 53 (19), 7 November 1988, pp. 1815-1817.
- [25] P. W. May, **“CVD Diamond a new Technology for the Future ?”**, Endeavour magazine 19 (3), 1995, pp. 101-106.
- [26] W. Zhu, B. R. Stoner, B. E. Williams and J. T. Glass, **“Growth and Characterization of Diamond Films on Nondiamond Substrates for Electronic Applications”**, Proceedings of the IEEE, vol. 79, May 1991, No. 5, pp. 621-642.
- [27] J. E. Field, **“The Properties of Diamond”**, Academic Press, London, 1979.
- [28] M. W. Geis and John C. Angus, **“Diamond Film Semiconductors”**, Scientific American, October 1992, pp. 64-69.
- [29] C. Kittel, **“Introduction to solid state physics”**, John Wiley & Sons, New York, Sixth Edition.
- [30] W. A. Yarbrough and R. Messier, **“Current Issues and Problems in the Chemical Vapor Deposition of Diamond”**, Science, vol. 247 February 1990, pp. 688-696.
- [31] C.-P. Chang, D. L. Flamm, D. E. Ibbotson and J. Amucha **“Diamond crystal growth by plasma chemical vapor deposition”**, J. Appl. Phys. 63(5), 1988, pp. 1744-1748.
- [32] M. Iida, **“Diamond Film Electronic Devices”**, Department of Electronics, School of Engineering, Tokai University, Japan.
- [33] กอบศักดิ์ ศรีประภา, นิรุช ปั่นเกตุ, พิระวุฒิ ชินวรรังสี, วิหิต ทักษิณาวาริน และ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง, **“ผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองที่มีต่อการนิเวศลิเอชันของฟิล์มเพชร”**, ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, พ.ศ. 2541.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities [5]

Material	Conductivity (Watts/cm.°C)
Diamond (Type II)	20.00
Boron nitride (theory)	13.00
Beryllium oxide	3.70-5.90
Water	5.61
Silicon carbide	4.90
Silver	4.18
Copper	3.80
Aluminum nitride	3.70
Gold	3.11
Aluminum	2.38
Tungsten	1.70
Silicon	1.50
Oil, Transformer	1.36
Iron	0.82
Graphite	0.80-2.50
Palladium	0.70
Platinum	0.69
Tin	0.65
Gallium arsenide	0.46
Germanium	0.28
Titanium	0.20
Quartz	0.07-0.14
Indium arsenide	0.07

ตาราง ก-2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal expansion Coefficients [5]

Material	Coefficient ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
Silicon dioxide	0.5
INVAR (18-100/ $^{\circ}\text{C}$ )	0.64
Diamond (300K)	0.8
Diamond (193K)	0.4
Diamond (400-1,200K)*	1.5
Silicon	2.6
Aluminum nitride	4.5
Tungsten (polycrystal)	4.5
Sapphire	5.5
Germanium	5.7
Gallium arsenide	5.9
Beryllium oxide	5.9
YAG	7.8
Graphite (in plane)	8.8
Platinum (polycrystal)	8.9
Magnesium oxide	11.0
Gold (polycrystal)	14.1
Graphite (along c axis)	27.3

\* Gruneisen's law obeyed in this region

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity [5]

Material	Capacity (Joules/moles- <sup>o</sup> C)
Silver	25.50
Gold	25.41
Copper	24.50
Aluminum	24.37
Silicon	19.85
Graphite	8.54
Diamond	6.19
Water	4.22
BeO 0.74 cal/cc Sapphire 0.69 cal/cc Si 0.42 cal	

ตาราง ก-4 แสดงการเปรียบเทียบค่า Hardness

Material	Knoop Hardness (Kg/mm <sup>2</sup> )(298K)
Diamond	5,700-10,400
Cubic BN	4,500
Boron carbide	2,250
Tungsten carbide	2,190
Titanium carbide	2,190
Aluminum oxide	2,000
Silicon carbide	1,875-3,980
Titanium nitride	1,800
Case hardened steel	800
High carbon steel	400
Copper	40

ตาราง ก-5 แสดงการเปรียบเทียบค่า Sound velocities (m/s) [5]

Material	Longitudinal	Shear
Diamond	18,000	*
Boron	15,000	*
Beryllium	12,890	8,880
Silicon carbide	11,400	*
Silicon	7,500	*
Boron nitride	7,000	*
Tungsten carbide	6,900	*
Aluminum	6,420	3,040
Nickel	6,040	3,000
Aluminum nitride	5,500	*
Tungsten	5,220	2,890
Copper	4,760	2,325
Gold	3,240	1,200
Water	1,498	(n/a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-6 แสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus [5]

Material	Value ( $\times 10^{11}$ dynes/cm <sup>2</sup> )
Diamond	105.0
Tungsten	34.0
Steel	17.2-20.5
Ferrites (most)	15.0
Platinum	14.7
Cast iron	13.8
Copper	12.8
Silicon	11.3
Quartz	7.9-10.7
Gold	7.4-8.0
Silver	7.1-7.8
Aluminum	6.9
Tin	4.1-4.5
Lead	1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-7 แสดงการเปรียบเทียบค่า Coefficient of friction [5]

Material	Coefficient
Diamond	0.05
Teflon	0.05
Metals (lubricated)	0.10
Graphite	0.10
Tungsten carbide	0.20
Sapphire	0.20
Nickel (bare)	0.70
Iron (bare)	1.00
Aluminum	1.30
Lead	1.50

ตาราง ก-8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Optical properties [5]

Material	Refractive Index
Germanium	4.00-4.10
Silicon	3.42-3.50
GaAs	3.34-2.12
Diamond	2.41-2.44
Sapphire	1.58-1.83
Fused silica	1.40-1.48
Crystal quartz	1.52-1.69
Water	1.33-1.34
Calcium fluoride	1.31-1.51
Lithium fluoride	1.11-1.45
Magnesium oxide	1.62-1.77

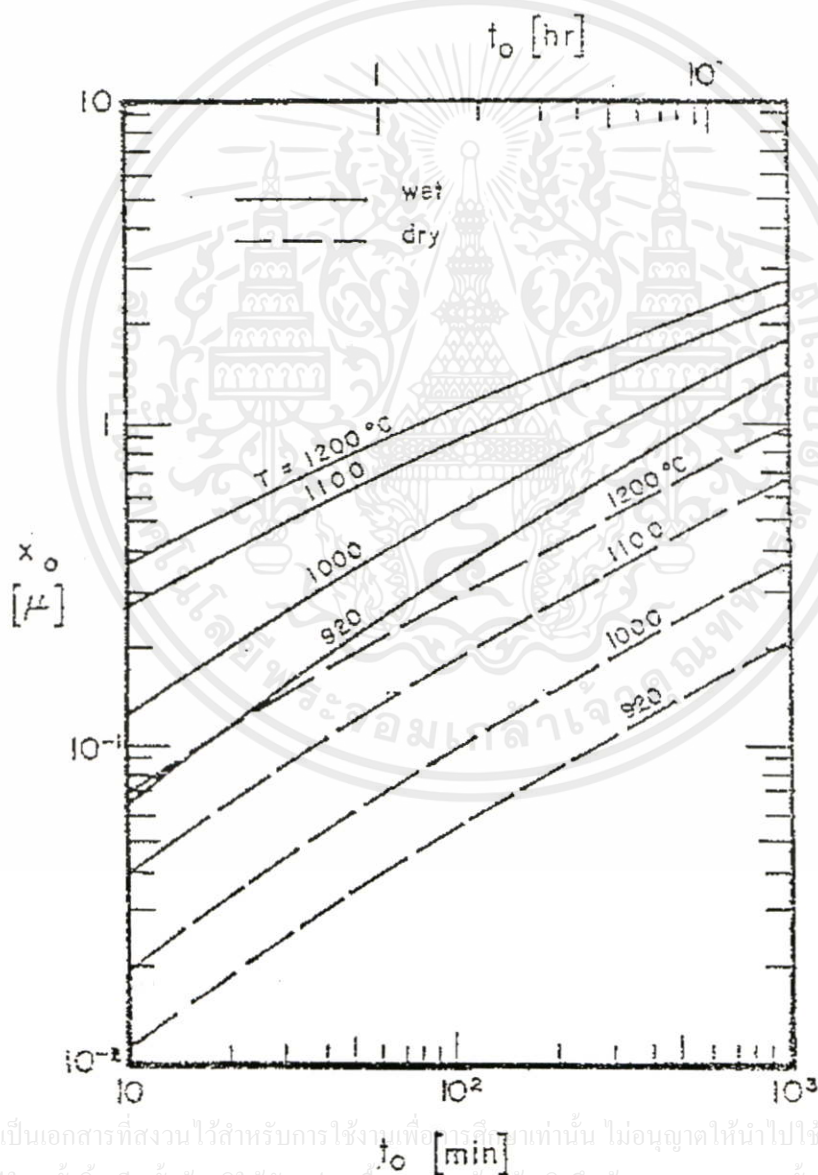
ตาราง ก-9 แสดงการเปรียบเทียบค่า Density [5]

Material	Density (gm/cm <sup>3</sup> )
Osmium	22.8
Platinum	21.5
Tungsten	19.3
Uranium	18.7
Copper	8.9
Germanium	5.4
Diamond	3.52
Beryllium oxide	2.86
Aluminum	2.7
Quartz	2.65
Boron	2.54
Silicon	2.42
Graphite	2.25
Hydrogen (solid)	0.076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

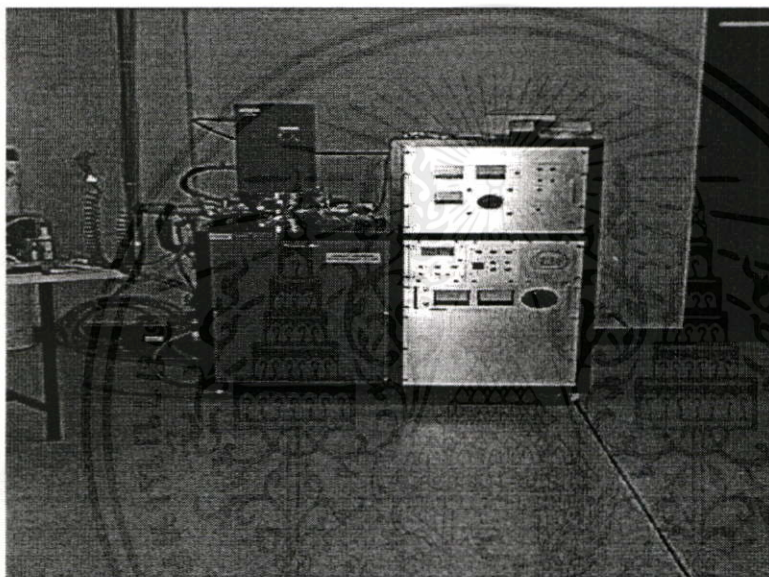
รูปที่ ข-1 กราฟแสดงความหนาออกไซด์ ( $X_o$ ) กับเวลาในการทำออกซิเดชัน ( $t_o$ ) และอุณหภูมิในการทำออกซิเดชัน (T)



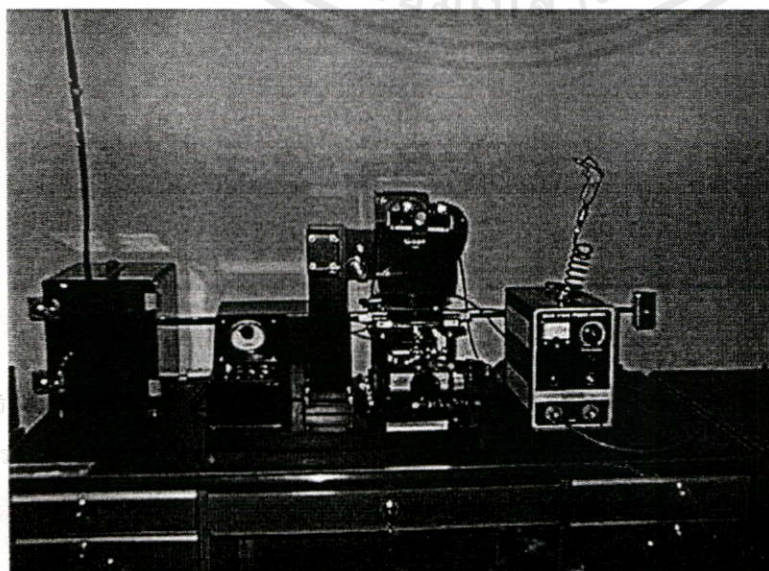
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

รูปที่ ค-1 แสดงเครื่อง RF Sputtering รุ่น SPF



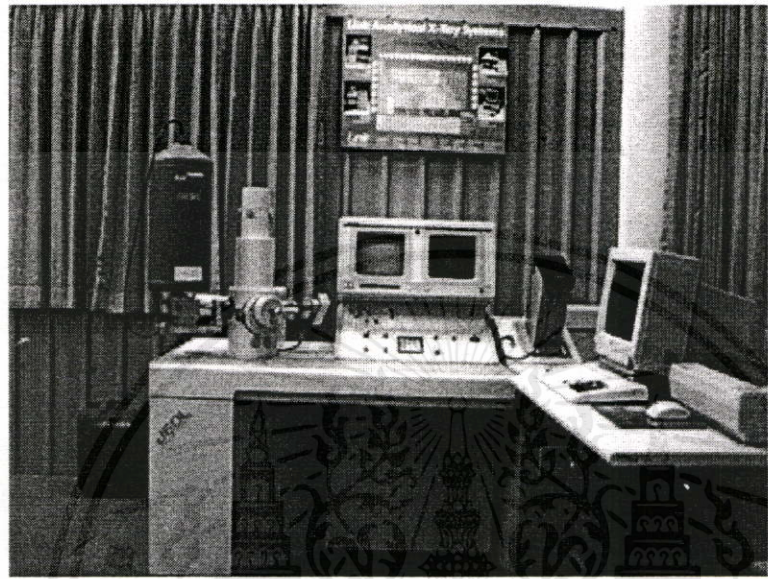
รูปที่ ค-2 แสดงเครื่อง Mask aligner



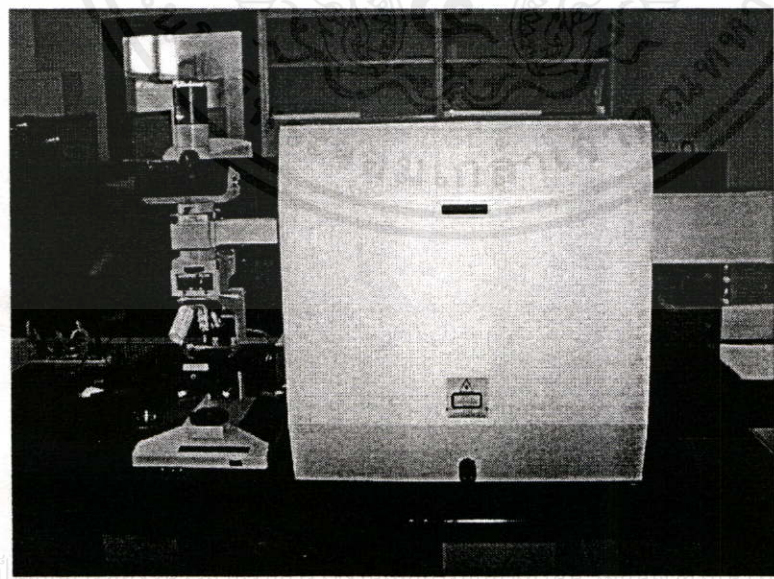
เอกสารนี้  
ไม่ว่ากร

ไปใช้ประ โยชน์ด้านการค้า  
ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-3 แสดงเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) ของ JEOL รุ่น JSM-5200 มีความละเอียด (Resolution) 5.5 nm. และกำลังขยายสูงสุด 200,000×



รูปที่ ค-4 แสดงเครื่อง FT-Raman Spectroscopy (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-5 แสดงเครื่อง X-ray Diffraction (กองฟิสิกส์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายกอบศักดิ์ ศรีประภา
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2515
สถานที่เกิด	จังหวัดลำปาง
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2536



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้