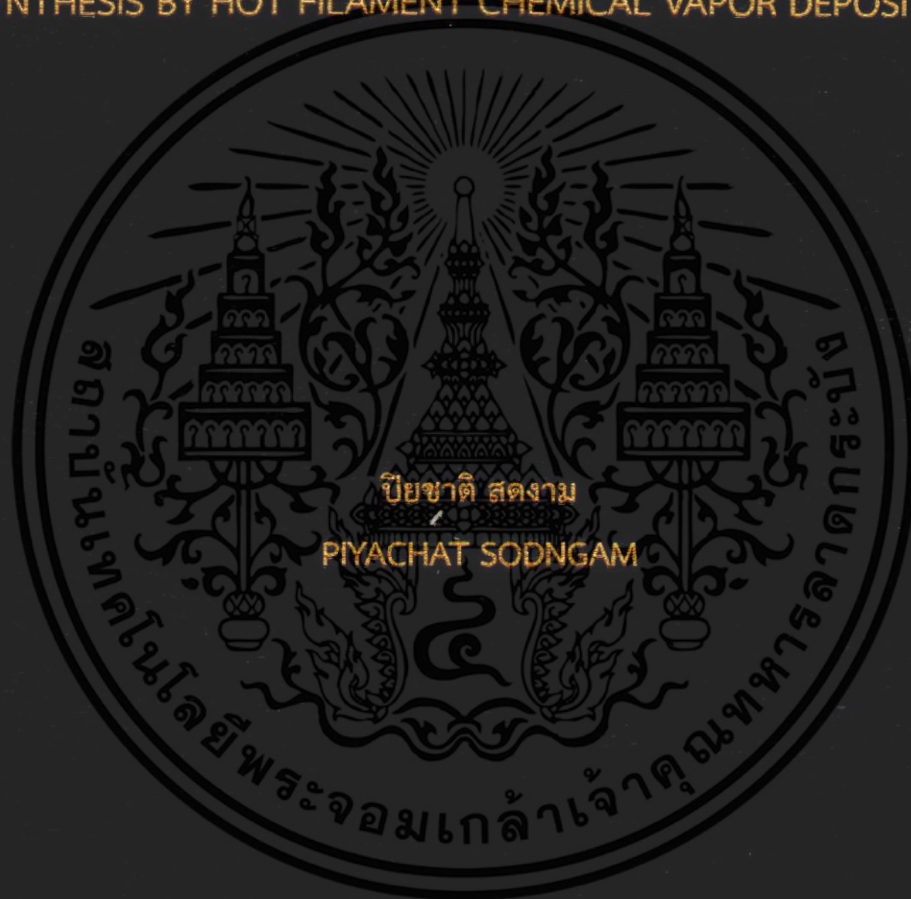


การศึกษาและการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วย
เทคนิค HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION

THE STUDY AND DEVELOPMENT OF LARGE DIAMOND CRYSTAL
SYNTHESIS BY HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-043-071

การศึกษาและการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วย
เทคนิค HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION

THE STUDY AND DEVELOPMENT OF LARGE DIAMOND CRYSTAL
SYNTHESIS BY HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559
KMITL-2016-EN-M-043-071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY AND DEVELOPMENT OF LARGE DIAMOND CRYSTAL
SYNTHESIS BY HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMITL-2016-EN-M-043-071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016






FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เผยแพร่เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

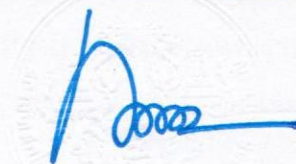
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยเทคนิค Hot Filament Chemical Vapor Deposition
Thesis Title The Study and Development of Large Diamond Crystal Synthesis by Hot Filament Chemical Vapor Deposition
นักศึกษา นายปิยชาติ สดงาม
รหัสประจำตัว 56601477
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ รุติรุ่งเรือง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M- 043-071

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
ดร.นรินทร์	อติวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.วิสุทธิ	รุติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 11.30-13.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่ตรงตามการนำไปใช้
วันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาและการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยเทคนิค HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION

นักศึกษา

นายปิยชาติ สดงาม

รหัสนักศึกษา

56601477

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

พ.ศ.

2559

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอชุดสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (HFCVD) ชุดใหม่ ที่มีขนาดของหลอดแก้วการทดลองที่ใหญ่ขึ้น โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และความสูง 25 เซนติเมตร ทำให้ระยะห่างของขดลวดนำความร้อน กับ จุกยางและหลอดแก้วการทดลอง นั้นมีระยะห่างที่มากขึ้น จึงทำให้ สามารถสังเคราะห์ เป็นเวลาต่อเนื่องกันได้นานมากกว่า 24 ชั่วโมง ในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ในครั้งที่ 12 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่พอที่จะสามารถนำมาวิเคราะห์ขนาดด้วยดิจिटอลเวอร์เนียร์ ได้ และวิเคราะห์ความเป็นผลึกเพชรที่สมบูรณ์ ด้วย Raman spectroscope จากนั้นนำผลึกเพชรที่ได้ ไปสังเคราะห์ต่อเพื่อเพิ่มขนาด อีก 7 ครั้ง แต่แต่ละครั้งจะทำการวัดขนาดบันทึกไว้ โดยในแต่ละครั้ง จะใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมง ร่วมกับการปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพชร ด้วยการ แอนนัลในบรรยากาศของไฮโดรเจน เป็นเวลา 9 นาที ที่อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส ทุกๆ 12 ชั่วโมง แล้วทำการสังเคราะห์เพิ่มอีกระยะเวลา 12 ชั่วโมง ร่วมกับการแอนนัล รวมเป็นระยะเวลา ทั้งหมดในการสังเคราะห์ 192 ชั่วโมง เมื่อวัดขนาดด้วยดิจिटอลเวอร์เนียร์ พบว่าผลึกเพชรมีขนาด 1.26 มิลลิเมตร และวิเคราะห์พื้นผิวของผลึกด้วย Scanning electron microscopy (SEM) ยิ่งไปกว่านั้นยังได้ทดสอบเพื่อยืนยันความเป็น “เพชร” เปรียบเทียบกับเพชรธรรมชาติ ด้วยวิธี Raman Spectroscopy แสดงให้เห็นค่าจุดยอดคลื่นที่ 1332 cm^{-1} เช่นเดียวกัน และเมื่อใช้ เครื่องตรวจเพชร (Diamond Tester) รุ่น Multi III จะแสดงไฟในแถบสีเขียว อันเป็นค่าของเพชรธรรมชาติ เหมือนกัน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์อัตราการโตโดยภายใน 108 ชั่วโมง มีค่าเฉลี่ย $6.25\text{ }\mu\text{m/hr}$ หลังจากนั้นอัตราการโตจะลดลงเหลือ $2.02\text{ }\mu\text{m/hr}$ ในท้ายที่สุดได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรพบว่ามีค่าความต้านทาน $1337.28\text{ M}\Omega$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติที่นำมาทดสอบอีกด้วย อีกทั้งยังทำการทดสอบผลของอุณหภูมิ ตั้งแต่อุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความต้านทานของผลึกเพชรนั้นมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	THE STUDY AND DEVELOPMENT OF LARGE DIAMOND CRYSTAL SYNTHESIS BY HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION
Student	Mr. PIYACHAT SODNGAM
Student ID	56601477
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. WISUT TITIROONGRUANG

ABSTRACT

In this thesis, a new diamond synthesis device by Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) is proposed. This diamond synthesis device has a large glass tube at 10 cm in diameter and 25 cm in height; hence the distance between heater coil and rubber closure as well as glass tube was increased. Therefore, the device can synthesize diamond continuously more than 24 h. In this research, the diamond synthesis time is started at 12 h in order to have a sufficiently large diamond crystal for Digital Caliper measurement and Raman Spectroscopy analysis. After that, the synthetic diamond was further synthesized 7 times to increase the diamond crystal size, which was recorded after each synthesis. The synthesis time for each synthesis is 24 h with annealing in hydrogen atmosphere at 900°C for 9 min every 12 h. Then, additional synthesis for 12 h together with annealing was conducted, which results in the total synthesis time of 192 h. When measuring the diamond crystal size after the synthesis for 192 h with Digital Caliper, the diamond crystal of 1.26 mm in size was observed. The surface morphology of the synthetic diamond was analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM). In addition, through the analysis using the Raman Spectroscopy, this synthetic diamond is confirmed to be “diamond” as it has the same peak as the natural diamond at the raman shift of 1332 cm⁻¹. Moreover, when using the Diamond Tester (Model Multi III), the green light, which means the natural diamond, was observed. Additionally, the growth rate within the first 108 hours was 6.25 μm/h and it decreased to 2.02 μm/h afterward. Finally, electrical property of the synthetic diamond was measured. The synthetic diamond has the

resistance of 1337.28 MΩ, which is equal to the natural diamond. The resistance of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the synthetic diamond was found to be constant at the temperature range of 25-200°C.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้อบรมสั่งสอน ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียนและการดำเนินชีวิตจนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ดร. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โยธิน วงศ์ประเสริฐ, ดร. รังสรรค์ เมืองเหลือ, อาจารย์ ภาสภณ มโนสุกฤตกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. และ ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรรค์ อาจารย์และนักวิจัย วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สจล. ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ตั้งใจให้แกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร. อัมพร โพธิ์ไธ ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) , ดร. จิราวัฒน์ ปราบเขต และ นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์การวิเคราะห์ SEM และ MICROSCOPE ตลอดจนคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร.ลัดดาวัลย์ สุภาดี และ นายภควัต สรวยสุวรรณ พนักงานบริษัท WESTERN DIGITAL (WD) ที่อนุเคราะห์การวิเคราะห์ RAMAN SPECTROSCOPY ตลอดจนคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์มินนา ปัญญาเลิศ ศิลปินเหรียญพระราชทานสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯสยามบรมราชกุมารี ที่อนุเคราะห์เครื่องตรวจเพชร รุ่น Multi III

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆและรุ่นน้องในศูนย์วิจัย ERC ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ นายปถม สดงาม และ นางบังอร สดงาม ผู้เป็นบิดาและมารดา ที่ทุ่มเทร่างกายแรงใจ สนับสนุนข้าพเจ้าทั้งในด้านการเรียน และให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

ปิยชาติ สดงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XIV
รายการสัญลักษณ์.....	XV
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร.....	3
1.2.1 การสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ความดันสูงและอุณหภูมิ.....	3
1.3 สารกึ่งตัวนำเพชร.....	3
1.4 คุณสมบัติต่างๆของเพชร.....	4
1.4.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	4
1.5 การสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ความดันต่ำ.....	6
1.5.1 Hot filament activation.....	6
1.5.2 Thermal Enhance CVD.....	8
1.5.2.1 หลักการพื้นฐานของวิธี Thermal Enhance CVD จะประกอบไปด้วย.....	8
1.5.3 Plasma activation.....	10
1.5.3.1 Microwave plasma enhanced CVD.....	10
1.5.3.2 Combustion activation CVD.....	12
1.6 เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	14
1.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM.....	14
1.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	18
2.1 ลักษณะโครงสร้างผลึก.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และด้วยหวังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 หลักการ CVD แบบความร้อน.....	22
2.2.1 กระบวนการของแก๊สเฟส.....	22
2.2.1.1 ปฏิกริยาที่ใส่หลอด.....	23
2.2.1.2 ผลของอุณหภูมิฐานรอง.....	24
2.2.1.3 บทบาทของแก๊สไฮโดรเจน.....	24
2.2.1.4 บทบาทของแก๊สออกซิเจน.....	25
2.2.2 ปรากฏการณ์นิวคลีเอชัน.....	25
2.2.3 กระบวนการโต.....	31
2.3 ความบกพร่องผลึก.....	34
2.3.1 ทวิน.....	34
2.3.2 ความบกพร่องแบบจุด.....	36
2.3.3 Non-diamond carbon phases	36
2.3.4 ความบกพร่องอื่นๆ.....	37
2.3.4.1 ขอบของเกรน (Grain boundaries).....	37
2.3.2.1 พื้นผิวและรอยต่อ (Surface and interface).....	37
2.4 การแอนนีสล (Annealing).....	38
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและวิธีการทดลอง.....	39
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง.....	39
3.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิกอน.....	39
3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรและ กรีตผิวหน้าให้เป็นตารางด้วยเพชรตัดกระจกกับขัดมันธรรมดา.....	39
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรและผลึกเพชร.....	41
3.3 การทดลอง.....	43
3.3.1 การทดลองเพื่อแก้ไขปัญหาความร้อนสะสมสูงของหลอดทดลอง และทำการ ออกแบบชุดทดลองใหม่.....	44
3.3.2 การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ไปยัง ระบบ.....	46
3.3.3 การทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการเกิดผลึก.....	46
3.3.4 การทดลองเพื่อหาอุณหภูมิ ของฐานรองซิลิกอนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดผลึกเพชร บริเวณจุดตัด.....	46
3.3.5 การทดลองใช้ฐานรองที่ไม่เตรียมพื้นผิวเพื่อเพิ่มขนาดผลึกเพชร.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี vi ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.6 การทดลองเพื่อเพิ่มขนาดของผลึก	47
3.3.7 การทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน	47
3.3.8 การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลึกเพชร.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	48
4.1 ผลการทดลองที่ได้จากการแก้ไขปัญหาคำร้อนสะสมสูงของหลอดทดลองและทำ การออกแบบชุดทดลองใหม่.....	48
4.2 ผลการทดลองอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ ไปยังระบบ....	52
4.3 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดเพชรในรูปของผลึก.....	55
4.4 การทดลองเพื่อหาอุณหภูมิ ของฐานรองซิลิกอนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดผลึกเพชร บริเวณ “จุดตัด”	60
4.5 ผลการทดลองใช้ฐานรองที่ไม่เตรียมพื้นผิว เพื่อเพิ่มขนาดผลึกเพชร.....	64
4.6 ผลการทดลองเพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชร.....	66
4.7 ผลการทดลองหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันของเพชร สังเคราะห์กับเพชรธรรมชาติ.....	78
4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลึกเพชร.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก ก. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	84
ภาคผนวก ข. ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VI ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติกับซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	5
1.2 Raman Spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน.....	17
2.1 ชนิดของฐานรองเมื่อแบ่งตามการฟอร์มตัวของชั้นอินเตอร์มิเดียท.....	27
3.1 การสังเคราะห์ระยะเวลาทั้งหมด 36 ชั่วโมง แอนนีสล ทุก 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 9 นาที.....	46
3.2 การสังเคราะห์ระยะเวลาทั้งหมด 36 ชั่วโมง ไม่ทำการแอนนีสล.....	46
4.1 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิขณะทำการทดลอง ของหลอดทดลองและจุกยาง.....	52
4.2 แสดงขนาดและระยะเวลาในการสังเคราะห์.....	57
4.3 แสดงแสดงระยะเวลาในการสังเคราะห์กับขนาด เวลาในการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง.....	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงลักษณะยูนิตเซลล์ของผลึกเพชร.....	1
1.2 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและแรงดัน.....	2
1.3 โครงสร้างยูนิตเซลล์ของผลึกเพชร.....	4
1.4 ระบบอย่างง่าย Hot filament activation CVD.....	7
1.5 ระบบอย่างง่าย Hot filament Thermal.....	10
1.6 Microwave Plasma CVD.....	11
1.7 Combustion Flame Assisted CVD.....	12
1.8 CVD แบบความร้อน.....	13
1.9 ลักษณะพื้นผิวหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM.....	15
1.10 การวิเคราะห์ความเป็นเพชร Raman spectroscopy ของผลึกเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธีCVD แบบความร้อน (a)เพชรธรรมชาติ(b) เพชรสังเคราะห์ (c) เพชรสังเคราะห์ที่มีปริมาณแกรไฟต์ปะปนอยู่.....	16
2.1 แผนภาพแลตทิซของผลึก (a) อสังฐาน.....	19
2.2 ลักษณะผลึกสารกึ่งตัวนำ (a)Tetrahedron ของซิลิกอน (b)เพชร (c)แกเลียมอาร์เซไนด์.....	20
2.3 เฟสไดอะแกรมของวัสดุสารที่เปลี่ยนจากเฟสของแข็งเป็นไอที่ความดันบรรยากาศ.....	21
2.4 แสดงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ CVD ของเพชร.....	23
2.5 การไฮบริดไดเซชันและรูปร่างของ sp^3 ไฮบริดออร์บิทัล.....	24
2.6 ระดับพลังงานออร์บิทัลและการจัดเรียงอิเล็กตรอน.....	24
2.7 กลไกการนิวเคลียชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง.....	26
2.8 การนิวเคลียชันบนชั้นอินเตอร์มีเดียท.....	27
2.9 ระดับพลังงานออร์บิทัลและการจัดเรียงอิเล็กตรอนของคาร์บอน.....	28
2.10 รูปร่างของไฮบริดออร์บิทัลของคาร์บอน.....	28
2.11 ลักษณะของผลึกที่มีความแตกต่างของขนาดจากการใช้หน้ากากป้องกันเวลาทำการสังเคราะห์.....	31
2.12 แบบจำลองการก่อตัวของไอเคมีของเพชรซึ่งจะก่อตัวเป็นคาร์บอน sp^2 หรือ sp^3	33
2.13 แสดงลักษณะความบกพร่องแบบทวิน.....	34
2.14 ลักษณะของ <111> Stacking fault ของเพชร และ(100) Stacking fault.....	35
2.15 แสดงลักษณะของ Dislocation (a) Screw dislocation (b) Edge dislocation (c) Mixed dislocation.....	36
2.16 ลักษณะความบกพร่องแบบจุดชนิดต่างๆ.....	37
2.17 สภาวะ Recovery (a) การจัดเรียงตัวของเกรนเริ่มต้น (b) ระหว่าง Recovery.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 รูปครีมเพชร.....	40
3.2 รูปตัวตัดกระจก.....	40
3.3 รูประบบHFCVD อย่างง่าย.....	42
3.4 รูปหลอดทดลองแบบใหม่.....	45
3.5 จุกยางทนความร้อน (Red Rubber Plug) ยี่ห้อ AS ONE.....	45
4.1 จุกยางของชุดการทดลองเก่าหลังผ่านการสังเคราะห์.....	48
4.2 จุกยางก่อนการสังเคราะห์และหลังการสังเคราะห์.....	49
4.3 หลอดทดลองแบบเก่า.....	50
4.4 หลอดทดลองแบบใหม่.....	51
4.5 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 12 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย SEM...	52
4.6 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 14 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย SEM...	53
4.7 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 16 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย SEM...	53
4.8 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 12 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย Raman..	54
4.9 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 14 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย Raman..	54
4.10 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 12 ml/minจากการวิเคราะห์ด้วย Raman..	54
4.11 ผลึกเพชรขนาด 490 μm ที่ได้จากการวัด ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	55
4.12 ผลึกเพชรขนาด 490 μm ที่ถ่ายภาพจากกล้อง Microscope.....	56
4.13 (a) ผลึกเพชรสังเคราะห์ขนาด 490 μm จากกล้องกำลังขยาย 10 เท่า	
(b) ผลึกเพชรธรรมชาติขนาด 490 μm จากกล้องกำลังขยาย 10 เท่า.....	56
4.14 เปรียบเทียบผลึกเพชรธรรมชาติผลึกกับเพชรสังเคราะห์ขนาด 490 μm จากกล้องกำลังขยาย 10 เท่า.....	57
4.15 ผลึกเพชรขนาด 490 μm ที่ได้จากการวัด ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์ ก่อนเพิ่มขนาด.....	58
4.16 ผลึกเพชรขนาด 560 μm ที่ได้จากการวัด ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์ หลังเพิ่มขนาด.....	58
4.17 ผลึกเพชรขนาด 490 μm ก่อนทำการสังเคราะห์ จาก กล้องMicroscope.....	59
4.18 ผลึกเพชรขนาด 560 μm หลังทำการสังเคราะห์ จาก กล้องMicroscope.....	59
4.19 ผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรที่ทำการสังเคราะห์12ชั่วโมง...	59
4.20 อุณหภูมิของฐานรองที่ 800°C จากการวิเคราะห์ด้วย SEM	60
4.21 อุณหภูมิของฐานรองที่ 900°C จากการวิเคราะห์ด้วย SEM	61
4.22 อุณหภูมิของฐานรองที่ 1000°C จากการวิเคราะห์ด้วย SEM	61
4.23 ผลึกเพชรที่เกิดตรงบริเวณ “จุดตัด”	62

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ผลึกเพชรขนาด 490 um จากการวัดด้วย ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	62
4.25 ลักษณะของผลึกเพชร จากการถ่ายภาพด้วย Microscope	63
4.26 ผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรที่ทำการสังเคราะห์.....	63
4.27 ผลึกเพชรขนาด 670 um จากการวัดขนาดด้วย ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	64
4.28 ลักษณะของผลึกเพชรขนาด 670 um จากการถ่ายภาพด้วย Microscope	64
4.29 การวิเคราะห์ด้วยRamanของผลึกเพชรขนาด 670 um	65
4.30 ฐานรองซิลิกอนชนิดมันแบบธรรมดา มีความหนาแน่นนิวคลีโอซินต่ำ.....	65
4.31 ผลึกเพชรขนาด 490 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง จากดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	66
4.32 ผลึกเพชรขนาด 490 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง จาก Microscope.....	67
4.33 ผลึกเพชรขนาด 670 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 36 ชั่วโมง จาก microscope.....	67
4.34 ผลึกเพชรขนาด 670 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 36 ชั่วโมง จาก SEM.....	68
4.35 ผลึกเพชรขนาด 670 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 36 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	68
4.36 ผลึกเพชรขนาด 800 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง จาก SEM.....	69
4.37 ผลึกเพชรขนาด 800 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	69
4.38 ผลึกเพชรขนาด 960 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 84 ชั่วโมง จาก SEM.....	70
4.39 ผลึกเพชรขนาด 960 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 84 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	70
4.40 ผลึกเพชรขนาด 1090 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 108 ชั่วโมง จาก SEM.....	71
4.41 ผลึกเพชรขนาด 1090 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 108 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	71
4.42 ผลึกเพชรขนาด 1117 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 132 ชั่วโมง จาก SEM.....	72
4.43 ผลึกเพชรขนาด 1117 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 132 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	72
4.44 ผลึกเพชรขนาด 1210 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 156 ชั่วโมง จาก SEM.....	73
4.45 ผลึกเพชรขนาด 1210 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 156 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	73
4.46 ผลึกเพชรขนาด 1250 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 180 ชั่วโมง จาก SEM.....	74
4.47 ผลึกเพชรขนาด 1250 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 180 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	74
4.48 ผลึกเพชรขนาด 1260 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 192 ชั่วโมง จาก SEM.....	75
4.49 ผลึกเพชรขนาด 1260 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 192 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์.....	75
4.50 ตรวจสอบเพชรธรรมชาติ (แหวนเพชร) ด้วยเครื่อง Diamond Testerรุ่นMulti 3.....	76
4.51 ตรวจสอบเพชรธรรมชาติ (แหวนเพชร) ด้วยเครื่อง Diamond Testerรุ่นMulti 3.....	77
4.52 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรที่สังเคราะห์จากการทดลอง เปรียบเทียบกับเพชร ธรรมชาติ ด้วย Raman.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดxiอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-1 เครื่อง Microscope ของ Nikon รุ่น 1500x ติดตั้งประจำอยู่ที่ TMEC.....	84
ก-2 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของ Hitachi รุ่น S-4700 ติดตั้ง อยู่ที่ TMEC.....	84
ก-3 เครื่อง Raman Spectroscopy ของ RENISHAW ติดตั้งประจำอยู่ที่ บริษัท WESTERN DIGITAL.....	85
ก-4 เครื่อง Daimond Tester ยี่ห้อ Presidium Multi III.....	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด XIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
Å	Angstrom	อังสตรอม
Ar	Argon	อาร์กอน
B	Boron	โบรอน
cm	Centimeter	เซนติเมตร
Cr	Chromium	โครเมียม
CZ	Czochralski silicon	ฐานรองซิลิคอนโซคราลสกี
DI	De-ionization water	น้ำไร้ประจุ
E-beam	Electron-beam evaporation	ระบบระเหยสารด้วยลำแสง
ERC	Electronic Research Center	ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
FZ	Floating zone silicon	ฐานรองซิลิคอนโพลติงโซน
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
n-Si	N type Silicon	ซิลิคอนชนิดเอ็น
nm	Nanometer	นาโนเมตร
P	Phosphorus	ฟอสฟอรัส
PR	Photoresist	น้ำยาไวแสง
Pt	Platinum	แพลทินัม
RF	Radio Frequency	คลื่นความถี่วิทยุ
Si	Silicon	ซิลิคอน
s	Second	วินาที
TMEC	Thai Microelectronics Center	ศูนย์เทคโนโลยีไมโคร
อิเล็กทรอนิกส์		
µm	Micrometer	ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี XIV ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่รอยสัมผัส
A^*	คือ	ค่าคงตัวริชาร์ดสัน
C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้า
D	คือ	ระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดรังสีและอุปกรณ์
D_{TxR}	คือ	ปริมาณรังสีที่ดูดซับโดยเฉลี่ยในเนื้อเยื่อ
E_0	คือ	ระดับสูญญากาศ
E_A	คือ	ระดับผู้รับแบบลิก
E_a	คือ	ระดับพลังงานกระตุ้น
E_C	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
E_D	คือ	ระดับผู้ให้แบบลิก
E_F	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
E_{FM}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านโลหะ
E_{FS}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านสารกึ่งตัวนำ
E_g	คือ	ช่องว่างพลังงาน
E_i	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
E_V	คือ	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
E_T	คือ	ระดับพลังงานของจุดบกพร่อง
\mathcal{E}_S	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์
I_0	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
I_F	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสตรง
I_{MS}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ
I_R	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสย้อนกลับ
I_S	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส
I_{SM}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ
I_P	คือ	กระแสแสง
I_c	คือ	กระแสคอนดักเตอร์
I_d	คือ	กระแสโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด XV ว่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

J	คือ	ความหนาแน่นกระแส
k	คือ	ค่าคงที่โบสต์มันน์
kV	คือ	พลังงานรังสีเอกซ์
mA	คือ	กระแสที่ถูกป้อนให้หัวจ่ายรังสีเอกซ์
n	คือ	แฟคเตอร์อุคมคติ
N_A	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้รับ
N_A^-	คือ	ไอออนลบของอะตอมผู้รับ
N_D	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้ให้
N_D^+	คือ	ไอออนบวกของอะตอมผู้ให้
q	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
S	คือ	เวลาการฉายรังสีเอกซ์
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
V_A	คือ	แรงดันไบอัส
V_{bi}	คือ	แรงดันภายใน
W_d	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
χ	คือ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
ϕ_{bn}	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ข้อต่อตักย
ϕ_M	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_S	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตีพิมพ์หรือแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กรดpiranha	Piranha
กระบวนการดูดกลืนแสง	Absorption process
กระบวนการสปัตเตอริง	RF sputtering
กระบวนการไอออนอิมแพลนเทชัน	Ion implantation
กระแสมืด	Dark current
กระแสรั่วไหล	Leakage current
กระแสแสง	Photocurrent
กระแสโฟโตคอนดักเตอร์	Photoconductor current
กระแสโฟโตไดโอด	Photodiode current
กัมมันตภาพรังสี	Radioactivity
การฉายรังสีเอกซ์	X-ray irradiation
การแทรกตัวอยู่ระหว่างอะตอม	Interstitial
การทะลุทะลวง	Penetration
การไบอัสไปข้างหน้า	Forward bias
การไบอัสย้อนกลับ	Reverse bias
การพังทลายแบบอะวาลันช์	Avalanche breakdown
การแพร่เข้าไปแทนที่	Substitutional diffusion
กำแพงศักย์ภายใน	Potential barrier
ขั้วแคโทด	Cathode
ขั้วแอโนด	Anode
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	Depletion width
ความเร็วของอิเล็กตรอน	Thermal velocity
ค่าสภาพต้านทาน	Resistivity
จุดบกพร่อง	Defect
ช่องว่างแถบพลังงาน	Energy gap
ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ	Native oxide
ซอฟต์แวร์เอกซ์เรย์	Soft x-ray
ไดโอดพี-เอ็น	P-N diode
ตัวตรวจวัดแสง	Photodetectors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตีพิมพ์หรือแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
ไตรโคลอเอทอีลีน	Trichloroethylene
แถบนำไฟฟ้า	Conduction band
แถบวาเลนซ์	Valence band
เนื้อสารกึ่งตัวนำ	Bulk
น้ำยาขึ้นลวดลาย	Developer
น้ำยาไวแสง	Photoresist
เบ้าหลอมสาร	Crucible
โปรตรอน	Proton
พลังงานยึดเหนี่ยว	Binding energy
พาหะส่วนมาก	Majority carrier
พาหะส่วนน้อย	Minority carrier
ฟังก์ชันงาน	Work function
โฟโตมาร์ก	Photo mask
โฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
ภาคตัดขวางการจับยึด	Capture cross section
ระดับพลังงานระดับลึก	Deep level energy
ระดับพลังงานดักจับ	Energy trap
เรคทีไฟร์	Rectifier
แรงดันพังทลาย	Breakdown voltage
รอยสัมผัสช็อตต์กี	Schottky contact
รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	Metal-semiconductor contact
รอยสัมผัสโอห์มิก	Ohmic contact
ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก	Deep acceptor level
ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก	Deep donor level
ระดับพลังงานเฟอร์มิ	Fermi energy
ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน	Electron-beam evaporation
รังสีเอกซ์	X-ray
สิ่งปนเปื้อน	Contamination
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XVIII จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง

สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง

สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก

สารเจือระดับลึก

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

สัมประสิทธิ์การแพร่

ศูนย์กลางการดักจับ

ศูนย์กลางการรวมตัว

ศูนย์กลางการเกิดพาหะ

อบแผ่นครั้งแรก

อะซิโตน

อายุการรวมตัวของพาหะ

อายุการเกิดของพาหะ

อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี

อัลตราโซนิค

อะตอมบกพร่อง

ฮาร์ดเอกซ์เรย์

ภาษาอังกฤษ

n-type semiconductor

Direct band gap semiconductor

Indirect band gap semiconductor

Extrinsic semiconductor

Deep impurity

Light absorption coefficient

Diffusion coefficient

Trap center

Recombination center

Generation center

Pre bake

Acetone

Recombination lifetime

Generation lifetime

Electron affinity

Ultrasonic

Defect atoms

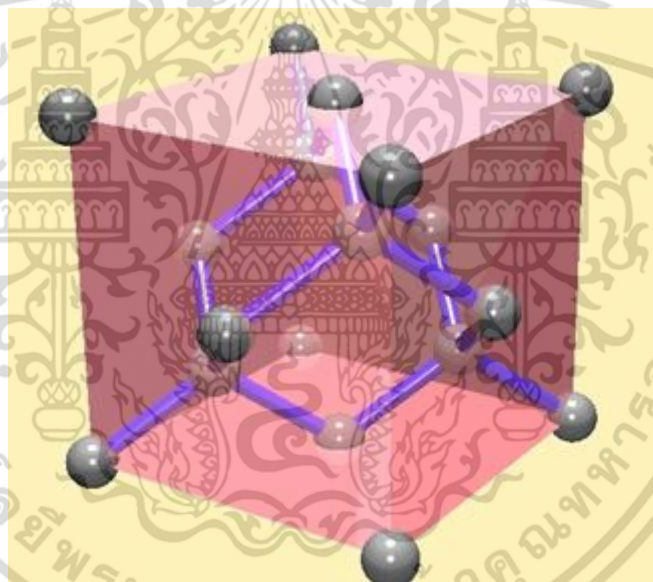
Hard x-ray

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตีXIX้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

จากการศึกษาพบว่า ทศวรรษที่ผ่านมาพบว่าเพชรมีโครงสร้างเป็นโครงข่ายทรงเหลี่ยมสี่ 3 หน้า(Tetrahedral network)ของอะตอมคาร์บอนอย่างสม่ำเสมอด้วยระยะระหว่างอะตอม 1.545Å โดยคาร์บอนแต่ละอะตอมจะเกาะกับอะตอมคาร์บอนอื่น อีก อะตอมเป็นโครงผลึกแบบลูกบาศก์ 4 เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ชนิดซิกมาและมีวงโคจรอิเล็กตรอนเป็นแบบ sp^3 ที่แข็งแรงมาก การจัดเรียงตัวของยูนิทเซลล์ ของอะตอมอยู่ 8/1 อะตอม โดย 8 ยูนิทเซลล์ ประกอบไปด้วยคาร์บอน 1 ที่มุมทั้งแปด $\frac{1}{2}$ อะตอมอยู่ที่แต่ละหน้าของยูนิทเซลล์ และสุดท้ายมี อะตอม ฝังตัวอยู่ในยูนิทเซลล์ 4 อะตอม ฝังตัวอยู่ในยูนิทเซลล์ 4 และสุดท้ายมี[1] ดังรูปที่ ทำให้ผลึกเพชรมีลักษณะต่างๆ ที่พิเศษ 1.1 กว่าธาตุอื่นๆ



รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะยูนิทเซลล์ของผลึกเพชร

1.1 ความเป็นมา [2]

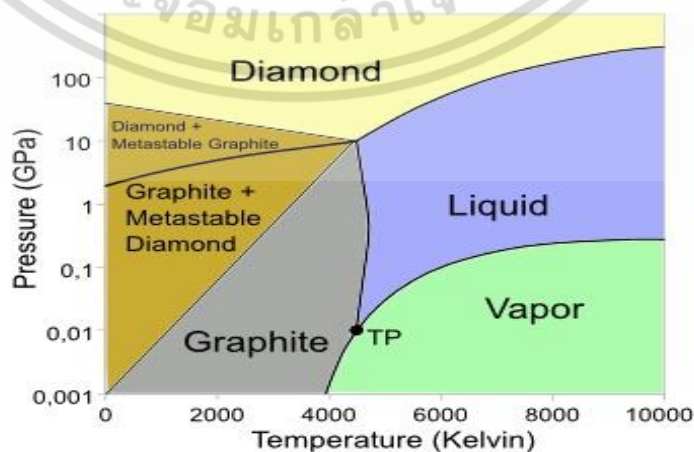
ความพยายามสังเคราะห์เพชรเริ่มขึ้นเมื่อเป็นที่รู้กันว่าเพชรเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอน จนกระทั่งในปี ห้องปฏิบัติการคันควัววิจัยทางอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป 1955(General Electronic Research Laboratories;GE) ได้เสนอกระบวนการสังเคราะห์ที่สามารถทำซ้ำได้ และเป็นมาตรฐานที่ยอมรับได้โดยใช้เทคนิคความดันสูง ซึ่งมีการพัฒนามาตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา ให้ได้เพชรที่มีคุณภาพที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาที่เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับเริ่มตั้งแต่ปี 1797 Smith Tennant ได้เผาเพชรในบรรยากาศของออกซิเจนได้ผลเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และซีเถ้า แสดงให้เห็นว่าเพชรคือรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งมีความหนาแน่น 3.52 g/cm^3 มากกว่าคาร์บอนในรูปอื่นเช่นแกรไฟต์ซึ่งมีความหนาแน่น 2.25 g/cm^3 ดังนั้นถ้าให้ความดันอย่างทันทีทันใดเพื่อลดปริมาตรและความหนาแน่นอาจเปลี่ยนเป็นคาร์บอนรูปอื่นได้จึงมีผู้ทดลองสังเคราะห์เพชรจากคาร์บอนรูปอื่นๆ เช่น J.B Hannay [2] ได้รายงานความสำเร็จในปี ว่าสามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีลิเทียมผสมอยู่ใน 1880 ท่อเหล็กและมีความร้อนจนร้อนโดยใช้หลักการระเบิด แต่พบว่ายังคงมีบางส่วนมาเป็นเพชร H.Moissan [2] ใช้สารละลายของคาร์บอนในเหล็กแข็งอาศัยการทำให้เย็นแบบรวดเร็ว (Quenching) สารละลายที่อยู่ในสภาวะ White heat]ลงสู่น้ำ ทำให้เกิดแรงดันจากการหดตัวของส่วนที่อยู่ด้านนอกของท่อเหล็กเกิดเป็นเพชรขึ้นได้แต่อย่างไรก็ดี C.Parsons [2] พยายามทำการทดลองซ้ำวิธีเหล่านี้และทำการทดลองสร้างในแนวทางอื่นพบว่าการทดลองในช่วงแรกๆ นั้นผิดและไม่มีรายละเอียดพอที่จะศึกษาผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ ทำให้เขาสรุปว่าไม่มีใครที่ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์จริง เนื่องจากไม่มีกระบวนการใดที่สารละลายทำได้ เป็นเพียงการสรุบบ่อยๆ และจากความรู้ที่ผ่านมาทำให้เราทราบว่าจะเงื่อนไขในการสร้างเพชรในการทดลองช่วงแรกๆ ไม่ใช่เงื่อนไขที่ถูกต้อง และสุดท้ายคือเทคนิคของรายละเอียดในการทดสอบอ้างว่าเพชรสามารถสังเคราะห์ได้จากสารที่มีความแข็งเช่น $\text{Mg Al}_2 \text{O}_4$ ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีองค์ประกอบของคาร์บอนซึ่งเป็นอนุภาคมูลฐานประกอบอยู่เลย

การไม่ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรเนื่องจากปัญหาหลักๆ คือ

1. โครงสร้างของเพชรมีการจับพันธะกันอย่างแข็งแรง การสังเคราะห์ต้องใช้ความดันสูงมาก
2. เมื่อความดันสูง อุณหภูมิในการสังเคราะห์จะต้องสูงด้วยเพื่อให้มีการเปลี่ยนรูปคาร์บอนเป็นเพชรในอัตราเร็ว
3. เพชรที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็ก ต้องควบคุมเงื่อนไขอื่นๆ เช่น เวลาในการสังเคราะห์ เป็นต้น



รูปที่ 1.2 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ แสดงสถานะของคาร์บอนที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน ที่ความดันปกติ 1.2 คาร์บอนจะเสถียรอยู่ในรูปของแกรไฟต์เป็นเหตุให้พบคาร์บอนในรูปนี้บนพื้นผิวโลกมากที่สุด เหนือเส้น B คาร์บอนจะเสถียรในรูปของเพชรและอาจเปลี่ยนกลับเป็นแกรไฟต์อีกครั้งใต้เส้น A บริเวณ B นี้เป็นเงื่อนไขในการสังเคราะห์เพชร ที่เตรียมโดยกระบวนการของ GE ถ้าใช้ตัวทำละลายเป็นโลหะเส้น Ni ในรูปที่ แสดงกราฟการหลอมเหลวของนิเกิลที่อยู่ในคาร์บอนและที่อุณหภูมิและความดันสูงในบริเวณ C เพชรจะเป็นผลึกโดยปราศจากตัวทำละลายโลหะ ส่วนบริเวณ D เป็น บริเวณที่ใช้ความดันสูงกว่าแต่อุณหภูมิต่ำกว่าโดยใช้เทคนิค Shock wave บริเวณ E มีการเกิดฟิล์มบางต่ำที่ความดันบรรยากาศ และบริเวณ F ใช้เทคนิคซินเทอริง (Sintering)

1.2 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร [3]

1.2.1 การสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ความดันสูงและอุณหภูมิ

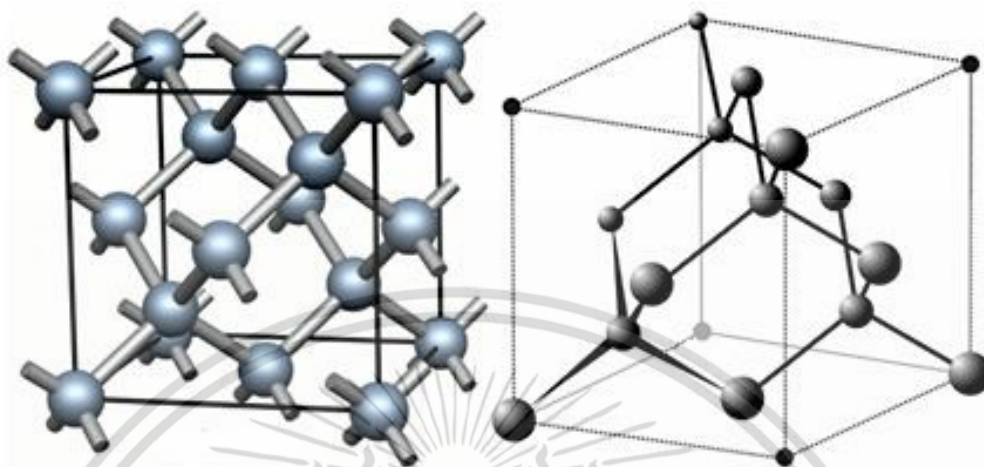
ความพยายามสังเคราะห์ผลึกเพชรจากคาร์บอนรูปอื่นให้จัดเรียงตัวในรูปเพชรซึ่งเป็นสิ่งที่มีค่ามาก แต่การสังเคราะห์ยังไม่ประสบความสำเร็จแม้ว่าในปี จะมีการรวมกลุ่มกันของหลาย 1941 บริษัทคือ GE , Carborundum, Norton และ P.W.Bridgman เนื่องจากเกิดสงครามขึ้นต่อมาก็มีการรวมกลุ่มกันอีกครั้งเพื่อสังเคราะห์เพชรที่มีความดันสูงที่บริษัท 1951GE โดยประกอบไปด้วยนักฟิสิกส์คือ F.P.Bundy, M.H. Strong และนักเคมีฟิสิกส์คือ H.T. Hall , R.H.wentort และวิศวกร คือ J.E. Cheney และ H.P.Bovenkerk โดยช่วงแรกกระทำที่ความดันสูงประมาณ 1 ล้านปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิสูง เรียกเครื่องมือนี้ว่า Belt ซึ่งเสร็จสมบูรณ์ในปี 1953 มีลักษณะดังรูปที่ 1953 1955 ต่อจากนั้นมีการพัฒนาอุปกรณ์และกระบวนการสังเคราะห์จนกระทั่งมีการตีพิมพ์เผยแพร่ในปี

1.3 สารกึ่งตัวนำเพชร

เพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของธาตุคาร์บอนซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ที่โดยลักษณะของโครงสร้าง 4 “ จะประกอบไปด้วย อะตอมคาร์บอนจับตัวกันเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า Diamond Structure ซึ่ง ” 6 คาร์บอนจากรูปแสดงว่าภายในยูนิทเซลล์จะประกอบไปด้วย อะตอม 1.3 สามารถแสดงได้ดังรูป อะตอมเรียงตัวแบบ face center cubic (FCC) และอะตอมคาร์บอนอีก อะตอม อยู่ในตำแหน่ง $4\frac{1}{4}$ เมื่อวัดตามแนวเส้นทแยงมุมของยูนิทเซลล์ อะตอมคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 เราจะพบว่า Diamond Structure [4] นี้ อะตอมคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมโดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีเหลี่ยมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมองได้ว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ (111) ความอันวางซ้อนทับกันในลักษณะหลักที่ 2 ยาวของแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆ ของวงแหวนหกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกันในทิศทางของระนาบ (111) การเรียงลำดับชั้นจะเป็น แบบ ABC ABC ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.567\AA และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวใกล้เคียงที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.54\AA ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

order peak)ของเพชรมีค่า 1332cm^{-1} สำหรับคาร์บอน จะมีค่า 13 ส่วนในกรณีของคาร์บอน 12 1284 ยอดที่ลำดับที่หนึ่งอยู่ที่ cm^{-1}



รูปที่ 1.3 โครงสร้างยูนิตเซลล์ของผลึกเพชร

1.4 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

1.4.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า [4]

เพชรมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจหลายอย่างจึงสามารถนำเพชรมาใช้งานทางด้านการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ หากพิจารณาค่าสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำแล้วพบว่ามีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงถึง $1800\text{cm}^2/\text{Vs}$ ส่วนของอิเล็กตรอนมีค่า $2000\text{cm}^2/\text{Vs}$ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเยอรมาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติโมนไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนวัสดุอื่นๆจะมีค่าคล่องตัวของโฮลและ Dielectric strength ต่ำ ส่วนค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง $10^{16}\ \Omega\cdot\text{cm}$

สารเจือที่นำมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือโบรอน โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลว เนื่องจากโบรอนอยู่ในหมู่ที่ 3 จึงทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือ 3 อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมเหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้แลทท ผู้ริบิซเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก พลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อยลงทำให้เกิด Shallow level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่าประมาณ $10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ 0.37eV ส่วนฟิล์มเพชรชนิด Highly doped อะตอมสารเจือมากกว่า พลังงานกระตุ้นจะมีค่าต่ำคือประมาณ 0.002eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์ [5]

Property	Diamond	Si	GaAs
Crystal Structure	Diamond	Diamond	Zinc blends
Energy gap(eV)	5.45	1.1	1.43
Electron mobility (cm ² V.s)	2000(5)*	1500	8500
Hole mobility (cm ² V.s)	1800(5)*	600	400
Breakdown field (V/cm)	10 × 10 ⁶	5 × 10 ⁶	6×10 ⁶
Resistivity(Ω.cm)	10 ¹⁶	10 ³	10 ⁹
Saturated electron velocity (cm/s)	2.7 × 10 ⁷	1 × 10 ⁷	1 × 10 ⁷
Dielectric constant(ε)	5.7	11	12.5
Lattice constant(Å)	3.567	5.431	5.653
Thermal conductivity (W/cm.K)	20	1.5	0.46

*สำหรับกรณีสารกึ่งตัวนำเพชรชนิด Polycrystalline

จากตารางสามารถสรุปลักษณะเด่นของเพชรได้ดังนี้

1. เพชรมีค่าแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) สูงกว่าซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์มาก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงนี้ซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้นจำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ
2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำทำให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดี
3. ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งค่าสภาพต้านทานนี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการโดยเติมอะตอมสารเจือจางลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เพชรที่มีค่าสภาพความร้อนสูงจึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และในวงจรรวมสามารถที่จะบรรจุจำนวนอุปกรณ์ให้มีความหนาแน่นมากได้ โดยที่ไม่มีปัญหาทางด้านความร้อน อีกทั้งยังเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์ชนิดต่างๆ

1.5 การสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ความดันต่ำ

1.5.1 Hot filament activation [5]

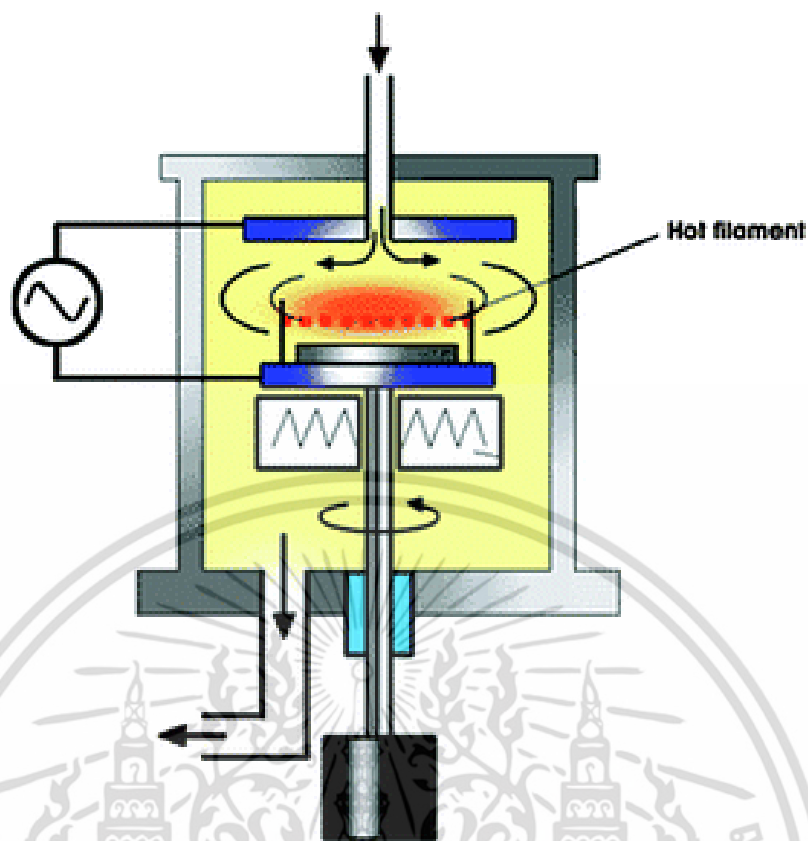
ระบบ Hot filament activation หรือระบบCVD แบบความร้อนเป็นระบบที่ใช้ในการแตกตัวทางความร้อนทำให้เกิดอะตอมของไฮโดรเจนและอนุภาคมูลฐานอื่นๆซึ่งเป็นไอเคมีในการเกิดเพชร โดยการใช้พลังงานความร้อนจากไส้หลอดที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,2-900,องศาเซลเซียส ทำให้ 500 %10 เกิดการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรเจนมากกว่า เมื่อไส้หลอดมีอุณหภูมิ 2,องศาเซลเซียส 400

การแตกตัวทางความร้อนนี้ทำให้อุปกรณ์สำหรับสร้างฟิล์มเพชรระบบนี้ง่ายกว่าระบบ CVD อื่นๆ โดยจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแก๊สซึ่งจะไหลผ่านไส้หลอดทั้งสแตนเรเนียม หรือแทนทาลัม ไปยังฐานรองที่ระยะห่างจากไส้หลอด 1.7มิลลิเมตรดังรูปที่ 15-5ระบบนี้สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ในบริเวณกว้างโดยใช้การหมุนไส้หลอดและฐานรองหรือใช้แหล่งจ่ายแบบกริด หรือแบบเส้น (ขึ้นอยู่กับรูปแบบของไส้หลอด)

ทำให้ได้พื้นที่มากกว่าการใช้แหล่งจ่ายแก๊สแบบจุด (ระบบพลาสมาและCombustion) ค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ถูก ได้อัตราโตที่พอเหมาะในระดับ $\mu\text{m/h}$ เมื่อกระตุ้นแก๊สเฟสของระบบไฮโดรเจนแตกตัวเป็นอะตอมและใช้อัตราส่วนมีเทนในไฮโดรเจน $100 < \text{ความดัน} \%1 \geq$ ทอร์ อุณหภูมิฐานรองประมาณ องศาเซลเซียสอุณหภูมิไส้หลอด 8002,000-2,200 องศาเซลเซียส และเลือกใช้ฐานรองซิลิกอนหรือโมลิบดีนัมนอกจากนี้ระบบยังให้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพของสเปกตรัมของอ Raman ดีเยี่ยม แม้อาจจะเกิดการปนเปื้อนของฟิล์มจากสิ่งเจือปนจากไส้หลอด แต่ก็ยังมีคุณภาพเพียงพอสำหรับใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์แต่เนื่องจากไส้หลอดจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์สัมพันธ์กับเวลา Kimock และคณะ [3] จึงพัฒนาระบบโดยใช้ Mass spectroscopy และ Tracking exhaust gas composition เข้ามาช่วยทำให้คุณสมบัติของฟิล์มขึ้นกับเวลาน้อยลงและฉีดมีเทนเข้าไประหว่างไส้หลอดกับฐานรอง และใช้ไฮโดรเจนที่ถูกกระตุ้นทำปฏิกิริยากับมีเทนบริเวณใกล้ฐานรองทำให้เกิดอนุภาคมูลฐานของเมทิลและสารสำคัญอื่นๆโดยไม่มีการ Carburizing ที่ไส้หลอดแต่เนื่องจากไส้หลอดมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการเกิดเพชรคือเกิดการย้อยเนื่องจากแรงดึงดูดโลกและการกระจายความร้อนโดยเฉพาะเมื่อใช้ไส้หลอดทั้งสแตน การเปลี่ยนแปลงนี้จะกระทบต่อระยะระหว่างไส้หลอดและฐานรองและกระทบต่ออุณหภูมิของฐานรอง เคมีของแก๊สที่ฐานรองและความสม่ำเสมอของฟิล์ม จึงต้องระมัดระวังการออกแบบช่วยให้ไส้หลอดเกิดการบิดรูปร่างไปน้อยที่สุด เช่น ใช้ไส้หลอดตรงที่มีการรักษาความตึงอยู่ตลอดแม้ว่าอุณหภูมิจะสูงขึ้นนอกจากนี้ยังอาจใช้เทคนิค

เพิ่มจำนวนไส้หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 ระบบอย่างง่าย Hot filament activation CVD

จากการศึกษาการไบอัสฐานรองกับไส้หลอดโดยการเพิ่มสนามไฟฟ้าระบบจะมีพฤติกรรมเหมือนกับเป็นไดโอดเพราะมีฟลักซ์ของอิเล็กตรอนจากไส้หลอด (โลหะที่ $2000 < \text{องศาเซลเซียส}$) ซึ่งมีค่ามากกว่าฟลักซ์จากฐานรอง (ที่อุณหภูมิ $1000 > \text{องศาเซลเซียส}$) ดังนั้นฐานรองจึงเป็นขั้วบวกเมื่อเทียบกับไส้หลอด (คือไบอัสตรง) กระแสอิเล็กตรอนจะไหลจากไส้หลอดไปยังฐานรอง เมื่อไบอัสย้อนกลับจะไม่มีการแผ่ไหลจนกระทั่งถึงแรงดันวิกฤตที่ประมาณ 160-V เกิด Dc Plasma ขึ้นการไบอัสจะมีผลต่อการนิวเคลียสเอชัน ลักษณะและพันธะฟิล์มการไบอัสตรงจะทำให้เกิดการระเบิดของอิเล็กตรอน (Electron bombardment) ทำให้การนิวเคลียสเอชันเพิ่มขึ้นแต่เกรนที่ได้มีความบกพร่องสูงเกิด Secondary nucleation และทวิน (Twins) สังเกตได้จากสเปกตรัมของ Raman ในรูปที่ 1.8(a) เมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับต่ำกว่าแรงดันวิกฤตสเปกตรัมของ Raman จะดีมาก เป็นการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์ม จนกระทั่งเมื่อไบอัสย้อนกลับสูงกว่าแรงดันวิกฤตทำให้เกิดกระแสไอออนไหลผ่านฐานรองเกิดการระเบิดของไอออน (Ion bombardment) ทำลายคุณภาพของฟิล์มอย่างรวดเร็ว ได้สเปกตรัมของ Raman ไม่ดี

1.5.2 Thermal Enhance CVD [5]

ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธีสร้างที่มีความสนใจแพร่หลายมีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ CVD นี้สามารถแบ่งเป็น กลุ่มหลักๆได้ตามเทคนิคที่ใช้คือ 3

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

โดยแผนภาพของระบบ CVD ทั้งกลุ่มนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1. รูปที่ 1.45 และรูปที่ 1.6

1.5.2.1 หลักการพื้นฐานของวิธี Thermal Enhance CVD จะประกอบไปด้วย

1. ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่

เนื่องจากการเกิดของเพชรจากอนุภาคคาร์บอนในบรรยากาศที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเป็นเครื่องยืนยันให้เห็นว่าเพชรจะมีความเสถียรในสภาวะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่ากราฟิตสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ในโครงสร้างเพชรถ้าหากมีอะตอมคาร์บอนข้างเคียงสองอะตอมถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนจะพบว่าพันธะ sp^3

ยังคงมีอยู่ ซึ่งในกรณีเดียวกันนี้กราฟิตจะมีการเปลี่ยนแปลงในวงแหวนกราฟิตทั้งหมด นั่นคือในการเกิดเพชรจากอนุภาคคาร์บอนซึ่งถูกเจือจางด้วยไฮโดรเจนจะนำไปสู่สองกระบวนการคือ หนึ่งคาร์บอนเริ่มก่อตัวในรูปของกราฟิต โดยมีเพชรอยู่ข้างเล็กน้อย และสองเกิดจากการกำจัดกราฟิตออกจากอะตอมไฮโดรเจน อาจกล่าวโดยสรุปว่าอะตอมไฮโดรเจนเป็นตัวสำคัญในการกำจัดกราฟิตหรือลดการเกิดกราฟิตขึ้น

2. ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอน

จากรูปที่ ในบริเวณที่มีการกระตุ้น 1.7(Activation) ก๊าซทั้งสองชนิดด้วยความร้อนจากขดลวดความร้อนทั้งสแตนเลสอุณหภูมิประมาณ องศาเซลเซียส เป็นผลให้โมเลกุลของก๊าซสองเกิดการ 2000 แตกตัวเป็นคาร์บอนอะตอม และไฮโดรเจนอะตอม ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งผ่านจากบริเวณกระตุ้นไปยังฐานรอง โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิและแรงเป่าของก๊าซเฟส

3. อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนี้ อุณหภูมิมีความสำคัญอย่างมากต่อการก่อตัวและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนให้อยู่ในโครงสร้างเพชร รวมทั้งระนาบของฟิล์มที่จะเกิดขึ้นด้วยเพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวฐานรองที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 500°C ถึง 1200°C แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ถ้าหาก

อุณหภูมิของฐานรอง มีค่าสูง หรือต่ำเกินไปจากนี้ อาจจะทำให้เกิดกราฟต์ หรือ Diamond – like carbon (DLC) ได้

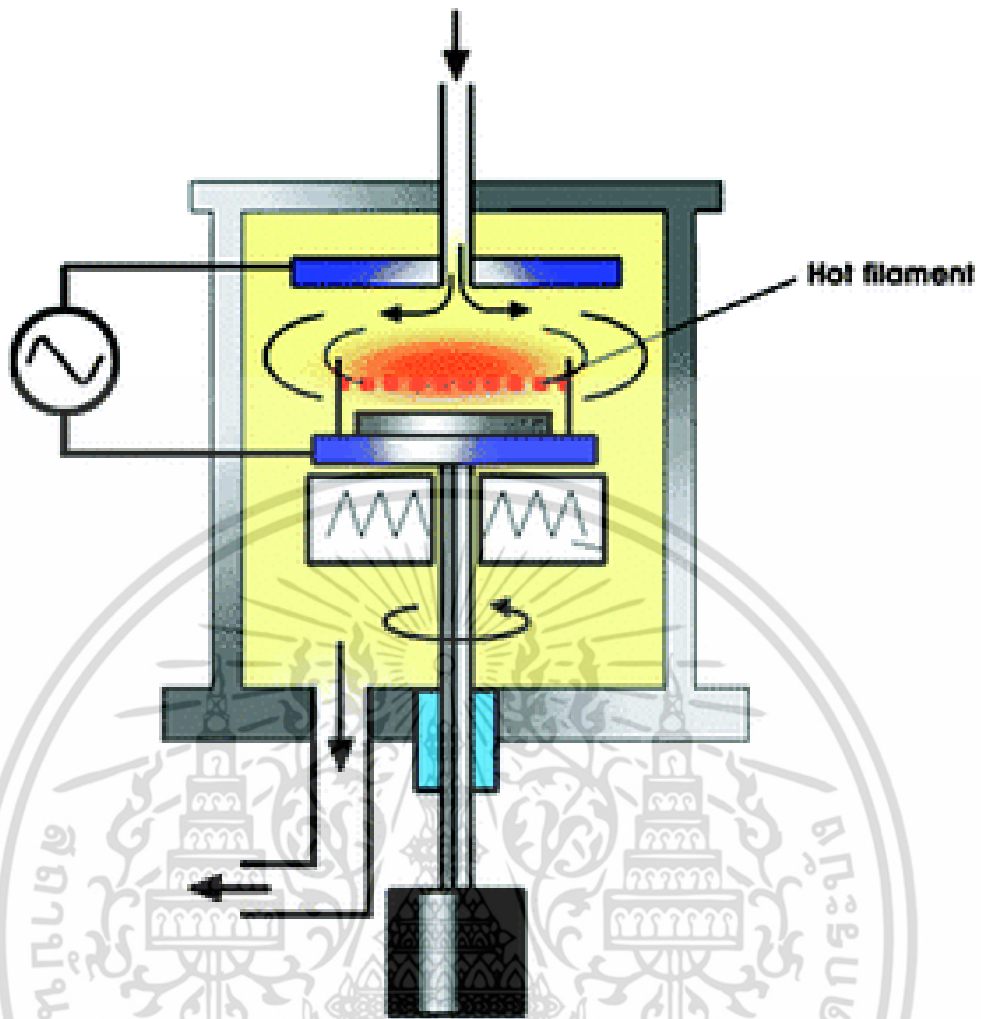
4. ต้องมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง [5]

ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง และมีโอกาสเกิดเป็นฟิล์มมากขึ้น หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการนิวคลีเอชัน ซึ่งมรหลายวิธีในการเตรียมพื้นผิวเช่น การขัด การกัดด้วยสารเคมี การใช้แสงเลเซอร์ ฯลฯ นอกจากนั้นยังรวมไปถึงฐานรองที่ใช้ บริเวณพื้นผิวต้องไม่มีตัวเร่งต่างๆที่ทำให้เกิดกราฟต์

ในกระบวนการสร้างนั้น ต้องใช้หลักการทั้งสี่ข้อนี้รวมกันเพื่อให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดี อัตราการเกิดอัตราการเกิดเป็นฟิล์มเพชรมีค่าสูง หากขาดข้อใดข้อหนึ่งไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่ใช่เพชร คืออาจเป็นกราฟต์ อสัณฐานคาร์บอน หรือ Diamond-like carbon (DLC) ก็ได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการควบคุมเงื่อนไขทั้งสี่ข้อดังกล่าวสามารถใช้เทคนิคหลายอย่างควบคุมตามความเหมาะสม

สำหรับในวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้ เลือกใช้การสังเคราะห์แบบ Thermal Enhanced CVD Methods โดยจะใช้กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Assisted Thermal CVD) วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Matsumoto et al. จาก NIRIM ในปี ค 1981 .ศ.แผนภาพของวิธี Filament- Assisted Thermal CVD แสดงดังรูป 1.4 ภายใน Chamber มีไส้หลอดทั้งสแตนทำหน้าที่กำเนิดความร้อนอุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนที่มีค่าสูงถึง 2300-2000°C ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดมีอุณหภูมิ 1000-700°C

เมื่อก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปใน Chamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตน จะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม ฐานรองสามารถไบอัสไฟเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวคลีเอชัน และอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร วิธี Filament Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ในบริเวณกว้างและมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอดทั้งสแตนสั้นเนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดทั้งสแตนเป็นเวลานาน ทำให้ไส้หลอดเปราะและผิรุ่ยได้ง่าย



รูปที่ 1.5 ระบบอย่างง่าย Hot filament Thermal

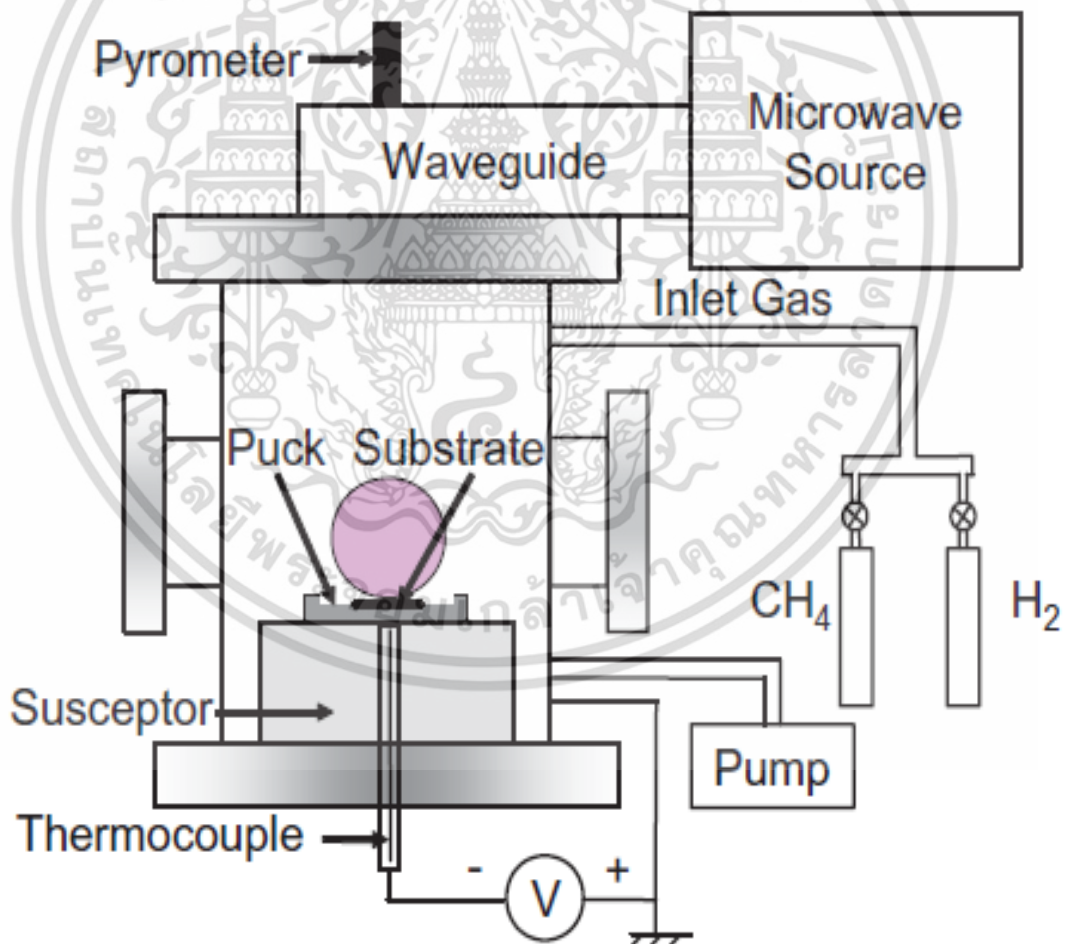
1.5.3 Plasma activation [5]

1.5.3.1. Microwave plasma enhanced CVD

ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรหลายรูปแบบบนฐานรองต่างชนิดกัน โดยเริ่มจากกลุ่มชาวญี่ปุ่นจาก NIRIM (National Institute for Research in Inorganic Materials)[3] โดยใช้ความถี่ไมโครเวฟทำการสั่นอิเล็กตรอนทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนกับไอออนที่เย็นโมเลกุลอะตอมคู่จึงแยกออกเป็นอะตอมได้ และการกระตุ้นไมโครเวฟพลาสมาของโมเลกุลไฮโดรเจนจะทำให้เกิดภาวะสมดุลยิ่งยวดของความเข้มข้นของไฮโดรเจน

ชุดอุปกรณ์ Microwave plasma enhanced CVD แสดงดังรูป 1.9(a) เป็น Tube-style ประกอบด้วย Magnetron ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45GHz ตรงเข้าสู่ Applicator ภายใน Rectangular wave guide ซึ่งเป็นตัวกำหนดขอบเขตของคลื่นไมโครเวฟระหว่างตัวกำเนิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบนี้ขอสงวนสิทธิ์ในราคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแฮมเบอร์ซึ่งใช้ทำปฏิกิริยา โดยแฮมเบอร์นี้จะทำมาจากท่อซิลิกาซึ่งสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ ๑๒๐๐ องศาเซลเซียส และไม่คูดกลืนรังสีไมโครเวฟที่ผนังของท่อ 1200 ปนเปื้อนซิลิกอนในฟิล์มเพชรขึ้นตำแหน่งทิศทางการเคลื่อนที่ของไมโครเวฟจะพุ่งผ่าน Three stub tuners ที่บริเวณ Waveguide ฐานรองจะมีอุณหภูมิ 5-0.1 องศาเซลเซียสใช้แก๊สผสม 1000-400°C มีเทนไฮโดรเจน อัตราการไหลอยู่ระหว่าง 500-50sccm ความดันรวม ทอร์ แต่เนื่องจาก 400-1 Tube-style ดังรูปที่ 1.9(a) มีข้อเสียที่ขนาดของฐานรองเล็ก ดังนั้นในปี 1986 Applied Science and Technology, Inc. [4] จึงพัฒนารูปแบบทางวิศวกรรมของระบบนี้เป็นดังรูปที่ 1.9(b) ฐานรองจะมีอุณหภูมิถึง ความร้อนโดยการคัปปลิงองศาเซลเซียส เกิดคว 1000(Coupling) ด้วยไมโครเวฟ และโดยการระเหิดของพลาสติก สามารถสร้างไมโครเวฟพลาสติกได้ขนาด เซนติเมตร ตามแนว 10 เส้นผ่านศูนย์กลาง พลาสติกจะมีลักษณะกลมเป็นลูกบอลซึ่งจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นมีผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของฟิล์มดังรูป

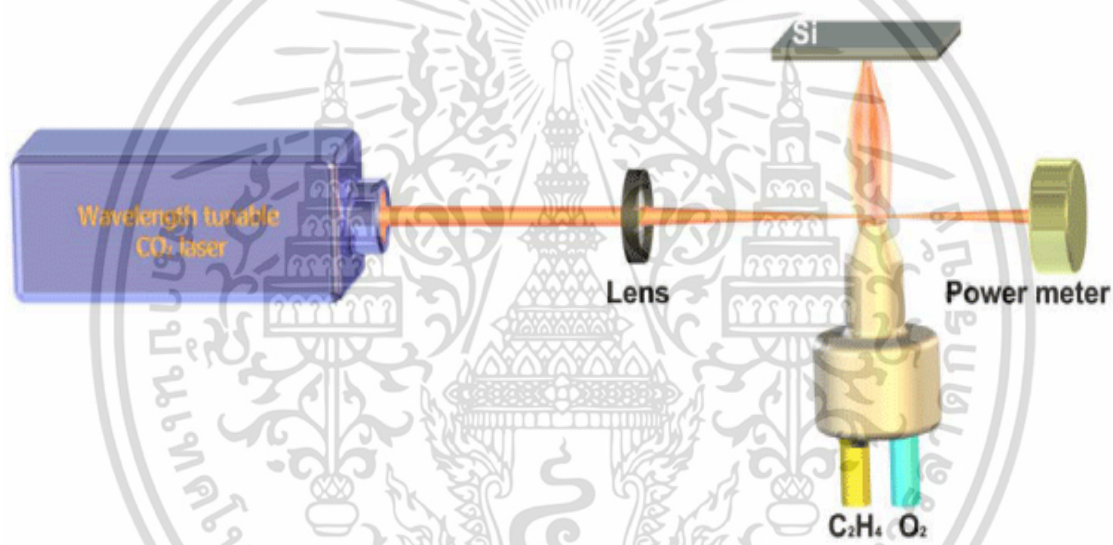


รูปที่ 1.6 Microwave Plasma CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

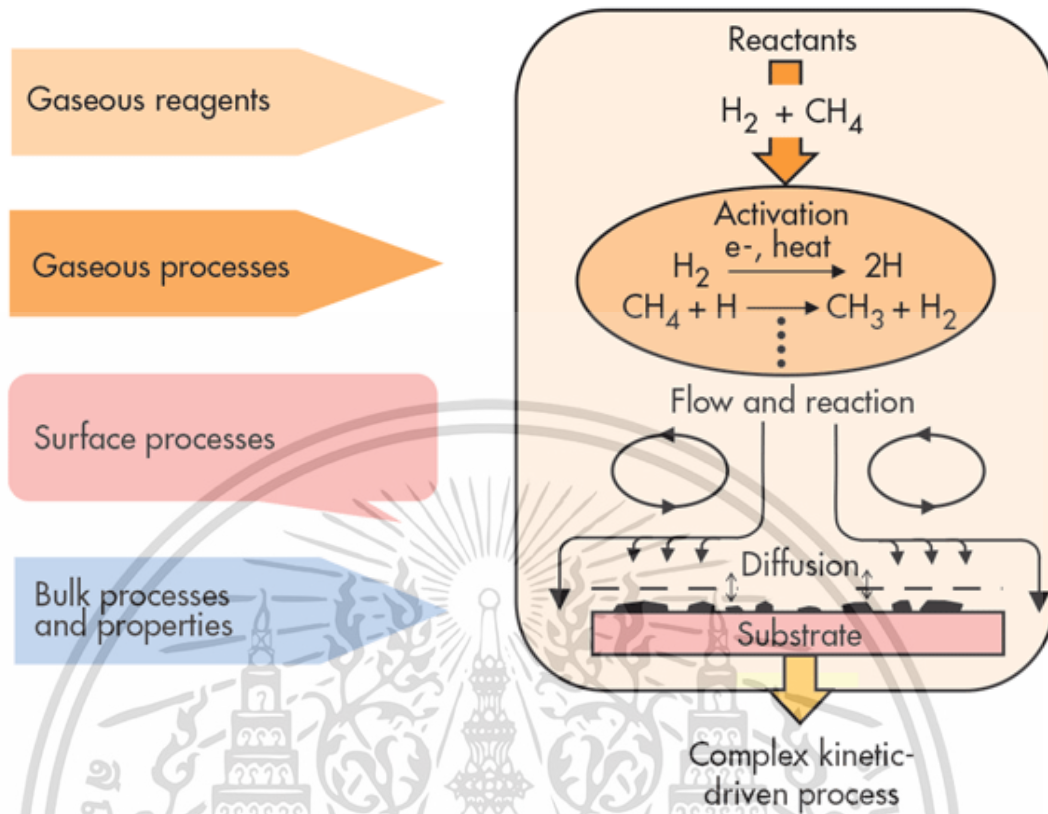
1.5.3.2 Combustion activation CVD

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 1.16 ประกอบด้วยหัวเชื่อมแหล่งจ่ายแก๊ส ออกซิเจนและไฮโดรเจนคาร์บอนเป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือทำการเผาแก๊สออกซิเจนกับไฮโดรคาร์บอนในอัตราส่วนประมาณ จะปรากฏเปลวไฟเป็นสามเปลว ทำการปรับให้เปลว 0.95-0.7 ไฟชั้นกลางสัมผัสกับฐานรองซิลิกอน ควบคุมอุณหภูมิของฐานรองในช่วงองศาเซลเซียส 1000-800 อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้จะตกลงบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพที่ดี μ 200 อัตราการเกิดของฟิล์มเพชรสูงสุดประมาณm/h และอัตราเฉลี่ย μ 50-30m/h สามารถสังเคราะห์ในอากาศได้ ไม่ต้องใช้ Chamber และปั๊มสุญญากาศ ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าขณะสังเคราะห์สามารถสร้างบนฐานรองที่เป็นส่วนโค้งได้ แต่ผลึกที่ได้มีข้อบกพร่องสูง



รูปที่ 1.7 Combustion Flame Assisted CVD[4]

โดยแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ อาทิเช่น อัตราการเกิดฟิล์มเพชรอุณหภูมิที่ใช้การสร้าง อุณหภูมิของฐานรอง, พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้ แต่ท้ายที่สุดฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีสร้างต่างๆจากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกันอันเป็นที่ยืนยันได้ว่า แม้เทคนิคที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรต่างกันไป แต่ผลที่ได้ก็คือ ฟิล์มเพชรเหมือนกันนั่นเอง



รูปที่ 1.8 CVD แบบความร้อน

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่า การสังเคราะห์ด้วยวิธีที่ใช้ความดันและอุณหภูมิสูงเท่านี้ที่สามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในระดับเพชรพลอย ส่วนการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำนั้นนิยมสังเคราะห์เพื่อให้ได้เป็นฟิล์มเพชรเพื่อสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยไม่มีความสนใจทำการศึกษาค้นคว้าถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของก้อนเนื้อผลึกก่อนเชื่อมต่อเป็นฟิล์ม ซึ่งแน่นอนต้องเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ตั้งนั้นในวิทยาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะนำเสนอการสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ความดันต่ำ โดยเลือกใช้เทคนิค CVD แบบความร้อน จากขดลวดความร้อน เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้เพชรสังเคราะห์ที่มีคุณภาพดีเป็นที่ยอมรับและเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเพื่อใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆมากมายอีกด้วย การสังเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังเป็นการนำเสนอวิธีการสังเคราะห์ให้ได้ผลึกเพชรเม็ดเดี่ยวขนาดใหญ่ที่มีความบกพร่องของผลึกน้อยที่สุดอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

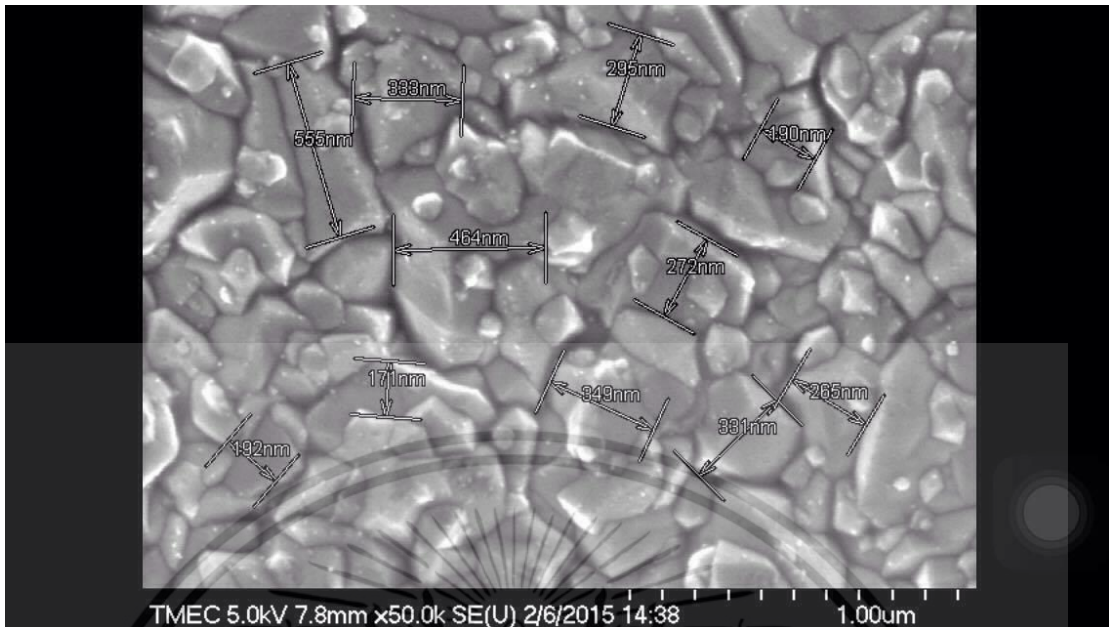
1.6 เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร [5]

ภายหลังจากกระบวนการสร้างเพชรเสร็จสิ้นแล้ว ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบและวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเพชรต่อไป การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรมีหลายวิธีการแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน อาทิเช่น ถ้าต้องการตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชรหรือหาความหนาของเพชรที่เกิดขึ้น นิยมใช้เทคนิควิเคราะห์ด้วยเครื่อง *Scanning electron microscopy (SEM)* แต่หากต้องการวิเคราะห์ถึงพันธะของอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกัน เพื่อตรวจสอบว่าเป็นเพชร, กราไฟต์, อะมอร์ฟัสคาร์บอน หรือ *DLC* นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย *Raman spectroscopy* สำหรับในการศึกษาครั้งนี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร วิธีได้แก่ *Scanning electron microscopy (SEM)* และวิธี *Raman spectroscopy*

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 1.6.1 SEM (*Scanning electron microscopy*)

SEM เป็นเทคนิคที่นิยมในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน หลักการพื้นฐานของ *SEM* คือทำการกวาดโพกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิวขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโพกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กที่สุดได้ถึง $20\text{-}10\text{nm}$ โดยขนาดของอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุลลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด *CRT (Cathode-ray tube)* ข้อดีของ *SEM* เมื่อเทียบกับ *Optical microscopes* ชนิดอื่นๆ คือ *SEM* มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ $40000\text{-}50x$) ความคมชัดของภาพ ($2.5\text{-}10\text{nm}$), ความลึกของสนามมากกว่า เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเปรียบเทียบ 500 กับ *TEM (Transmission electron microscopy)* ซึ่งสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบต้องมีความบางมากๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ *SEM* สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อน อย่างไรก็ตามในการใช้งานลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค *SEM* นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น *Raman spectroscopy*

นอกจากนี้เทคนิคต่างๆในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี *CVD* ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรอง *Si*) บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระ และรูปร่างลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชรแสดงดังรูปที่ 1.8 ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น ขึ้น 1.8 โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองและความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรคาร์บอนต่อแก๊สไฮโดรเจน

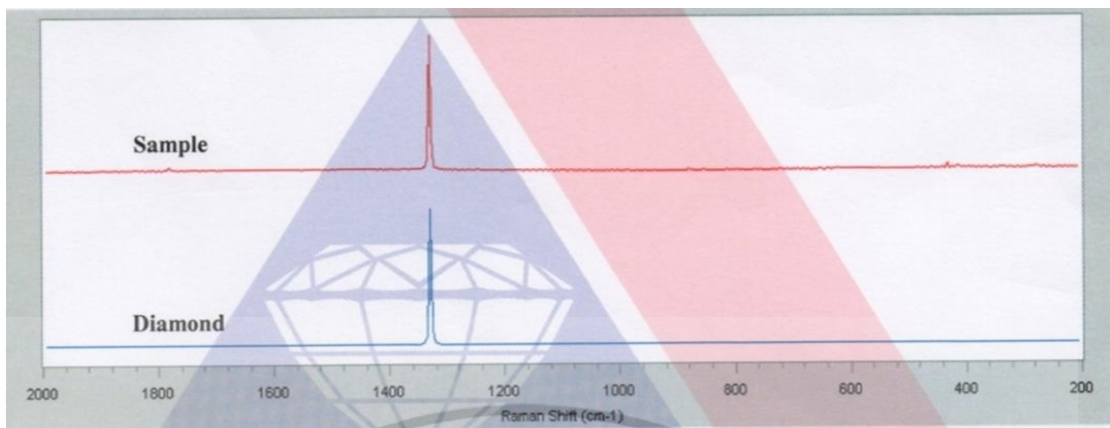


รูปที่ 1.9 ลักษณะพื้นผิวหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

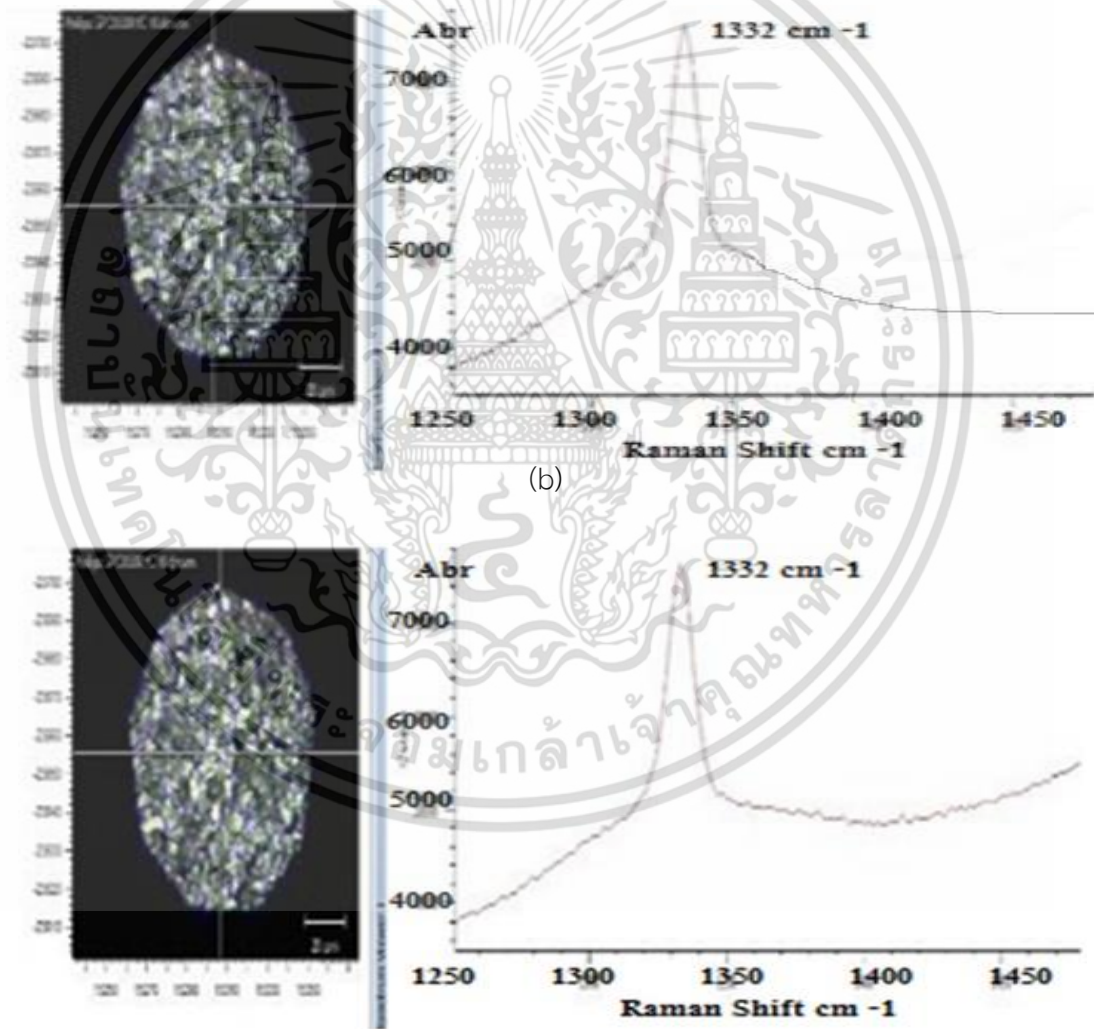
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 1.6.2 Raman spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของวัสดุโดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสง โดยทำการวัดการลดลงของความเข้มลำแสงที่ผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน (*non-absorbing medium*) ผลของ *Raman* นี้จะเป็นการกระเจิงในระดับโมเลกุลนั่นคือการกระเจิงของแสงนี้เกิดจากโฟตอนของลำแสงกับการสั่นภายในแลตทิซหรือโฟนอน ดังนั้น *Raman spectroscopy* จึงเป็นวิธีที่นิยมนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร เนื่องจากพันธะของคาร์บอนมีความไวต่อการกระเจิงของ *Raman* สูงดังนั้นจึงสามารถจำแนกประเภทต่างๆของโครงสร้างคาร์บอนได้ เช่น เพชร กราไฟต์ และอะมอร์ฟัสคาร์บอนซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ *Raman spectrum* และพันธะของคาร์บอนแสดงไว้ในตารางที่โดยที่ค่าสเปกตรัมของ 1.2 1332 เพชรธรรมชาติมียอดอยู่ที่ cm^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 1.9(a) และลักษณะสเปกตรัมของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.9(b) และ 1.9(c) โดยที่ยอดของกราฟ *Raman* อันดับหนึ่งที่หนึ่งสำหรับคาร์บอนโครงสร้างเพชร อะมอร์ฟัสและกราฟต์จะมีค่าอยู่ที่ $1333cm^{-1}$, $1550 cm^{-1}$ $1580 cm^{-1}$ ตามลำดับจากรูปที่ 1.9(b) และ 1.9(c) บอกได้ว่า ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเพชรที่ใกล้เคียงธรรมชาติและบริสุทธิ์มาก แต่ยังมีปริมาณกราฟต์และอะมอร์ฟัสคาร์บอนปนอยู่บ้าง ข้อดีที่สุดของการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วย *Raman Spectroscopy* นี้ คือเป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงานที่ตรวจสอบเสียหาย หรือทำลายโครงสร้าง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(c)

รูปที่ 1.10 การวิเคราะห์ความเป็นเพชร Raman spectroscopy ของผลึกเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี

CVD แบบความร้อน (a)เพชรธรรมชาติ(b) เพชรสังเคราะห์(c) เพชรสังเคราะห์ที่มี

ปริมาณแกรไฟต์ปะปนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน [6]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ลักษณะโครงสร้างของผลึก

สารกึ่งตัวนำ คือ กลุ่มของสารที่มีความนำอยู่ระหว่างโลหะและฉนวน แบ่งสารกึ่งตัวนำออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุซึ่งคือธาตุหมู่ IV ตามตารางธาตุ และกลุ่มที่เป็นสารประกอบสารกึ่งตัวนำ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสารประกอบของธาตุหมู่ III และหมู่ V หรืออยู่ในรูปสารประกอบของธาตุหมู่ II กับ VI ก็ได้

วัสดุสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุจะประกอบด้วยอะตอมของธาตุชนิดเดียวกัน เช่น ซิลิกอน และเยอรมันเนียม ซิลิกอนเป็นธาตุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในวงจรรวมและมีความสำคัญมาก ส่วนสารประกอบ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ หรือแกลเลียมฟอสไฟด์ เป็นการรวมตัวของธาตุหมู่ III กับหมู่ V แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบที่นิยมที่สุด มีคุณสมบัติทางแสงที่ดี ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นอุปกรณ์ทางแสงและใช้เฉพาะทาง ยกตัวอย่างเช่น ที่มีความเร็วสูง อีกรูปแบบหนึ่งที่พบคือสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วย 3 ธาตุ (Ternary) เป็นสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ ยกตัวอย่างเช่น $Al_xGa_{1-x}As$

โครงสร้างของวัสดุสารของแข็งเกิดขึ้นได้โดยการเกาะกันระหว่างอะตอมจำนวนมากมายของธาตุ แต่ละอะตอมเกาะเกี่ยวกันอย่างแข็งแรง ลักษณะการจัดเรียงอะตอมภายในของแข็งและรูปแบบการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอม จะมีผลไปถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารของแข็งนั้นๆด้วย เราอาจพิจารณาจัดแบ่งลักษณะโครงสร้างของวัสดุสารของแข็ง ตามลักษณะการเกาะเกี่ยวและเรียงตัวของอะตอมได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. โครงสร้างแบบไม่เป็นผลึก (Noncrystalline) หรือ ออสัญฐาน หรือ อมอร์ฟัส (Amorphous)
2. ผลึกรูปเดี่ยว (Single crystal)
3. ผลึกหลายรูป (Polycrystal)

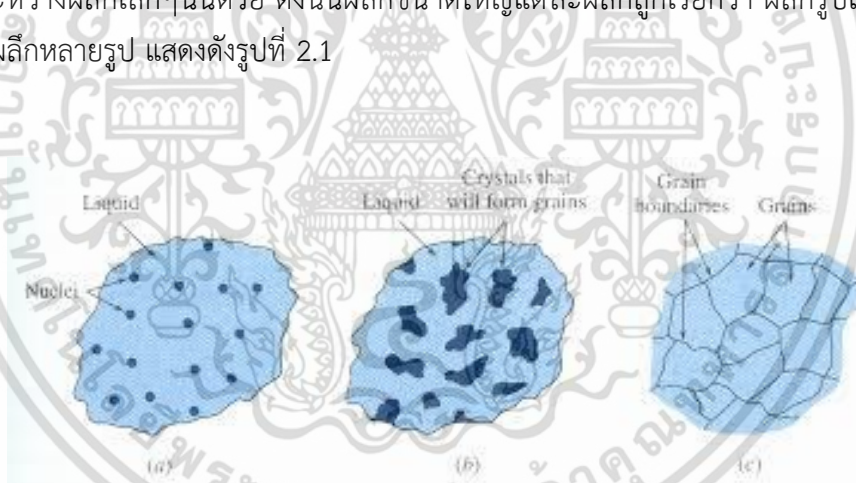
อสัญฐาน หรือ อมอร์ฟัส หมายถึงลักษณะโครงสร้างของสารของแข็งซึ่งมีการจัดเรียงของอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบ อะตอมต่างๆจะเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายไร้รูปแบบ และไม่มีตำแหน่งที่อยู่แน่นอน จึงทำให้วัสดุที่มีโครงสร้างเช่นนี้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่แน่นอน เปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อมซึ่งสามารถจะควบคุมได้จึงไม่เหมาะสม จึงต้องการการพัฒนาเพื่อให้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ เพราะวัสดุประเภทนี้ใช้ต้นทุนในการสร้างที่ต่ำ ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์จากอสัญฐานได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกรูปเดี่ยว จะมีความเป็นระเบียบของการจัดเรียงอะตอมสูง มีข้อดีคือมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหนือกว่าสารที่ไม่เป็นผลึกรูปเดี่ยว เนื่องจากขอบเกรนมีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารลดลง

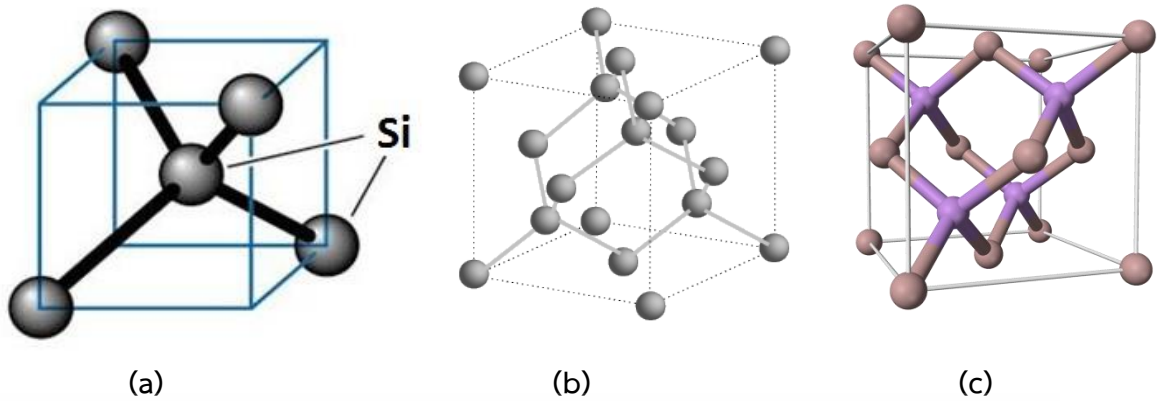
ผลึกลหลายรูป คือผลึกที่อะตอมมีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบหลายๆขนาด หรือมีลักษณะของผลึกแต่ไม่ต่อเนื่อง หรือมีความเป็นระเบียบน้อย

เนื่องจากผลึกคือ ของแข็งที่มีความเป็นระเบียบด้วยโครงสร้างอะตอมใน 3 มิติ ภาวะที่เป็นผลึกคือที่สมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ของของแข็ง ภายใต้เงื่อนไขทางเทอร์โมไดนามิกส์จะมีเฟสของแข็งเฉพาะในแต่ละผลึกที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่คงที่ในโครงสร้างของผลึกหนึ่งๆ ระนาบหน้าของผลึกในธรรมชาติจึงเป็นลักษณะภายนอกที่แสดงออกของผลึก ซึ่งลักษณะภายนอกนี้เป็นหนึ่งในลักษณะมหภาคของโครงสร้างอะตอมเฉพาะผลึก (ผลึกอาจไม่มีรูปร่างหลายหน้า) (Polyhedral) แต่ผลึกเหล่านั้นก็ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพที่อยู่ในระดับมหภาคที่ยอมรับได้ว่าแตกต่างจากของแข็งอสัณฐาน ขณะเดียวกันของแข็งตามธรรมชาติและของแข็งสังเคราะห์ แร่ธาตุสารประกอบทางเคมีต่างๆ โลหะ โลหะอัลลอยด์ และอื่นๆ คือ ผลึกลหลายรูปซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวรวมกันแบบสุ่มของผลึกเล็กๆ ซึ่งมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน โดยคุณสมบัติของผลึกลหลายรูปและ Texture ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลึกเล็กๆที่รวมตัวกันอยู่ ขึ้นอยู่กับขนาดและความเฉพาะตัวของผลึกเหล่านั้น และแรงกระทำระหว่างผลึกเล็กๆนั้นด้วย ดังนั้นผลึกขนาดใหญ่แต่ละผลึกถูกเรียกว่า ผลึกรูปเดี่ยวเพื่อแยกออกจากผลึกลหลายรูป แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพแลตทิซของผลึก (a) อสัณฐาน

ลักษณะของผลึกสารกึ่งตัวนำทั้งที่เป็นธาตุชนิดเดียวและสารประกอบ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 ซึ่งพบว่าในหนึ่งยูนิตเซลล์ของคาร์บอนโครงสร้างเพชร ซิลิกอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ จะประกอบด้วย 8 อะตอม เช่นกัน แต่โครงสร้างผลึกแบบซิงเกิลนิตของ แกลเลียมอาร์เซไนด์จะเกิดจากการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมของธาตุต่างชนิดกัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะผลึกสารกึ่งตัวนำ (a)Tetrahedron ของซิลิกอน (b)เพชร (c)แกลเลียมอาร์เซไนด์

วิธีปลูกผลึก

การเกิดผลึกเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเฟส กระบวนการเกิดผลึกจึงแบ่งออกตามการเปลี่ยนเฟสได้ 3 กลุ่ม คือ

1. การเกิดผลึกจากของแข็ง เป็นกระบวนการเปลี่ยนเฟสจากของแข็งเป็นของแข็ง(S->S)
2. การเกิดผลึกจากของเหลว เป็นกระบวนการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็ง(L->S)
3. การเกิดผลึกจากไอ เป็นกระบวนการเปลี่ยนเฟสจากแก๊สเป็นของแข็ง(V->S)

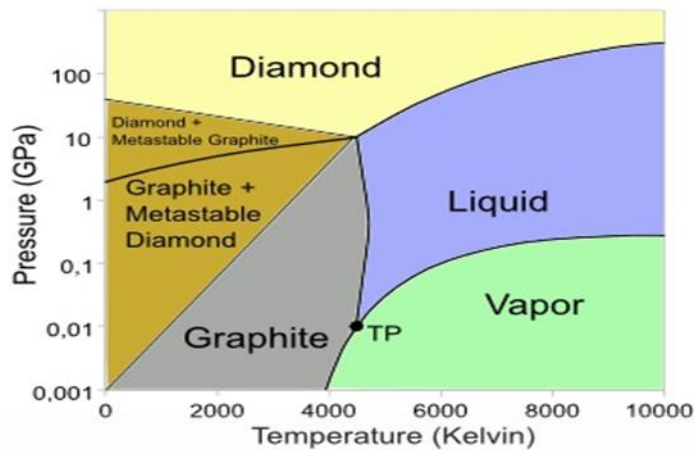
กระบวนการแรกไม่ค่อยพบนักเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นระหว่างจุดหลอมเหลวกับอุณหภูมิห้อง ส่วนกระบวนการที่สองที่รู้จักกันมาก เช่น เทคนิค Freezing, Zone refining และ Czochralski ส่วนกระบวนการเกิดจากไอ ใช้ในการสร้างชั้นอีพิแทกเซียล (Epitaxial) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแก๊สเฟสอาจเป็นสารบริสุทธิ์หรือมีการเติมแก๊สอื่นเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านสำหรับสารซึ่งกำลังก่อตัวขึ้น

กระบวนการปลูกผลึกจากไอ(Vapor growth process) [9] แบ่งออกได้เป็น 3 พวกหลักๆ คือ

1. Sublimation ซึ่งเป็นกระบวนการที่ของแข็งกลายเป็นไอและเกิดเป็นผลึกขึ้นในบริเวณที่เย็น
2. Vapor transport คือกระบวนการที่ของแข็งหลุดออกมาพร้อมกับตัวพาที่เป็นแก๊ส
3. Gas-phase reaction ซึ่งเป็นกระบวนการเกิดผลึกจากการเข้าทำปฏิกิริยากัน

โดยตรงของไอเฟส

ธาตุบางตัว เช่น อาร์เซนิกและฟอสฟอรัสและสารประกอบบางชนิด เช่น ZnS และ CdS มี เฟสไดอะแกรมแสดงสถานะได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งที่ความดันปกติ สารเหล่านี้จะเปลี่ยนจากของแข็งเป็นไอเฟสได้โดยตรงและเปลี่ยนกลับมาอีกครั้งขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของวัสดุสารที่เปลี่ยนจากเฟสของแข็งเป็นไอที่ความดันบรรยากาศ

จากรูปที่ 2.3 เรียกกระบวนการลักษณะนี้ว่า Sublimation ซึ่งสำหรับวัสดุเหล่านี้ อุณหภูมิ ณ จุดที่มีสามสถานะ (T ; Triple point) จะอยู่ที่ความดันมากกว่า 1 atm วัสดุเหล่านี้อาจก่อตัวเป็นผลึกได้โดยตรงจากไอเฟสในสุญญากาศหรือในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย วัสดุอื่น ๆ ส่วนใหญ่จะมี Triple point อยู่ต่ำกว่า 1 atm และอาจเป็นไปได้ตามทฤษฎีของ Sublimation ได้ หากใช้ความดันลดลงและจะเกิดเป็น Snow crystal ขึ้น

ผลึกของโลหะบางครั้งอาจเกิดขึ้นได้ด้วยวิธี Sublimation นี้ จากการใช้ไส้หลอดซึ่งกระบวนการนี้รู้จักกันในชื่อของการทำให้กลายเป็นไอ (Evaporation) ซึ่งหากทำอย่างรวดเร็วเรียกว่า Flash evaporation แต่เป็นเทคนิคที่นิยมใช้สำหรับการสร้างฟิล์มบาง ไม่ใช่ในการปลูกผลึกจึงเป็นกระบวนการหนึ่งในเชิงพาณิชย์สำหรับการสร้างฟิล์มและการเคลือบ

Vapor transport เป็นกระบวนการที่คล้ายกับ Sublimation มาก ยกเว้นจะใช้แก๊สพาเข้ามาช่วย ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นธาตุฮาโลเจนซึ่งจะช่วยให้เกิดการระเหยของโลหะที่ระเหยยาก Langmuir [3] สังเกตการส่งผ่านของทั้งสแตนท์ที่อยู่ในคลอรีนที่มีความดันค่าน้อยๆ ทั้งสแตนท์จะหลุดจากส่วนที่เย็นกว่าของเส้นลวดร้อนที่อยู่ใกล้กัน 2 เส้น ไปสู่เส้นที่ร้อนกว่า กระบวนการนี้ใช้เมื่อต้องการทำให้ไส้หลอดทั้งสแตนท์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอให้เท่ากันโดยใช้ความต้านทานความร้อน WCl_6 ทั้งสแตนท์จะส่งผ่านจากส่วนที่เย็นและหนากว่าไปยังส่วนที่ร้อนและบางกว่า ตามปฏิกิริยา



Van Arkel และผู้ร่วมงาน [4] ได้พัฒนาวิธีการทำให้โลหะมีความบริสุทธิ์โดยใช้ฮาโลเจน เช่น ไอโอดีน และใช้เทคนิค Vapor transport โลหะจะถูกทำให้ระเหยออกมากับไอโอดีนและแตกตัวบนไส้หลอดร้อน โลหะที่มีการส่งผ่านด้วยวิธีนี้ คือ Ni, Cu, Fe, Cr, Si, Ti, Zr, Hf, Mo, Th, V, Nb, Ta และ U

การส่งผ่านไอโอดีนคือตัวอย่างหนึ่งของการปลูกผลึก อย่างไรก็ตามสิ่งหนึ่งอาจเกิดขึ้นเมื่อไอโอดีนทำตัวเป็นตัวเร่งการส่งผ่านในสารประกอบคือในขั้นสุดท้ายจะไม่เข้าไปรวมอยู่ในกระบวนการ ส่วนใน Gas-phase reaction ที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในกระบวนการ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในเชิงพาณิชย์อย่างมาก เป็นวิธีการสร้างผลึกอพิแทกเซียของสารกึ่งตัวนำ เช่น ปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนกับคลอไรด์ที่ระเหยได้ตามปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การก่อตัวของซิลิกอนสามารถเจือสารเป็นชนิดพีหรือเอ็นโดยการเติมไอ BCl_3 หรือ PCl_3 ให้กับไตรคลอโรไซเลนและสามารถผลิต GaAs ได้ด้วยวิธีนี้เช่นเดียวกัน แต่ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของแก๊สที่ผสมอย่างระมัดระวัง

2.2 หลักการ CVD แบบความร้อน

จากที่กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีต่างๆ แม้แต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามจะมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญเหมือนกันดังนี้

1. ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่
2. ต้องมีการกระตุ้นแก๊สที่มีอนุภาคของคาร์บอน
3. อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม
4. ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ในกระบวนการสร้างนั้น ต้องใช้หลักการทั้งสี่ข้อนี้ร่วมกันเพื่อให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพ อัตราการเกิดฟิล์มเพชรมีค่าสูง หากขาดข้อใดข้อหนึ่งไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่ใช่เพชร คือ อาจเป็นแกรไฟต์ อัดคาร์บอนหรือ Diamond-like carbon (DLC) ก็ได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการควบคุมเงื่อนไขทั้งสี่ข้อดังกล่าว สามารถใช้เทคนิคหลายอย่างควบคุมตามความเหมาะสม วิธี HFCVD นี้จะได้เพชรที่มีคุณภาพดีและอัตราการก่อตัวสูงพอสมควร อีกทั้งสิ่งเจือปนที่เกิดจากไส้หลอดมีน้อยมาก ยอมรับการใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้จนเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสร้างฟิล์มเพชร โดยกลไกการเกิดฟิล์มเพชรจากวิธี CVD จะประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ที่สอดคล้องกับหลักการข้างต้น เพื่อให้เกิดอนุภาคคาร์บอนอยู่ในสภาวะแอคทีฟ เกิดการก่อตัวหรือนิวเคลียสเริ่มต้น เกิดเป็นผลึกเพชร

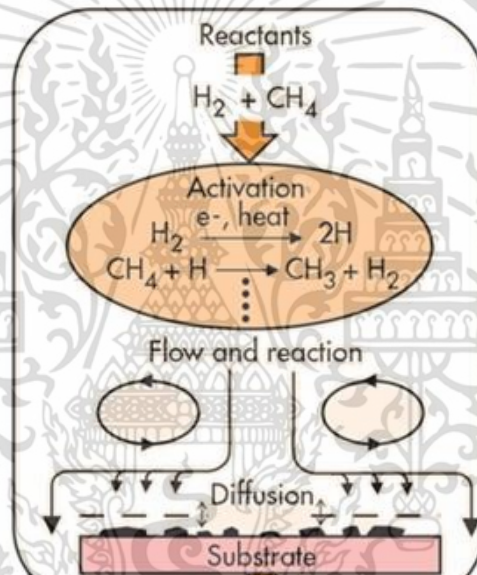
2.2.1 กระบวนการของแก๊สเฟส

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐาน คือต้องมีการกระตุ้นแก๊สเฟสด้วยพลังงานสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่าง คือ ทำให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาก่อตัวที่พื้นผิว และแยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นสูงของแก๊สเฟสของอะตอมไฮโดรเจน

แม้ว่าแต่ละระบบการสร้างต่างๆจะมีความแตกต่างกันในแง่ของรูปแบบทางวิศวกรรมแต่ทั้งหมดจะมีลักษณะสำคัญพื้นฐานเหมือนกัน คือ ทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดีออกมา พลังงานจำนวนมากที่ใช้จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าหรือเคมี ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนแตกตัว การสร้างจะกระทำที่ความดันต่ำ (ประมาณ 10 torr – 1 atm) เพื่อป้องกันการรวมตัวของอะตอมของไฮโดรเจนกลับไปสู่รูปของโมเลกุล อุณหภูมิของแก๊สเฟสมีค่าสูงกว่า 1,700 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นที่บริเวณ Activation zone การระบายความร้อนทั้งแบบแอคทีฟหรือพาสซีฟเป็นตัวรักษาระดับอุณหภูมิของฐานรองให้มีค่าประมาณ 925 องศาเซลเซียส

จากแผนภาพในรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ CVD สารเข้าทำปฏิกิริยาหรือแก๊สที่ใส่เข้าไปคือแก๊สผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกได้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ Hot filament และ Plasma สารเข้าทำปฏิกิริยาที่เข้าไปในบริเวณที่มี อุณหภูมิสูงหรือพลังงานสูงจะถูกกระตุ้นภายในบริเวณนั้น ปฏิกิริยาเคมีเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุล ไฮโดรเจนแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10^{-9} วินาที และเกิดการชนกัน ของแก๊สในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้เวลาดั้งแต่ 10^{-4} ถึง 10 วินาที จากนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่างๆจะถูก ส่งผ่านโดยการไหล การแพร่ และการพาจากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังฐานรอง ที่บริเวณใกล้ฐานรองการ แพร่จะเข้าสู่บริเวณที่การไหลหยุดนิ่งซึ่งเรียกว่าชั้นขอบเขต(Boundary layer) พื้นผิวฐานรองเกิดการ ดูดกลืน การคาย การแพร่ที่พื้นผิวหรือเข้าไปในเนื้อสารและเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ กระบวนการที่ เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นประโยชน์ต่อการเกิดเพชรและมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆเป็น ฟังก์ชันซับซ้อนกับอุณหภูมิ โครงสร้างและองค์ประกอบของพื้นผิว นอกจากนี้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม เพชรด้วยวิธี CVD คาร์บอนที่เกิดขึ้นสามารถจับตัวเป็นพันธะเคมีได้หลายสถานะพลังงานทั้งแบบ sp^1 , sp^2 , หรือ sp^3 หากแต่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง เช่น อุณหภูมิความดัน โหมดการกระตุ้น ความเข้มข้นของแก๊สที่ใช้ หรือแม้แต่ว่ารูปทรงของเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ CVD ของเพชร [4]

2.2.1.1 ปฏิกิริยาที่ไล่หลอด

Langmuri เป็นคนแรกที่ค้นพบการแตกตัวของไฮโดรเจนบนไส้หลอดทั้งสแตนที่ มีอุณหภูมิสูงทั้งทำให้เกิดอะตอมไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพ ต่อมาจึงได้มีการนำมาใช้ในการสร้างฟิล์ม เพชรโดยทำเป็นเครื่องปฏิกรณ์ ชนิด Hot filament ขึ้น Jansen et al. [3] ได้ศึกษาถึงการแตกตัว ของแก๊สไฮโดรเจนที่บริเวณไล่หลอด โดยอาศัยความแตกต่างของกำลังงานที่ใช้ไปโดยไล่หลอดใน สภาวะสุญญากาศ และในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน วัดค่าของอัตราการแตกตัวของแก๊ส ไฮโดรเจนพบว่า อัตราการแตกตัวขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของไล่หลอดและจากการวิเคราะห์อัตรา ของอะตอมไฮโดรเจนที่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นๆอีก ตัวอย่างเช่น สัมประสิทธิ์ การแพร่ ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางของหลอดและค่าคงที่อัตราการแตกตัว

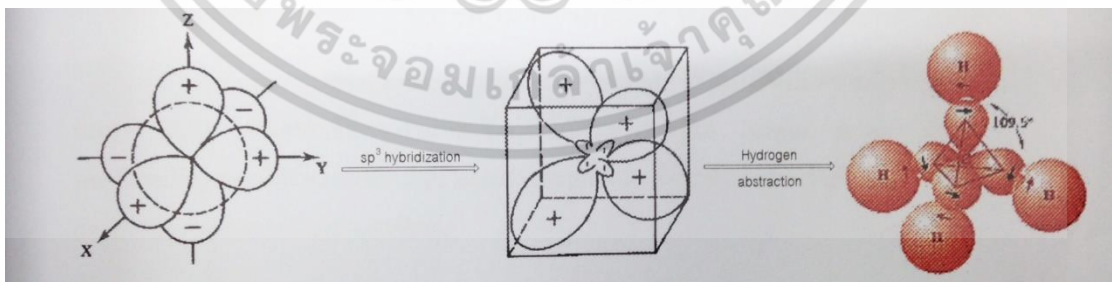
2.2.1.2 ผลของอุณหภูมิฐานรอง

ในกระบวนการสร้างเพชรด้วยวิธี CVD อุณหภูมิของฐานรองจะส่งผลต่อการเกิดเพชรหลายอย่าง Spitsyn et al. ได้เสนอผลจากการทดลองว่ามีเพชรเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของฐานรองมีค่าตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียส ถึง 1,200 องศาเซลเซียส แล้วแต่วิธีการที่ใช้ โดยหากอุณหภูมิฐานรองมีค่าเกินกว่า 1,200 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จะเป็นแกรไฟต์ และหากอุณหภูมิฐานรองต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ในแก๊สผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจน ผลที่ได้จะเป็น DLC เกิดขึ้นแทนเมื่อไม่กี่ปีมานี้ Inspektor et al. รายงานถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่สร้างเพชรขึ้นได้ประมาณ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้แก๊สที่มีส่วนผสมของ C-H-O นอกจากนี้อุณหภูมิฐานรองยังมีผลต่ออัตราการเกิดเพชรอีกด้วย โดยอัตราการเกิดเพชรจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส

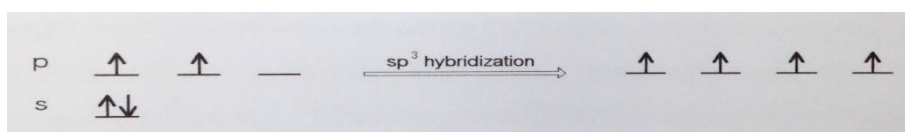
นอกจากนี้ Zn et al. ได้ศึกษาถึงลักษณะการเกิดรูปทรงต่างๆของผลึกและฟิล์มเพชรที่สร้างด้วยวิธี Microwave plasma CVD พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรอง ความเข้มข้นของมีเทน และอัตราการไหลของแก๊สมีผลอย่างยิ่งต่อการเกิดระนาบของผลึก พบว่าผิวหน้าของฟิล์มเพชรจะมีการเปลี่ยนระนาบไปเรื่อยๆ

2.2.1.3 บทบาทของแก๊สไฮโดรเจน

การเกิดเพชรจากอนุมูลของคาร์บอนมักจะพบแกรไฟต์ซึ่งเป็นพันธะ sp^2 อยู่เสมอ อะตอมไฮโดรเจนจะช่วยให้เกิดความเสถียรในสถานะของเพชรมากกว่าแกรไฟต์ เนื่องจากสมดุความหนาแน่นสูงของอะตอมไฮโดรเจนที่บริเวณพื้นผิวการเกิดมีคุณสมบัติในการกัดและกำจัดแกรไฟต์ อะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชรซึ่งมี Dangling bond จะถูกจับโดยอะตอมไฮโดรเจนป้องกันการเปลี่ยนพันธะจาก sp^3 ไปเป็น sp^2 หรือ sp^1 ซึ่งพันธะ sp^3 แม้ว่าจะต้องใช้พลังงานสูงกว่าในการทำไฮบริดเซชัน (Hybridization) แต่เมื่อสร้างพันธะแล้วจะคายพลังงานออกมามากกว่าที่ใช้ไปทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมอยู่ในแนวมุมของทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) แต่ละไฮบริดออร์บิทัล (Hybrid orbital) จะทำมุม 109.5° ซึ่งกันและกันดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมีการเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Promotion) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การไฮบริดไดเซชันและรูปร่างของ sp^3 ไฮบริดออร์บิทัล [4]



รูปที่ 2.6 ระดับพลังงานออร์บิทัลและการจัดเรียงอิเล็กตรอน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมไฮโดรเจนยังมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดเพชรโดยจะเป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนที่จับตัวเป็นพันธะ C_d-H กับอะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชรให้พร้อมที่จะรับอะตอมคาร์บอนตัวใหม่เพิ่มเข้าไป โดยอะตอมคาร์บอนในพันธะระหว่าง C_c-H เมื่อสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนออกไปจะเป็น C_d* ดังสมการ



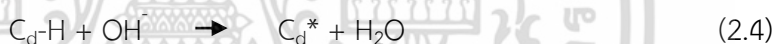
เมื่อ C_d คือ อะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของผลึกเพชร

C_d* คือ อะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าของผลึกเพชรที่ถูกกระตุ้น

2.2.1.4 บทบาทของแก๊สออกซิเจน [2-4]

การเติมออกซิเจนเข้าไปในแก๊สผสมระหว่างไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน ได้รับการรับรองจากผู้ศึกษาการสังเคราะห์เพชรหลายกลุ่ม เช่น Kawato et al. [2] ว่าทำให้เพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีที่อุณหภูมิฐานรองต่ำ และยังช่วยให้อัตราการเกิดดีขึ้น

บทบาทหลักๆ ของออกซิเจนคือช่วยให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมามีคุณภาพดี เป็นที่เชื่อกันว่าหากเราผ่านอนุมูลของแก๊สออกซิเจน เช่น O²⁻, O₂ หรือ OH⁻ เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนโครงสร้างอื่น และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น อนุมูล OH⁻ สามารถกระตุ้นอะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าดังสมการ



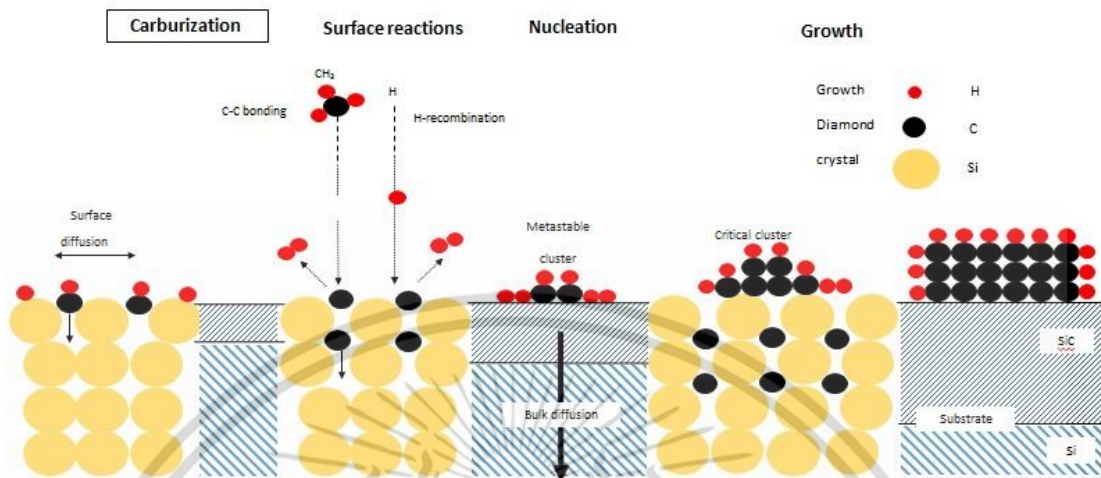
อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาจากสมการ (2.4) ยังไม่มีความสำคัญเท่ากับสมการ (2.3) ส่วนหน้าอื่นๆของออกซิเจนที่มีผู้ศึกษาไว้ได้แก่ Kawato et al. เสนอว่าออกซิเจนมีคุณสมบัติที่จะลดความหนาแน่นของอะเซทิลีน ซึ่งถูกสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดแกรไฟต์และอสัณฐานคาร์บอน

2.2.2 ปรากฏการณ์นิวเคลียชัน [3,11]

ปรากฏการณ์การนิวเคลียชันของเพชร CVD เป็นปรากฏการณ์การก่อตัวเริ่มต้นของแก๊สเฟสเป็นผลึกเพชร ตามด้วยการเกิดไฮโมอิพิแทกเซียล การเกาะตัวของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวเพื่อเพิ่มขนาดของก้อนเนื้อสาร เป็นปรากฏการณ์การสร้างนิวเคลียสเริ่มต้นโดยขนาดของนิวเคลียสต้องมีขนาดมากกว่าขนาดวิกฤต สามารถคงอยู่และเสถียรได้นานพอที่จะทำให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของอนุภาคที่ประกอบกันขึ้นจนมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของระบบเป็นลบเพื่อให้สามารถเกิดกระบวนการขึ้นได้ ซึ่งระบบนี้หมายถึงฐานรองอนุภาคที่เกิดขึ้นและแก๊สเฟส

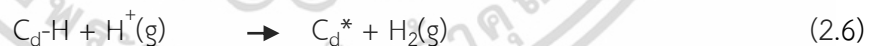
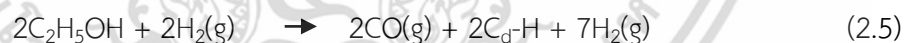
เมื่ออนุภาคอิสระของแก๊สเฟสแพร่เข้าไปบนพื้นผิวฐานรองจะก่อตัวกันด้วยพันธะ sp² เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบวงแหวน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons ; PAHs) อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่ฐานรองจนถึงค่าหนึ่งซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบางๆที่เรียกว่าเอกสาร์เป็นเอกสาร์ที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Intermediate layer เมื่ออะตอมคาร์บอนเกาะตัวกันมากพอ จะเกิดขึ้นตอนการเกิดเพชรพันธะ sp^2 เปลี่ยนรูปเป็นพันธะ sp^3 โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวช่วย กลไกการนิวเคลียชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer เป็นดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการนิวเคลียชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง[11]

ระหว่างการนิวเคลียชันของเพชรซึ่งเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของนิวเคลียสของแกรไฟต์ ความเสถียรของนิวเคลียสไอต์ของเพชรเป็นการกำจัดคาร์บอนพันธะ sp^2 ออก จะต้องไม่มีโมเลกุลไฮโดรเจนจำนวนมากซึ่งมีความอึดตัวอย่างยิ่งยวดและความอึดตัวอย่างยิ่งยวดของไฮโดรเจนอะตอมจากการกระตุ้นของแก๊สเฟสด้วยใส่หลอดร้อน โมเลกุลของไฮโดรเจนจะไปช่วยลดความดันย่อยของแก๊สเฟสที่จะเกิดการนิวเคลียชันแกรไฟต์และอะตอมไฮโดรเจนอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮโดรเจนที่ล้อมรอบโมเลกุลของแก๊สและพื้นผิวของแข็ง เพื่อจัดตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรเจน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



หลังจากที่เกิดผลึกเพชรแล้วพื้นผิวฐานรองจะถูกปกคลุมด้วยผลึกและฟอร์มตัวเป็นฟิล์มหลายรูปต่อไป ขนาดของผลึกและรูปร่างของผลึกถูกจำกัดด้วยผลึกซึ่งกันและกันเองฟิล์มหลายรูปที่ต่อเนื่องจะมีขนาดผลึกที่เล็กแต่มีความหนาแน่นสูง ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอ การนิวเคลียชันจะหยุดลงขณะที่เกิดผลึกโดยการแพร่คาร์บอนบนฐานรองหรือบนพื้นผิวของผลึกและมีการเพิ่ม Active Sites บนผลึกที่เกิดขึ้นแล้ว ผลึกบนฐานรองจากความหนาแน่นการนิวเคลียชันที่ต่ำจะอยู่โดดเดี่ยวและมีแนวโน้มใหญ่กว่าด้วยการกระจายขนาดที่กว้างกว่า

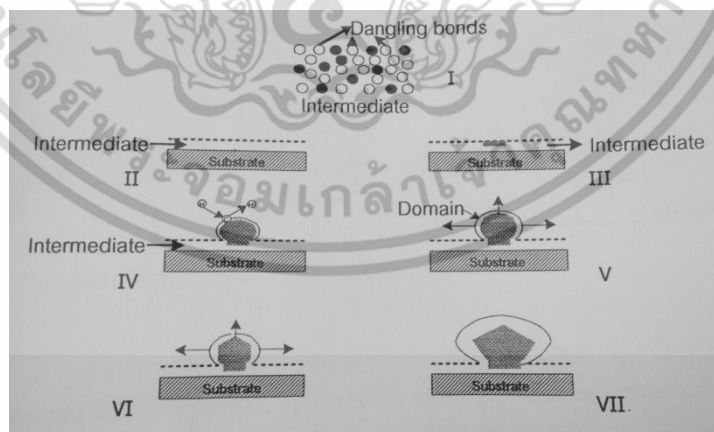
จากที่กล่าวมาข้างต้นชนิดฐานรองและการเตรียมฐานรองเบื้องต้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อการนิวเคลียชันและการก่อตัวของผลึกในขั้นแรก ทั้งฐานรองที่เป็นเพชรธรรมชาติและวัสดุที่ไม่ใช่เพชร การนิวเคลียชันบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรส่วนใหญ่ถูกเหนี่ยวนำโดยการสร้างรอยขีดข่วนด้วยผงเพชร (หรือ SiC, Cubic Boron Nitride [c-BN] แต่มีประสิทธิภาพด้อยกว่า) และบนฐานรองที่มีการฟอร์มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวของคาร์ไบด์ทำให้เกิดความหนาแน่นของการนิวคลีโอชันสูงสุดและอัตราการก่อตัวมากที่สุดและใช้เวลาน้อยขณะที่อัตราการนิวคลีโอชันบนฐานรองผลึกเดี่ยวต่ำกว่าฐานรองหลายรูปของ Cu , Ag , Au , Cu/Ni alloys จะเท่ากับบนออกไซด์ SiO₂ และ Al₂O₃ โดยในการเกิดนิวคลีโอชันบนพื้นผิวฐานรองทั้งแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันและรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน จะเกิดการฟอร์มตัวที่พื้นผิวฐานรองได้หลายรูปแบบ ตามตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของฐานรองออกเป็น 3 ประเภท คือ ประเภทแรกที่เกิดปฏิกิริยากับฐานรองน้อย ประเภทที่สองอะตอมคาร์บอนสามารถแทรกเข้าไปยังเนื้อฐานรองได้ และประเภทสุดท้ายเกิดการฟอร์มตัวระหว่างอะตอมคาร์บอนและฐานรอง

ตารางที่ 2.1 ชนิดของฐานรองเมื่อแบ่งตามการฟอร์มตัวของชั้นอินเตอร์มีเดียท

Intermediate layer	Substrate
Little or no solubility or reaction	Diamond, graphite, carbons, Cu, Ag, Au, Sn, Pb, etc.
C-diffusion only, C dissolves in MeC mixed crystal	Pt, Pd, Rh, etc.
Carbide formation <ul style="list-style-type: none"> - Metallic - Covalent - Ionic 	Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Fe, Co, Ni (metastable) B, Si, etc. Al, Y, rare earth metals, etc.

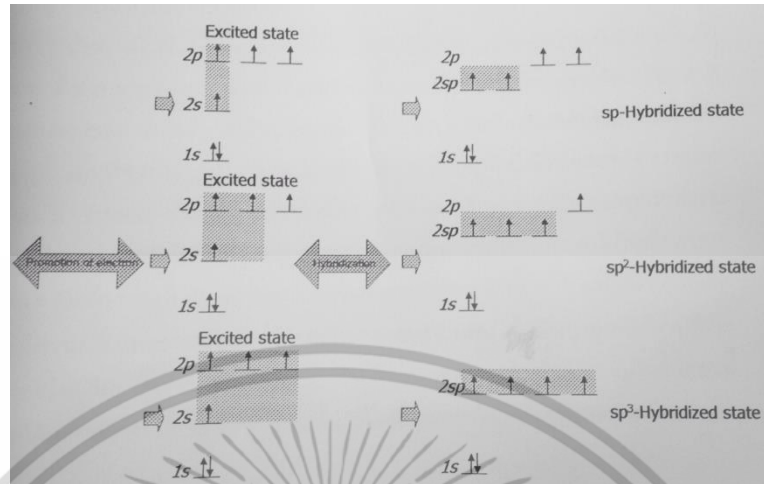
ทั้งนี้การนิวคลีโอชันอินเตอร์มีเดียททุกชนิด จะมีลักษณะที่เหมือนกันดังรูปที่ 2.8 จากการศึกษาด้วยเทคนิค HRTEM พบว่า Diamond nanocrystallines ถูกเปลี่ยนโดยตรงจาก a-C ไปเป็นเพชร ตามรูปที่ 2.8 พบว่าการนิวคลีโอชันจะเริ่มจากชั้นที่ 1 Carbon clusters เกิดขึ้นที่พื้นผิวฐานรองและเปลี่ยนโครงสร้างพันธะจาก sp¹ ไปเป็น sp²



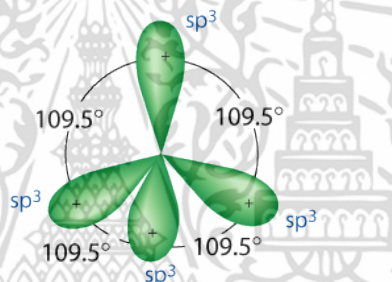
รูปที่ 2.8 การนิวคลีโอชันบนชั้นอินเตอร์มีเดียท

ชั้นที่ 2 อะตอมคาร์บอนจะจับพันธะกันเป็นโครงข่ายที่เสถียรของคาร์บอนพันธะ sp³ คือ Molecular rain ของไฮโดรคาร์บอนอย่างต่อเนื่องถูกกระตุ้นบนพื้นผิวฐานรองเพื่อทำให้มีพลังงานเพียงพอในการเปลี่ยนจาก sp¹ -> sp² -> sp³ เกิดการโปรโมชันของพลังงานและการไฮบริไดเซชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเป็นรูปร่างดังในรูปที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเฟสที่ไม่เสถียร (sp^1 และ sp^2) ถูกกัดได้เร็วกว่าเฟสที่เสถียร (sp^3) ถึง 10 เท่า



รูปที่ 2.9 ระดับพลังงานออร์บิทัลและการจัดเรียงอิเล็กตรอนของคาร์บอน



รูปที่ 2.10 รูปร่างของไฮบริดออร์บิทัลของคาร์บอน

ขั้นที่ 3 Transition ของสภาวะการยึดเหนี่ยวในโครงข่ายคาร์บอนเริ่มเกิดขึ้นจาก Disordered domain ที่เป็นคาร์บอนพันธะ sp^3 กลายเป็นเพชรที่เป็นคาร์บอน sp^3 เช่นเดียวกัน การเกิดผลึกในขั้นต้นฐานเกิดจากปฏิกิริยาเคมีทั้งหมด เช่น การจับตัวกับไฮโดรเจน การลดการดูดซับไฮโดรเจนเป็นสารเชิงซ้อน การรวมตัวของอะตอมและอื่น ๆ ระหว่างการเกิดผลึกอะตอมคาร์บอนจะจัดตัวใหม่เพื่อให้อยู่ในระนาบ {111} เพื่อให้มีพลังงานพื้นผิวน้อยที่สุด บริเวณที่เป็นผลึกจะกระทำตัวเป็นนิวคลีโอไซด์เพื่อเกิดเป็นเพชร

ขั้นที่ 4-5 เกิดการเกิดเพชรขึ้น อะตอมคาร์บอนถูกเพิ่มเข้าสู่พื้นผิว (ขั้นที่ 4) โดยกระบวนการการแพร่ รูปร่างของเพชรจะเริ่มต้นขึ้นเป็นครึ่งทรงกลม (ขั้นที่ 4) Microcrystal ของเพชรที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีขนาดถึงขนาดวิกฤต(ขั้นที่ 5)

ขั้นที่ 6 ทำให้เกิดรูปร่างหน้าของผลึก

ขั้นที่ 7 เกิดการนิวคลีโอซันลำดับที่สองเป็นเหตุให้เกิดการแกว่งของความเข้มข้นบนพื้นผิวของผลึกเพชร เมื่อความหนาของโดเมนเปลี่ยนจนเกิน 15 nm ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนหรือเวลาที่เพียงพอสำหรับอะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าสู่ผลึกเพชร ทำให้เกิดการนิวคลีโอซันลำดับที่สองบนพื้นผิว

เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์นิวคลีโอซันโดยคำนึงถึงอิทธิพลของฐานรองจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของคาร์บอนจากแก๊สเฟสตกกระทบบนฐานรองและเกิดการเอกซอร์มิกเป็นเอกซอร์มิกที่สวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร่เข้าไปในเนื้อของฐานรอง อัตราการแพร่ของคาร์บอนลงไปเนื้อสารจะค่อยๆลดลง เมื่อมีการฟอรัมตัวของชั้นคาร์ไบด์ขึ้นจนกระทั่งการแพร่ของคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และมีความเข้มข้นของคาร์บอนมากพอบริเวณผิวของฐานรอง ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นตอนที่สองขึ้น โดยที่ภาวะนี้ นิวเคลียสเริ่มที่จะมีความเสถียร การนิวเคลียสในชั้นตอนนี้สามารถเกิดได้หลายทิศทางขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวที่เตรียมและเม็ดเพชร ฐานรองที่ไม่มีรอยขีดข่วนการนิวเคลียสจะเกิดขึ้นเมื่อมีการอิมตัวของคาร์บอนที่พื้นผิว แต่ฐานรองที่ขีดข่วนด้วยเพชรคาร์บอนจะแพร่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของบริเวณนิวเคลียส

การนิวเคลียสชั้นที่ 1 เป็นชั้นตอนที่ค้ำถึงเงื่อนไขของฐานรองเนื่องจากเป็นช่วงของการเริ่มก่อตัวของพื้นผิว การฟอรัมตัวของคาร์ไบด์เริ่มต้นไม่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดบนฐานรองที่ไม่มีรอยขีดข่วนแต่เกิดขึ้นหลังจากช่วงเวลาหนึ่งที่มีการอิมตัวของคาร์บอนที่พื้นผิว และการนิวเคลียสมีความหนาแน่นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับฐานรองที่มีรอยขีดข่วนซึ่งจะมีนิวเคลียสโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลึกที่สังเกตบนฐานรองเหล่านี้ภายหลังเกิดกระบวนการโตแล้วจะมีขนาดที่สม่ำเสมอเพราะการนิวเคลียสจะหยุดลงหลังจากการเกิดเริ่มต้นขึ้น สันนิษฐานได้ว่าเป็นเพราะคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นที่พื้นผิวได้แพร่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของผลึกเพชร

พบว่าอิทธิพลของวิวัฒนาการของฐานรองและอะตอมที่ปกคลุมฐานรอง มีผลเนื่องมาจากอัตราส่วน O/C ด้วยอัตราการไหลที่ 0.5% CH₄ ใน H₂ เจือจางด้วย 5% O₂ ในแก๊สผสมฮีเลียม จนได้อัตราส่วน O/C เป็น 0, 0.5, 0.75 และ 1.0 พบว่าที่อัตราส่วน O/C น้อยกว่า 0.5 บนฐานรองแพลทตินัม ได้เพชรคุณภาพดีเป็นฟิล์มอย่างต่อเนื่อง ส่วนบนฐานรองที่อัตราส่วน O/C มากกว่า 0.75 จะไม่เกิดเพชร อาจเป็นไปได้ว่าเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนต่ำเกินไป แต่สำหรับชิ้นงานที่มีเพชรอยู่แล้วเมื่อใช้อัตราส่วน O/C = 1 จะเกิดการโตขึ้นอย่างต่อเนื่องต่อไป[13,21]

การก่อตัวของคาร์ไบด์บนฐานรองตั้งแต่เริ่มมีการก่อตัวจนเป็นชั้นของคาร์ไบด์บนพื้นผิวฐานรองซึ่งเกิดขึ้นระหว่างฐานรองกับการก่อตัวของเพชรในสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์แบบ CVD มีหลายเทคนิคในการวิเคราะห์ชั้นคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น สำหรับฐานรองที่เป็นซิลิกอนและวัสดุอื่นๆ ชั้นโมลิบดีนัมคาร์ไบด์ตรวจโดยใช้เทคนิค XRD จากการสร้างโดยใช้เวลาเพียงเล็กน้อยและตรวจพบเพชรหลังจากนั้นเป็นเวลา 20 นาที โดยการดูด้วย SEM พบว่าผลึกมีขนาดเล็กในระดับนาโน จาก XRD บนฐานรองทั้งสองพบการฟอรัมตัวของ W₂C และ WC ชั้นที่รอยต่อก่อนเกิดเป็นเพชร

เมื่อใช้เทคนิค XPS และเทคนิคการวิเคราะห์การสูญเสียอิเล็กตรอนของการเกิดเพชรบนซิลิกอนที่เวลา ค่าต่างๆสำหรับ HFCVD จะแบ่งออกได้เป็น 3 สภาวะ 15 นาทีแรก ออกไซด์และคาร์บอนที่ปนเปื้อนอยู่ก่อนแล้วถูกกำจัดออกโดยอะตอมไฮโดรเจน เกิดเป็นชั้น SiC จนในที่สุดเกิดเพชรปกคลุมชั้นคาร์ไบด์ด้วยความหนาแน่น SiC จะแปรตามอัตราส่วน C/H

การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Electron Assisted CVD (EACVD) จะมีความหนาแน่นการนิวเคลียสที่สูงกว่าแต่คุณภาพของผลึกบนฐานรอง Mo และ Ta ที่มีการขัดจะกว่าฐานรองที่เป็น Ni, W หรือ Si การที่ผลึกเพชรบนฐานรองดังกล่าวมีคุณภาพดีเป็นผลมาจากการเข้ากันได้ดีของแลตทิซและพารามิเตอร์ของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามคุณภาพของเพชรพิจารณาจาก Raman spectrum โดยพิจารณาความกว้างของพีก ถ้ากว้างแสดงว่ามีคาร์ไบด์เกิดขึ้นมาก การที่ความหนาแน่นของนิวเคลียสชั้นมีค่าสูงและมีส่วนคาร์บอนที่มีพันธะ sp² บนฐานรอง Mo และ Ta ทำให้พลังงานพื้นผิวไม่เหมาะสมสำหรับการเกิดเพชร

การนิวคลีโอเซชันขั้นที่ 2 สำหรับเพชรสามารถเกิดการนิวคลีโอเซชันได้ในหลายทิศทาง คือ

1. การฟอร์มตัวของนิวเคลียสบนพื้นผิวที่อ้อมไปด้วยคาร์บอนที่เหมาะสม
2. การนิวคลีโอเซชันของแก๊สเฟส
3. การก่อตัวและโตขึ้นจากส่วนที่เป็นเพชรหรือคาร์บอน sp^3 อื่นๆ ที่เหลือจากการทำรอยขีดข่วน
4. การก่อตัวและโตขึ้นบนเม็ดของวัสดุอื่น โดยวิธี Evaporation, Sputtering หรือ Deposition

การนิวคลีโอเซชันบนฐานรองที่ไม่มีการขัดจะเกิดขึ้นตามแนวชั้นหรือตำหนิต่างๆบนฐานรองจากการเปลี่ยนแปลงการนิวคลีโอเซชันของเพชร ทำให้เกิดการเคลือบของ BN, SiC, a-C-H, DLC หรืออสัณฐานคาร์บอนพันธะ sp^3 บนฐานรองก่อนเกิดการก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรเกิดขึ้น สำหรับการสร้างที่อุณหภูมิฐานรองต่ำๆ ในขณะนั้นขั้นตอนการนิวคลีโอเซชันเริ่มต้นเป็นผลทำให้เกิดการเกาะตัวของคาร์บอนหลายชนิด ทำให้ความหนาแน่นของนิวเคลียสที่ก่อตัวเป็นแกรไฟต์เพิ่มขึ้น

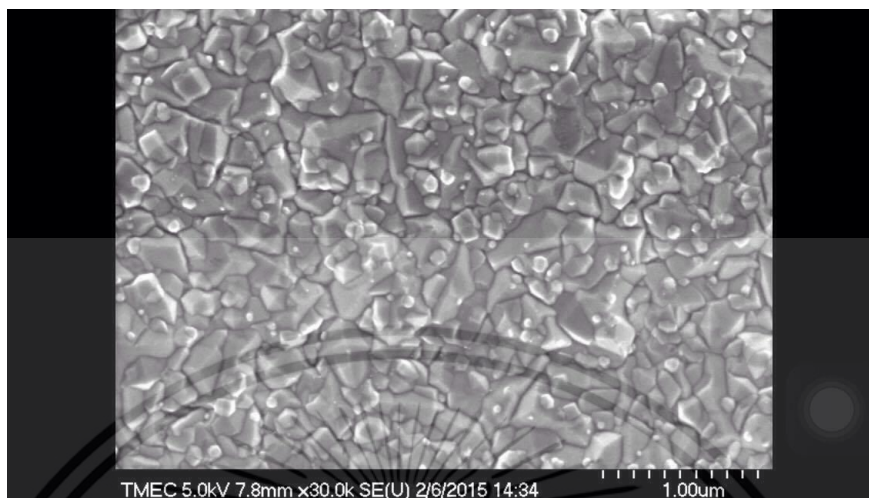
รูปแบบนิวเคลียสของเพชรอาจเกิดขึ้นได้ในแก๊สเฟสไมโครเวฟที่มีความดันไมโครเวฟต่ำและในสิ่งแวดล้อมของ RF พลาสมา แม้ว่าการนิวคลีโอเซชันหลักๆแล้วจะเกิดบนพื้นผิวแต่ในทางกลับกัน รอยขีดข่วนสามารถทำให้เกิดการฟอร์มตัวที่เสถียรในแก๊สเฟสเมื่อถูกควมแน่นบนฐานรองเงื่อนซึ่ทำให้เกิดอัตราการนิวคลีโอเซชันสูง เช่น ความเข้มข้นของคาร์บอนที่มีค่าสูงหรืออุณหภูมิของฐานรองมีค่าต่ำเป็นผลให้เกิดจุดบกพร่องของผลึกได้สูง โดยเฉพาะความหนาแน่นของรอยตำหนิในแนวระนาบ และการเกิดแกรไฟต์หรืออสัณฐาน และแม้ว่าแก๊สเฟสอาจจะไม่เป็นแหล่งกำเนิดแรกของนิวคลีโอเซเตอร์บนฐานรองที่มีรอยขีดข่วนแต่จะมีอิทธิพลต่อการส่งผ่านมวลสารข้ามชั้นขอบเขตของแก๊สเฟส และกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มเพชรที่เป็นไฮโมอีพิแทกเซียลที่มีคุณภาพ

ฐานรองที่มีการสร้างรอยขีดข่วนจากการขัดด้วย SiC, CBN, Cu หรือสแตนเลส และ Al_2O_3 โดยการพ่นด้วยผงแห้ง สเปรย์ สปิน การใช้ไฟฟ้าสถิต หรืออื่นๆเพื่อเหนี่ยวนำการนิวคลีโอเซชันนั้นจะทำให้ความหนาแน่นการนิวคลีโอเซชันเพิ่มขึ้นถึง 7 ออร์เดอร์โดยประมาณ จากฐานรองซิลิกอนที่ไม่มีการขัด(คือ 10^{11} จาก 10^{-4} cm^{-2}) และขนาดของ Grit ที่ใช้ทำรอยขีดข่วนขนาด $1/4 \mu m$ จะมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อทำการขัดด้วยมือ และขนาด 40-50 μm จะมีประสิทธิภาพดี เมื่อใช้การอุตสาหกรรมในการเตรียมพื้นผิว การขีดข่วนช่วงบนฐานรองจะทำให้การนิวคลีโอเซชันเพิ่มขึ้นจากส่วนที่เหลือจากการเตรียมพื้นผิวต่างๆ เช่น คาร์บอนพันธะ sp^3 ในอีกแง่หนึ่งการขีดข่วนอาจจะไปเพิ่มความว่องไวทางเคมีของบริเวณที่เสียหายของฐานรอง เช่น บริเวณที่มีลักษณะเป็นขอบ รูหรือมีรูปแบบเป็นโมเสค และจำนวนเพชรที่เกิดขึ้นบนฐานรองซิลิกอนขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการขัด การนิวคลีโอเซชันจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อขัดฐานรองด้วยเพชร รวมทั้งการเข้ากันได้ของแลตทิซระหว่างฐานรองกับนิวเคลียสจะทำให้เกิดความเสถียรของนิวคลีโอไซด์ในภาวะแวดล้อมของระบบ CVD ด้วย

การใช้เทคนิค Ar^+ sputtering สร้างบริเวณหน้ากากให้กับฐานรอง จะทำให้บริเวณนิวคลีโอเซชันบนฐานรองมีลักษณะเยาะตัวเป็นผลึกเดี่ยวๆ แสดงว่าความหนาแน่นการนิวคลีโอเซชันจะลดลง และเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐานที่นำมาใช้บนฐานรองซิลิกอนที่มีรอยขีดข่วนจากเพชรจึงใช้สำหรับการสร้างลวดลายฟิล์มเพชรได้ โดยบริเวณที่อยู่ภายใต้การป้องกันจะมีความหนาแน่นการนิวคลีโอเซชันที่ต่ำกว่าแต่ได้ผลึกที่ใหญ่กว่าและสามารถกำจัดผลึกที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่ต้องการนี้ได้

แต่หากปล่อยให้เกิดการโตของผลึกเพชรเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทั้งบริเวณที่อยู่ภายใต้การป้องกันและบริเวณที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่อยู่ภายใต้การป้องกันจะโตขึ้นจนสามารถต่อเนื่องเป็นฟิล์มได้ ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจะเห็นความแตกต่างกันของขนาดผลึกและรูปร่าง



รูปที่ 2.11 ลักษณะของผลึกที่มีความแตกต่างของขนาดจากการใช้หน้าฉากป้องกันเวลาทำการสังเคราะห์

จากที่กล่าวถึงกานิวคลีเอชันตั้งแต่เริ่มต้นอาจกล่าวได้ว่าไม่สามารถอธิบายขั้นตอนการนิวคลีเอชันโดยใช้กระบวนการใดเพียงกระบวนการเดียวได้ เนื่องจากการนิวคลีเอชันขึ้นอยู่กับฐานรองและการเตรียมฐานรอง อย่างไรก็ตามการนิวคลีเอชันเกิดขึ้นด้วย 2 กลไก ขั้นตอนแรกจะเกิดการอิมตัวของคาร์บอนที่บริเวณพื้นผิวของฐานรอง การนิวคลีเอชันของฐานรองที่ไม่มีการเตรียมพื้นผิวจะมีรูปแบบนิวเคลียสที่เสถียรและนิวคลีโอต์ของคาร์บอนเริ่มต้นเป็นแบบสุ่ม ขั้นตอนการอิมตัวของคาร์บอนจะเป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องเพื่อป้องกันการแพร่ของคาร์บอนสู่เนื้อของฐานรอง และทำให้เกิดนิวคลีโอต์ที่เสถียรขึ้น การขีดข่วนด้วยเพชรหรือใช้เพชรจะทำให้การเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การขัดจะเป็นการสร้างบริเวณที่มีพลังงานสูงมีหลายพันธะที่พร้อมสำหรับการก่อตัวและเกิดนิวคลีโอต์ที่เสถียร

2.2.3 กระบวนการโต [11]

หลังจากเกิดการนิวคลีเอชันบนฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชร ปรากฏการณ์ที่ตามมาคือการโต (Growth) ซึ่งการเกิดและการโตขึ้นของผลึกเพชรอย่างต่อเนื่องจนทำให้ได้ชั้นโฮโมอิตีแพกเซียลเกิดขึ้น โดยมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางไดนามิกส์ของพื้นผิวเพชรในสิ่งแวดล้อมของการโตนั้นเป็นกุญแจสำคัญในการสร้างความเข้าใจกระบวนการ CVD ซึ่งในการสังเคราะห์เพชรส่วนใหญ่จะมีตัวทำปฏิกิริยาเพียงคาร์บอนและไฮโดรเจน (บางครั้งมีแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม อาร์กอน) แรงดันการทำงานอยู่ในช่วงความดันบรรยากาศสำหรับเทคนิคพลาสมาเจท และ Combustion torches จนถึง 10^2 ทอร์ สำหรับ ECR และระดับความดันปานกลางขนาด 1-100 ทอร์ สำหรับเทคนิค RF, DC plasma หรือใส่หลอดร้อนและการศึกษาพื้นผิวเพชรส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาพื้นผิวระนาบ (100) และ (111) ที่มีปลายพันธะเป็นไฮโดรเจน ที่มีการไฮบริดเซชันคาร์บอนแบบ sp^3 ซึ่งพบว่าพื้นผิว (111) จะเกิดอุณหภูมิสูงกว่า 950 องศาเซลเซียส และ (100) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์สิ่งแวดล้อมในกระบวนการก่อตัวของเพชรในกระบวนการ CVD เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อสร้างความเข้าใจกลไกพื้นฐานในการนำเข้ามาซึ่งการเลือกเงื่อนไขเฉพาะที่เหมาะสม เราแบ่งเทคนิคการวิเคราะห์เป็น 2 แบบ คือ In situ และ Ex situ เทคนิค In situ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติโดยตรง เช่น อุณหภูมิ หรือสารที่อยู่บนสิ่งแวดล้อมของกระบวนการ ส่วนเทคนิค Ex situ เป็นการจำลองแบบจำลองในการวิเคราะห์ขึ้นมาเพื่อย้อนกลับไปสู่เงื่อนไขการเกิดที่แน่นอน

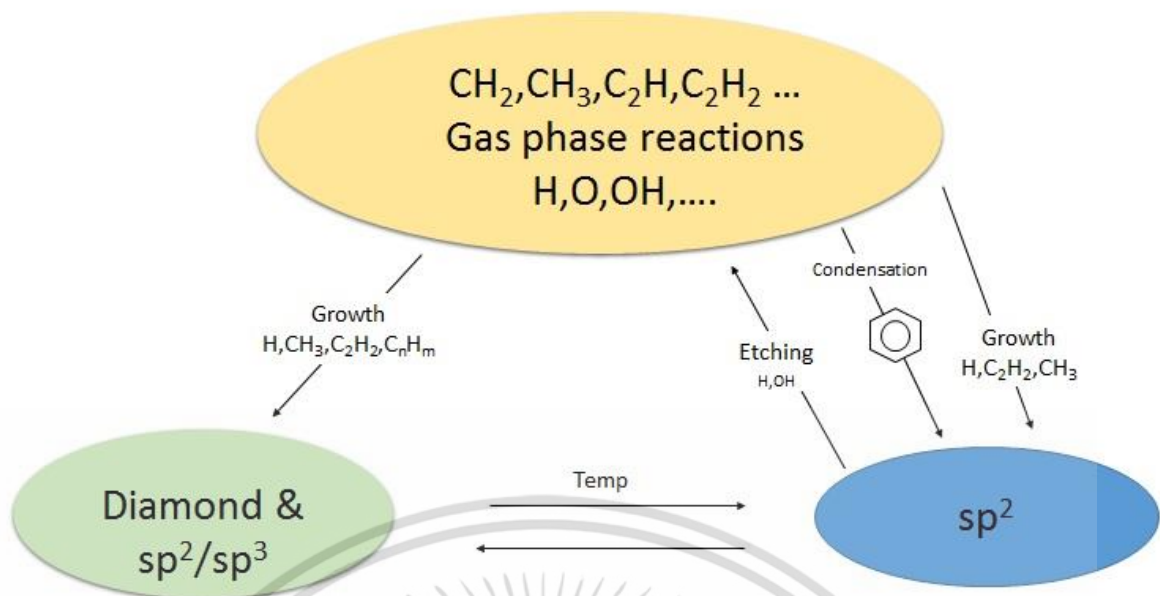
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค In situ พบว่าสิ่งแวดล้อมในการเกิดเพชรประกอบด้วย H_2 , CH_4 และแก๊สหายาก ใช้เทคนิค Optical Emission Spectroscopy (OES) วัดการปลดปล่อยจากสถานะกระตุ้นทางอิเล็กทรอนิกส์ของ C, C_2 , H, CH, CH_2 , และ H_2 ใช้เทคนิค Absorption spectroscopy ของเลเซอร์ไดโอดชนิดอินฟราเรดในการวิเคราะห์แก๊สแวดล้อมระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD และใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy ในไมโครพลาสมา

Ex situ ใช้ Mass spectroscopy กับวิธี HFCVD ซึ่งเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปมาของ CH_4 หรือ C_2H_2 ไปสู่ CH_4 และ C_2H_2 สิ่งสำคัญคืออัตราส่วน CH_4 ต่อ C_2H_2 ในแก๊สที่ปล่อยทิ้งจากเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิได้หมด ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบที่พื้นผิวได้หมด

สารหลักๆที่วัดได้ในบรรยากาศการโตของเพชรเป็น ไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนคือ H_2 , H, CH_4 , CH_3 , C_2H_2 , และ/หรือ C_2H_4 เมื่อในระบบมีออกซิเจนหรือสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนผสมอยู่ในระบบจะพบ CO, H_2O , และ OH และจากการทดลองพบว่าอนุมูลอิสระของ CH_3 เป็นสารหลักในกระบวนการผลิต

โดยมีแบบจำลอง 3 แบบ ในการคำนวณที่ประยุกต์ใช้กับบรรยากาศของแก๊สในการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ทั้งการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ภาวะสมดุลซึ่งปรับปรุงขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในการหาปริมาณของแก๊สที่ซับซ้อน แบบจำลองทางจลพลศาสตร์ใน 1 มิติ ใช้ยืนยันว่าสารคาร์บอนหลักในการก่อตัวของเพชรคือ CH_4 , CH_3 , C_2H_2 , และ/หรือ C_2H_4 และแบบจำลองเชิงจำนวนซึ่งถูกประยุกต์ใช้รวมกับการส่งผ่านของไหลและจลพลศาสตร์ของแก๊สใช้เพื่อทำนายในเชิงปริมาณสำหรับการเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง และเสนอแนะว่าการแพร่เป็นกลไกสำคัญสำหรับสารที่มีน้ำหนักเบา เช่น อะตอมไฮโดรเจน

แบบจำลองการโตของเพชร[3] จะใช้สมดุลไดนามิกส์ เป็นแบบจำลองแรกที่ใช้อธิบายการเกิดเพชร โดยสมมติให้แกรไฟต์หรือคาร์บอนรูปอื่นๆขึ้นอยู่กับอัตราการก่อตัวจากสารละลายของแก๊สที่อิมไปด้วยคาร์บอนและอะตอมไฮโดรเจนที่อุณหภูมิการเกิดของฐานรอง การก่อตัวและการกัดของคาร์บอนสำหรับแต่ละรูปแบบของคาร์บอนที่เป็นของแข็งจะอยู่ในสมดุลไดนามิกส์ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบจำลองการก่อตัวของไอเคมีของเพชรซึ่งจะก่อตัวเป็นคาร์บอน sp^2 หรือ sp^3 [7]

การอิมิตัวของคาร์บอนจะเป็นแรงขับเคลื่อนสำหรับการควบแน่นของคาร์บอนในหลายรูปแบบรวมทั้งเพชรด้วย ขณะที่อะตอมไฮโดรเจนในบรรยากาศจะช่วยเปลี่ยนคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชรโดยการกัดและ/หรือเปลี่ยนรูปพื้นผิวพันธะ sp^2 ไปสู่ sp^3 อัตราการก่อตัว ความเข้มข้นของส่วนที่ไม่ใช่เพชร และจุดบกพร่องของผลึกจะสูงเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น แบบจำลองนี้เสนอแนะว่า OH^- หรือ ฮาโลเจนที่เติมเข้าไปจะทำให้เพชรมีคุณภาพสูงขึ้น

นอกจากนี้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ยังช่วยอธิบายเกี่ยวกับสมดุลสำหรับพื้นที่ผิวคาร์บอนของแข็ง และสปีชีส์ที่เป็นไอ ทำให้ทราบว่าเกิดการกระตุ้นอะตอมของแก๊สไฮโดรเจนที่บริเวณใกล้เคียงไส้หลอดของ HFCVD พื้นผิวเพชรที่มีปลายพันธะเป็นไฮโดรเจนจะมีพลังงานต่ำกว่าพื้นผิวที่เป็นแกรไฟต์ ดังนั้นการเกิดเพชรจึงประกอบด้วยเทอร์โมไดนามิกส์ที่ไม่สมดุล เมื่อใช้การคำนวณทางควอนตัมเคมีแบบ Semi-empirical ต่อการเกิดพื้นที่ผิวระนาบ(111) พบว่าอะเซทิลีนเป็นสปีชีส์หลักสำหรับกลไกการเกิดและเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนหลังจากปฏิกิริยาดูดความร้อนในการจับกับไฮโดรเจน(Hydrogen abstraction) ช่วงต้น สำหรับการเกิดเพชรระนาบ(100) อนุมูลของเมทิลที่เป็นกลางเป็นสปีชีส์หลักสำหรับการเกิด แต่อย่างไรก็ดีเรายังแทบไม่รู้เรื่องเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวการเกิด จึงมีข้อตกลงในการสังเกตซึ่งรวมไปถึงความเข้มข้นของสปีชีส์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมการเกิด อัตราการเกิดและคุณภาพของวัสดุ ความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาและอนุมูลฐานรองด้วย คือ (a) ที่อนุมูลฐานรองต่ำ บริเวณพื้นผิวการเกิดเพชรซึ่งจะจับกับอะตอมไฮโดรเจนจะต่ำด้วย (b) เกิดการเกิดด้วยอนุมูลทั้ง CH_3 และ C_2H_2 โดย C_2H_2 เป็นสปีชีส์หลักต่อการเกิดพื้นผิว(111) อย่างไรก็ตามบทบาทที่สำคัญของ C_2H_2 ที่พื้นผิว (c) การควบแน่นเบนซีนบนพื้นผิวการเกิดที่อนุมูลฐานรองต่ำเป็นผลให้เกิดการก่อตัวของสัณฐานคาร์บอน (d) โมเลกุลของไฮโดรเจนและออกซิเจนมีรูปแบบเป็น Polycyclic aromatics ในแก๊สเฟส (e) สปีชีส์ของคาร์บอน sp^2 เป็นแก๊สที่มีความไวต่ออนุมูล OH มากกว่าอะตอมไฮโดรเจน

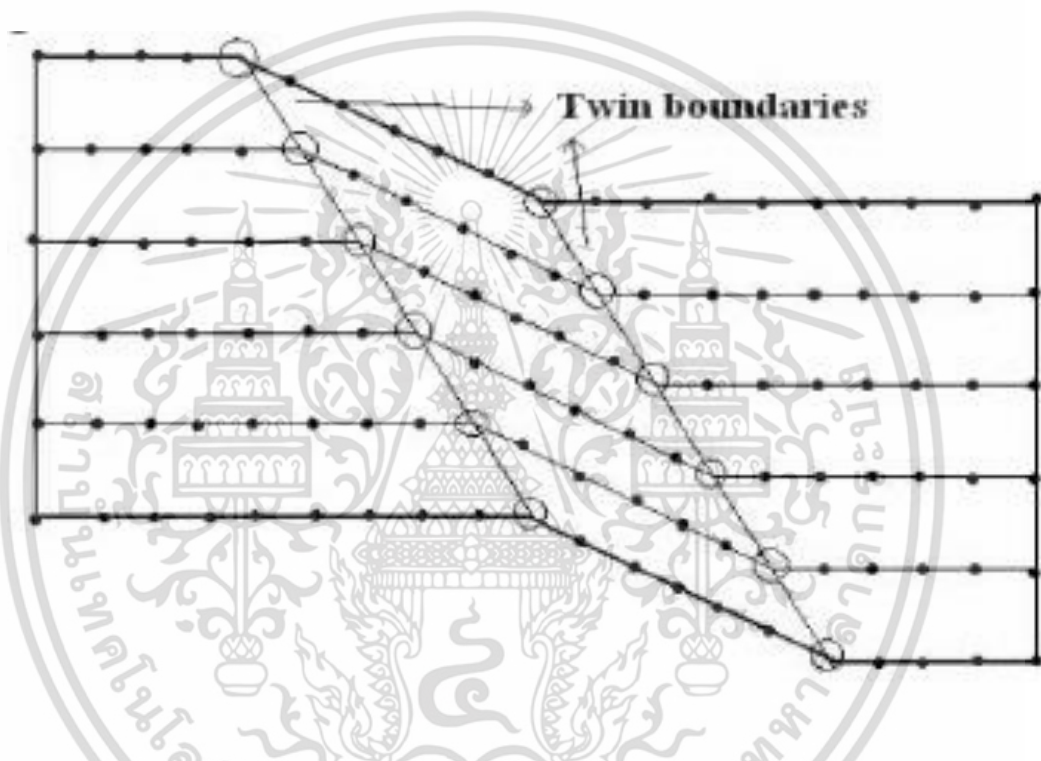
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ความบกพร่องของผลึก

โครงสร้างของผลึกที่เป็นแลตทิซแบบเป็นระเบียบนั้น บางครั้งก็เกิดการเบี่ยงเบนไปเรียกว่า ความบกพร่อง(Defect) ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารเหล่านั้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของประจุ ความนำความร้อน ความบกพร่องอาจเกิดได้ในหลายรูปแบบคือ

2.3.1 ทวิน

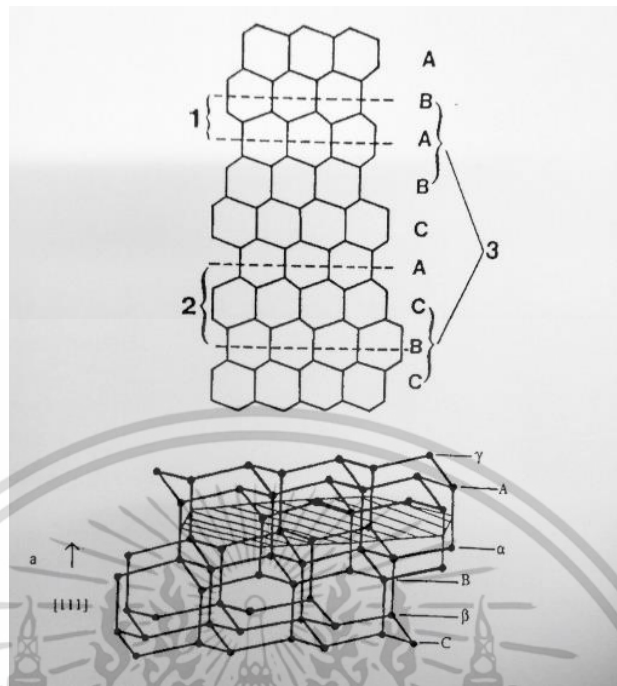
ทวิน เป็นความบกพร่องของผลึกที่มี 2 ส่วนที่สมมาตรกัน จากการหมุนของแกนทวินหรือการสะท้อนกันของระนาบประกอบในลักษณะเป็นภาพเสมือนในกระจกจากสมมุติฐานของแรงเฉือนตามขอบของทวิน เป็นเหตุให้อะตอมถูกเลื่อนตำแหน่งออกไป ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะความบกพร่องแบบทวิน [5]

Stacking faults เกิดเนื่องจากแลตทิซของฐานรองและของการก่อตัวเป็นผลึกไม่พอดีกัน เกิดจากการเกิดช่องว่าง (Vacancy) และเกิดจากบริเวณที่เกิดความเค้น (Stress)

จากรูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของ Stacking fault เมื่อมี Stacking fault 1 คู่ ($n=0$) จะเป็น Stacking fault แบบอินทรินซิก และถ้ามีชั้นปกติแทรกอยู่ด้วย 1 ชั้น ($n=1$) จะเป็นแบบเอ็กทรินซิก ซึ่งถ้า n มีค่ามากกว่า 1 จะเป็นไมโครทวิน และเมื่อ n มีค่ามากๆจะเป็นแถบของทวิน

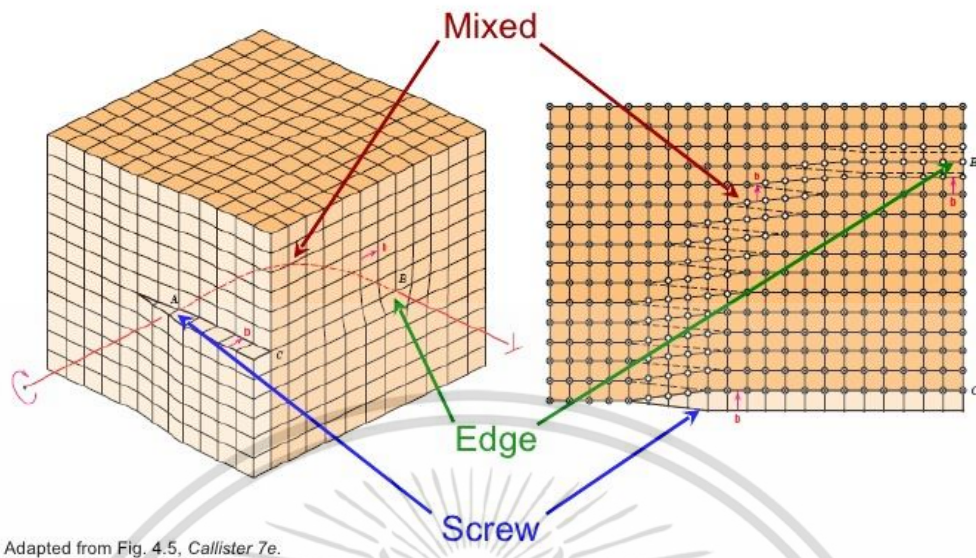


รูปที่ 2.14 ลักษณะของ $\langle 111 \rangle$ Stacking fault ของเพชร และ(100) Stacking fault [6]

Dislocation เป็นความบกพร่องที่เกิดจากการบิดตัวของแกนแลตทิซรอบเส้นๆหนึ่ง เป็นความบกพร่องที่ไม่สมดุลง และจะสะสมพลังงานไว้ในส่วนที่บิดตัวของแลตทิซของผลึกรอบดิสโลเคชัน แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือแบบ Screw และ Edge แต่ถ้าเกิดรวมกันทั้งสองแบบจะได้ดิสโลเคชันแบบผสม

1. Screw dislocation เกิดในผลึกที่สมบูรณ์ที่มีความเครียดเฉือนสวนทางกันในทิศทางตรงกันข้ามทำให้ส่วนของโครงร่างผลึกที่เกิดมีการหดตัวโดยมีลักษณะเป็นรูปทางลาดแบบเกลียวของสกรูดิสโลเคชัน ส่วนที่หดตัวของผลึกยังไม่มีการศึกษาอย่างละเอียด เพียงแต่ทราบว่า มีเส้นผ่านศูนย์กลางยาวประมาณสองถึงสามอะตอม ส่วนของความเครียดเฉือนจะเกิดอยู่รอบๆสกรูดิสโลเคชันซึ่งมีพลังงานสะสมอยู่

2. Edge dislocation เกิดในผลึกโดยการแทรกกระนาบส่วนเกินเข้าไปในโครงสร้างใช้เครื่องหมาย T ดังแสดงในรูปที่ 2.15(b) แสดงถึงเอตจด์ิสโลเคชันที่เป็นค่าลบ ตัวที่หัวกลับ แสดงถึงเอตจด์ิสโลเคชันค่าบวก โดยมีความเค้นของแรงอัดในบริเวณที่มีอะตอมเกินเข้ามาและมีส่วนที่เป็นความเค้นของแรงดึงในบริเวณระนาบ



Adapted from Fig. 4.5, Callister 7e.

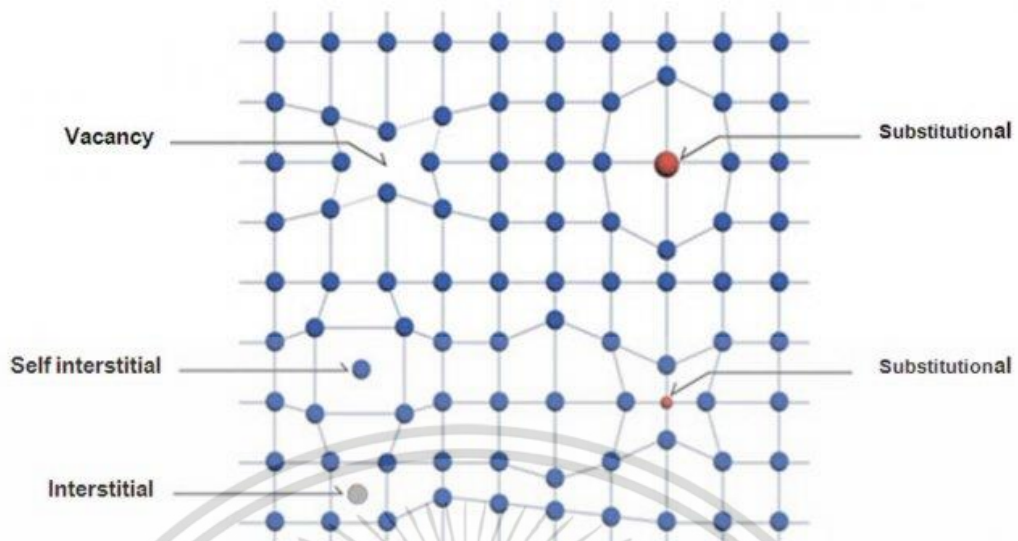
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของ Dislocation (a) Screw dislocation (b) Edge dislocation (c) Mixed dislocation [15]

สไลด์เคลื่อนของผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบผสม มีส่วนประกอบที่เป็นทั้งแบบเอ็ดจ์และแบบสกรู ในเส้นโค้งดิสโลเคชัน AB รูปที่ 2.15(c) เป็นแบบสกรูที่ด้านซ้าย ส่วนที่เป็นเส้นโค้งชี้เข้าไปในผลึกและเป็นแบบเอ็ดจ์บนด้านขวาเมื่อส่วนที่ทะลุออกจากผลึก จะเห็นว่าในผลึกจะเป็นดิสโลเคชันแบบผสม

2.3.2 ความบกพร่องแบบจุด (Point defect) [8]

ความบกพร่องแบบจุดเป็นความบกพร่องที่สมดุลตรงข้ามกับความบกพร่องแบบระนาบและแบบดิสโลเคชัน เกิดขึ้นได้หลายแบบทั้งจากการที่อะตอมหายไปจากตำแหน่งในแลตทิซแล้วเกิดเป็นจุดว่าง (Vacancy) ขึ้น ซึ่งจุดว่างเหล่านี้จะเกิดขึ้นจากการรบกวนเฉพาะที่ระหว่างที่ผลึกโตขึ้น หรือเกิดจากการจัดตัวของอะตอมเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอะตอมเอง และนอกจากนี้ความบกพร่องแบบจุดยังเกิดได้จากการเกิดเป็น Interstitial ของสารเอง หรือเกิดจากอะตอมของสารอื่นๆ ที่เจือเข้าไปแทนที่ (เช่น โบรอน หรือไนโตรเจน) หรือเจือเข้าไปเพื่อทำให้เกิดเป็น Interstitial lattice site (เช่น ไฮโดรเจน หรือลิเทียม) คุณสมบัติที่สำคัญของเพชรที่ขึ้นอยู่กับความบกพร่องแบบจุดคือ พิกัดความต้านทาน ความนำความร้อน ความนำไฟฟ้า ความคล่องตัวประจุพาหะ สี และการส่องสว่าง แสดงดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ลักษณะความบกพร่องแบบจุดชนิดต่างๆ [12]

2.3.3 Non-diamond carbon phases

เนื่องจาก CVD คือกระบวนการสังเคราะห์ที่มีการแข่งขันกันเกิดคาร์บอนในหลายรูปแบบรวมกันทั้งเพชรซึ่งมีพันธะแบบ sp^3 tetrahedral อสัณฐาน หรือ DLC และแกรไฟต์ซึ่งเป็นโครงสร้างข่ายพันธะ sp^2 จึงเกิดความบกพร่องขึ้นในผลึกเพชรได้จากแทรกตัวอยู่ของคาร์บอนรูปอื่น เป็นเหตุให้เกิดการเลื่อนของตำแหน่งของอะตอมคาร์บอนรอบๆ และเกิดความเครียดขึ้น ความบกพร่องชนิดนี้ตรวจพบได้โดยใช้เทคนิค Raman spectroscopy ซึ่งจะให้ตำแหน่งของยอดต่างกันไปตามชนิดของคาร์บอน

2.3.4 ความบกพร่องอื่นๆ [7,8]

2.3.4.1 ขอบของเกรน (Grain boundaries)

ขอบเกรนเป็นความไม่สมบูรณ์ของพื้นผิวในวัสดุแบบหลายผลึก ขอบเกรนจะแบ่งเขตระหว่างเกรน(ผลึก) ซึ่งจะมีการจัดตัวที่แตกต่างกัน และเนื่องจากแนวโน้มที่จะเกิดนิวคลีเอชันและโตขึ้นในสามมิติเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากมีพลังงานพื้นผิวที่สูง (อยู่ในช่วง $5.3-9.2 \text{ J.m}^{-2}$) เมื่อกลุ่มก้อนเกาะกันรูปแบบของขอบเขตระหว่างกลุ่มก้อนเหล่านี้หรือจากเกรนเหล่านี้จะเป็นผลให้เกิดฟิล์มหลายรูปขึ้น ระหว่างสภาวะการนิวคลีเอชันและการโตขึ้นของผลึกจะมีโครงสร้างขนาดเล็กของฟิล์มเพชรที่โตขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดสภาวะที่มีพลังงานเกินเนื่องจากรูปแบบของขอบเขตเกรนซึ่งต้องมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่มีความคล่องตัวของอะตอมจะเป็นไปได้ ผลจากวิวัฒนาการเหล่านี้คือ เกรนของเพชรจะแข่งขันกันเรียงตัวจากพลังงานต่ำออกไปด้านนอกขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของกระบวนการทั้งการจัดเรียงตัวแบบสุ่มและจัดเรียงตัวแบบฟิล์ม

2.3.4.2 พื้นผิวและรอยต่อ (Surface and interface)

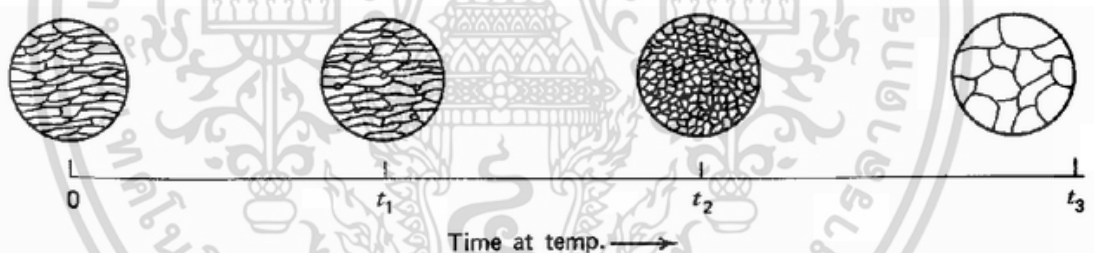
สำหรับรอยต่อหรือพื้นผิวด้านที่ติดกับฐานรอง โครงสร้างต่างๆจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้างเช่น ความเข้มข้นของมีเทน การไบอัส และชนิดฐานรองที่ใช้ โดยทั่วไปแล้วพื้นผิวด้านที่ติดกับฐานรองจะมีขนาดเกรนละเอียดกว่าพื้นผิวด้านที่เกิดการโตขึ้นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มเพชรซึ่งจะมีความหนาแน่นของความบกพร่องสูงกว่า การยึดเหนี่ยวกันทางเคมีกับฐานรองชั้นอยู่ กับปฏิกิริยาเคมีระหว่างฟิล์มและฐานรองระหว่างสภาวะการโตของผลึกในช่วงแรก รอยต่อที่ต่างชนิดกันจะทำให้เกิดความไม่พอดีเป็นแนวของ Dislocation ขึ้น ส่วนใหญ่ในกรณีของระบบเพชร/ซิลิกอน และ เพชร/โมลลิบดีนัม จะเกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากโครงสร้างของเพชรและซิลิกอนหรือโมลลิบดีนัมนี้ ต่างกัน ทำให้กระทบต่อโครงสร้างและทำให้เกิดความเค้นในฟิล์มเพชรขึ้น

2.4 การแอนนีส (Annealing) [7]

การแอนนีสเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับวัสดุเพื่อจุดประสงค์ในการลดความเค้นหลังจากที่วัสดุสารผ่านการทำงานในภาวะที่มีอุณหภูมิเย็นหรือร้อน เพื่อปรับปรุงให้วัสดุสารเกิดความผิดเพี้ยน จากดิสโลเคชันหรือความบกพร่องแบบจุดลดลง และเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติอื่นๆ เช่น คุณสมบัติเชิงกล เป็นต้น โดยกระบวนการนี้จะประกอบด้วย 3 สภาวะ คือ Recovery, Recrystallization และ Grain growth

Recovery stage เป็นภาวะที่วัสดุสารมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลเล็กน้อย (ความแข็งแรงและความแข็ง) แต่เป็นภาวะลดความเข้มข้นของข้อบกพร่องแบบจุดภายในเกรน เป็นสภาวะที่ยอมให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ไปยังจุดที่พลังงานต่ำกว่า และชดเชยการลดลงเหล่านี้ด้วยการฟอร์มตัวของ Subgrains ซึ่งเป็นเกรนที่มีขอบเขตมุมค่าน้อยๆ (ประมาณ 2-3 องศา ของมุมที่มีการจัดเรียงตัวผิดไป) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 สภาวะ Recovery (a) การจัดเรียงตัวของเกรนเริ่มต้น (b) ระหว่าง Recovery

Recrystallization stage เกิดขึ้นเมื่อ Recovery สิ้นสุดลง มีการจัดเรียงตัวของนิวเคลียสไอต์ของเกรนใหม่เริ่มขึ้นที่ขอบเกรนเดิม เป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงการเริ่มต้นของสภาวะการเกิดผลึกใหม่ โดยขนาดเกรนของผลึกที่จัดเรียงตัวใหม่จะขึ้นอยู่กับจำนวนเกรนที่ผิดเพี้ยนไป อุณหภูมิการแอนนีส เวลาในการแอนนีส และส่วนประกอบภายในเนื้อสารเอง โดยปกติแล้วอุณหภูมิที่ทำให้ความคล่องตัวของอะตอมเพียงพอที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลได้จะมีค่าประมาณหนึ่งในสามถึงครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลวสัมบูรณ์ (Absolute melting point) โครงสร้างในระดับจุลภาคของสภาวะนี้แสดงได้ดังรูป 2.18 (a)-(d) ในช่วงแรกเกรนที่ไม่มีความเค้นจะเกิดขึ้นที่ขอบเขตของเกรนเดิม และจะโตขึ้นจนระบบเสถียร ความเข้มข้นของเกรนใหม่จะเพิ่มขึ้น

Grain growth เริ่มขึ้นเมื่อการจัดเรียงผลึกขั้นต้นสมบูรณ์ พลังงานที่รอยต่อระหว่างเกรนจะน้อยที่สุด ทำให้เป็นสภาวะที่ระบบมีความเสถียรมากที่สุด ซึ่งสภาวะนี้ดูคล้ายกับว่าเป็นสภาวะที่พยายามลดพื้นที่ผิวของเกรนรวมลงอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้างและวิธีการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการสร้างผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบ HFCVD บนฐานรองซิลิกอน การสังเคราะห์จะแบ่งเป็นการสังเคราะห์บนฐานรองที่เตรียมพื้นผิวและฐานรองที่ขัดมันธรรมดา โดยจะมีกระบวนการอยู่หลายขั้นตอน เช่น การเตรียมฐานรองซิลิกอน กระบวนการสังเคราะห์ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพชรและรวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรอีกด้วย

3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง [10,11]

3.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิกอน

การเตรียมฐานรองซิลิกอนในรายงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) เป็นวัสดุฐานรอง โดยเริ่มจากการทำความสะอาดตามกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาด สิ่งสกปรกบนพื้นผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ ปราศจากไอออน (Deionized water : DI) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning)
2. นำกรดไฮโดรฟลูออริกกัดผิวหน้า (HF 5%) เพื่อกำจัด SiO_2 ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าออกเป็นเวลา 2 นาที
3. ล้างด้วยน้ำ DI
4. กำจัดเศษโลหะบริเวณผิวหน้าออกด้วยการต้มกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างออกด้วยน้ำ DI
6. นำไปต้มด้วยน้ำ DI เป็นเวลา 5 นาทีและล้างด้วยน้ำ DI จากนั้นเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2)
7. กำจัดคราบไขมันบริเวณผิวหน้าด้วยการต้มไตรครอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที
8. ล้างออกด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
9. ล้างออกด้วยน้ำ DI และเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
10. จุ่มลงบนสารละลายกรด HF (5%) เพื่อลอกออกไซด์ออกและล้างออกด้วยน้ำ DI จากนั้นเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรและกรดกัดผิวหน้าให้เป็นตารางด้วยเพชรตัดกระจกกับขัดมันธรรมดา

หลังจากทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน SiO_2 เป็นที่เรียบร้อยแล้วตามหัวข้อ 3.1.1 แล้ว นำวัสดุฐานรองที่เตรียมไว้มาตัดให้ได้ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยวิธี HFCVD ในชุดทดลองที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการแยกฐานรองซิลิกอนออกเป็น 2 ส่วน คือ ชนิดขัดมันธรรมดา กับขัดหน้าผิวด้วยครีมเพชรและกรีดให้เป็นตารางด้วยเพชรตัดกระจก ส่วนซิลิกอนที่มีการเตรียมพื้นที่ผิว จะนำไปทำการเตรียมพื้นที่ผิวด้วยการขัดผิวหน้าของฐานรองซิลิกอนด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดรอยขีดข่วนสม่ำเสมอทั่วตลอดทั้งผิวหน้าของซิลิกอน จากนั้นนำเพชรตัดกระจกมากรีดให้เป็นตาราง โดยมีระยะห่างประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นทำความสะอาดตามกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ต้มในไตรคลอโรเอทิลีนเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อกำจัดคราบไขมันบริเวณผิวหน้าของซิลิกอน
2. ทำการล้างเศษซิลิกอนที่ติดตามร่องที่เกิดจากการกรีดด้วยเพชรตัดกระจกด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที
3. ล้างออกด้วยน้ำ DI
4. เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.1 รูปครีมเพชร



รูปที่ 3.2 รูปตัวตัดกระจก

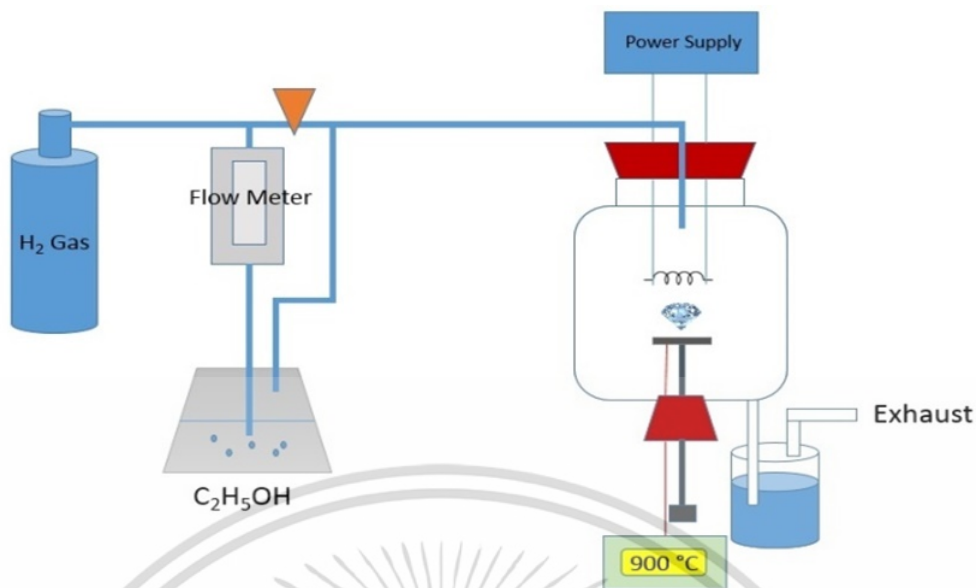
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรและผลึกเพชร [5-11]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการสังเคราะห์บนฐานรอง 2 แบบด้วยกัน คือ แบบที่หนึ่งการเตรียมพื้นผิวหน้าของซิลิกอนด้วยการขัดด้วยครีมเพชรและกรีดผิวหน้าของซิลิกอนให้เป็นตาราง ทั้งนี้ต้องการที่จะให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรที่รวดเร็ว เนื่องจากเป็นการกระตุ้นให้ฐานรองมีความหนาแน่นของการนิวเคลียสเพิ่มขึ้น และการกรีดผิวหน้าให้เป็นตารางเพื่อที่จะต้องการให้ได้ผลึกเพชรที่สมบูรณ์ตรงบริเวณรอยตัดของตาราง จึงนำไปสังเคราะห์ที่ต่อบนฐานรองซิลิกอนขัดมันธรรมดา

ซึ่งจากรูปชุดการทดลองที่กล่าวไว้จะมีองค์ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้

1. ถังแก๊สไฮโดรเจน
2. Regulator ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของแก๊สไฮโดรเจน
3. Anti flat back ทำหน้าที่ป้องกันการไหลย้อนกลับของแก๊สไฮโดรเจน
4. Flow meter ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ผ่านเข้าไปในแหล่งจ่ายเอทิลแอลกอฮอล์
5. แหล่งจ่ายเอทิลแอลกอฮอล์
6. Chamber ที่ออกแบบให้ลดการสะท้อนของอุณหภูมิความร้อนที่จากท่อควอทซ์ทรงกระบอก เว้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร
7. จุกยางขนาด Extra และขนาด No.8 เป็นยางธรรมชาติทนความร้อนสูง ยี่ห้อ As one
8. Power supply
9. ท่อเทปล่อน(ทั้งระบบ) ป้องกันการกักความร้อนของเอทิลแอลกอฮอล์ เพื่อยืดอายุการใช้งาน
10. นาฬิกาจับเวลา
11. พัดลมระบายความร้อน
12. DC-Ampmeter
13. สวิตช์ Power
14. ทังสเตน (ขดลวด)เพื่อใช้ทำ Filament
15. ขวดใส่น้ำ เพื่อตรวจการไหลออกของแก๊สไฮโดรเจน
16. Thermocouple วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.3 รูประบบHFCVD อย่างง่าย

จากชุดการทดลองระบบอย่างง่ายดังรูปที่ 3.3 สามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรได้ โดยใช้กระบวนการดังต่อไปนี้

1. ทำการตรวจสอบระบบต่างๆก่อนทำการทดลอง ดังต่อไปนี้
 - 1.1 ทำการตรวจรอยรั่วในจุดต่างๆของระบบด้วยน้ำสบู่ จากนั้นทดลองปล่อยแก๊สไฮโดรเจน สังเกตฟองอากาศ และเช็คทำความสะอาดก่อนการทดลอง
 - 1.2 ทำการตรวจแหล่งจ่ายกระแสและมิเตอร์ต่างๆ
2. ทำการเตรียมไส้หลอด โดยทำการสร้างชุดพันไส้หลอด ดังรูป โดยมีแกนกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร
3. พันไส้หลอดโดยใช้ลวดทังสเตนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร พันให้ได้จำนวนรอบทั้งหมด 30 รอบ
4. จากนั้นยึดออกให้ไส้หลอดนั้นมีความยาว 1.5 เซนติเมตร
5. นำลวดทังสเตน 2 เส้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร และยาว 25 เซนติเมตร มางอตรงส่วนของปลายด้านใดด้านหนึ่ง ให้มีลักษณะเป็นรูปตัว L โดยทิ้งมีความยาว 0.5 เซนติเมตร
6. ตัดแผ่นทองแดงหนา 2 มิลลิเมตร ให้มีขนาด 2 ตารางเซนติเมตรและเจาะรูระบายความร้อนทั่วทั้งแผ่น
7. ทำแผ่นโมลิบดีนัมตัดขนาด 2 ตารางเซนติเมตร เพื่อที่จะเป็นฐานรองชั้นที่สอง เพื่อรองซิลิกอน
8. ทำเช็วจับ 4 มุม ด้วยโมลิบดีนัม เพื่อที่จะยึดซิลิกอนให้ติดกับฐานรองโมลิบดีนัมกับ

ทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำการประกอบชุดการทดลอง โดยปรับระยะห่างของซิลิกอนกับไส้หลอดให้มีระยะห่าง 2 มิลลิเมตร
10. เปิดวาล์วถังแก๊สไฮโดรเจนปรับRegulator เพื่อควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน ที่ 200 ml/min เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นลดลงมาเหลือ 100 ml/min
11. ปรับวาล์วที่ 1 เพื่อให้แก๊สไฮโดรเจนไหลผ่านไปยัง Flow meter
12. ปรับวาล์วที่ 2 ของ Flow meter เพื่อให้อัตราการไหลของการไหลที่ผ่าน Flow meter ที่ 14 ml/min เป็นเวลา 30 นาที
13. เปิดสวิตช์ Power
14. เปิดสวิตช์พัดลมระบายความร้อน
15. ทำการจ่ายกระแสให้กับไส้หลอด โดยค่อยๆปรับขึ้นครั้งละ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 3 นาที
16. ปรับจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ
17. สร้างเพชรตามระยะเวลาที่กำหนด
18. เมื่อครบระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่กำหนดแล้ว ค่อยๆทำการปรับลดกระแสเพื่อให้ อุณหภูมิค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ
19. ปิดถังแก๊สและปิดสวิตช์ Power
20. ยังคงเปิดพัดลมระบายความร้อนไว้จนกว่าหลอดทดลองจะเย็นตัวลงอย่างช้าๆ เพื่อ ป้องกันการแตกร้าวของหลอดจากการปรับตัวให้เข้ากับอุณหภูมิ
21. รอกันกระแทกแก๊สในระบบหมด สังเกตจากฟองอากาศในขวดรูปชมพู่
22. เปิดวาล์ว 2 รอกันกระแทกระบบเย็น ปิดสวิตช์พัดลมระบายความร้อน เป็นอันเสร็จสิ้น กระบวนการสร้าง

3.3 การทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์ผลึกเพชรแบบวิธี HFCVD ที่ทำการปรับปรุง ชุดทดลองให้มีประสิทธิภาพที่แก้ไขปัญหาด้านความร้อนสะสมสูง ซึ่งสร้างความเสียหายให้กับจุก ยาง และไม่สามารถทำการสังเคราะห์เป็นระยะเวลานานและต่อเนื่องได้ ทั้งนี้เนื่องจาก

ปัญหาความร้อนสะสมของหลอดทดลองที่มีขนาดเล็ก ทำให้ระยะห่างของไส้หลอดที่มี อุณหภูมิสูงกว่า 2000 องศาเซลเซียส ส่งผลให้จุกยางเกิดความเสียหายจึงสังเคราะห์ได้เป็นระยะเวลา อันสั้นเพียง 5 ชั่วโมง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เพิ่มขนาดและความสูงของหลอดทดลองให้ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ระยะ ของไส้หลอดและหลอดแก้วทดลองห่างกันมากขึ้น ทำให้การสังเคราะห์ได้นานขึ้นครั้งละ 24 ชั่วโมง และยังเปลี่ยนท่อในระบบเป็นเทปลอนเพื่อลดการกัดกร่อนของท่อซึ่งเกิดจากแอลกอฮอล์ มีผลทำให้ เศษท่อเข้าไปปะปนในระบบส่งผลเสียต่อชิ้นงาน

การสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อนที่ความดันต่ำนั้น มักได้ชิ้นงานที่มี ลักษณะเป็นฟิล์ม เมื่อเวลาผ่านไปแต่ละเกรนของผลึกจะเรียงติดกัน เกิดการรบกวนจากผลึกข้างเคียง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ไม่มาสารเกิดผลึกใน 3D ได้ผลึกไม่โต ดังนั้น การสังเคราะห์ผลึกเพชรให้มีขนาดใหญ่จะต้องสังเคราะห์มาจากฐานรองที่ต่างชนิดกัน

ขั้นตอนที่ 1 จะต้องสังเคราะห์บนฐานรองที่ทำการเตรียมหน้าผิวด้วยการขัดด้วยครีมเพชรและกรีดด้วยเพชรตัดกระจก เพราะให้อัตราความหนาแน่นนิวคลีโอซันและอัตราการโตสูงมากพอที่จะทำให้เกิดผลึกเพชรได้ จากนั้นทำการหยาบผลึกเพชรที่เกิดขึ้นบนบริเวณจุดตัดของตาราง ไปสังเคราะห์ต่อ

ขั้นตอนที่ 2 สังเคราะห์บนฐานรองขัดมันธรรมดาที่ให้ความหนาแน่นการเกิดนิวคลีโอซันที่ต่ำกว่า เพื่อลดการรบกวนผลึกข้างเคียง และนอกจากนี้เพื่อให้ได้ผลึกที่สมบูรณ์มากที่สุดที่จึงได้เลือกใช้เทคนิคการแอนนีส ซึ่งเป็นการกระบวนการที่จะทำให้ผลึกมีคุณภาพดีขึ้น

3.3.1 การทดลองเพื่อแก้ไขปัญหาความร้อนสะสมสูงของหลอดทดลอง และทำการออกแบบชุดทดลองใหม่

เนื่องจากชุดทดลองเก่ามีปัญหาการละลายของจุกยาง ซึ่งเกิดจากความร้อนสะสมสูงจากการสังเคราะห์ต่อเนื่องนาน 5 ชั่วโมง ซึ่งส่งผลให้ถึงขีดจำกัดระยะเวลาในการสังเคราะห์และที่สำคัญระยะเวลาของการสังเคราะห์ที่น้อย จึงได้ขนาดของผลึกเพชรนั้นเล็กตามไปด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงแก้ปัญหาเรื่องระยะเวลาในการสังเคราะห์ให้สังเคราะห์ได้นานครั้งละ 24 ชั่วโมง จึงทำให้สังเคราะห์ผลึกเพชรได้ขนาดใหญ่ เนื่องจาก การทดลองนั้นมีระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่นาน เพื่อให้ได้ผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่จึงต้องออกแบบชุดทดลองให้มีขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 25 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างไส้หลอดที่มีอุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส และใช้จุกยางทนความร้อนสูง (ยางแดง) ยี่ห้อ As one จึงส่งผลให้จุกยางไม่ละลาย ทำให้สามารถสังเคราะห์ได้นานต่อเนื่อง



รูปที่ 3.4 รูปหลอดทดลองแบบใหม่



รูปที่ 3.5 จุกยางทนความร้อน (Red Rubber Plug) ยี่ห้อ AS ONE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ไปยังระบบ

เนื่องจากหลอดทดลองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นถึง 2 เท่าของหลอดทดลองแบบเก่า ส่งผลให้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์นั้นจะต้องเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามระยะห่างของไส้หลอดกับท่อส่งแก๊สก็มีผลต่อการแตกตัวของคาร์บอน จึงต้องทำการไหลแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ โดยให้อัตราการไหลที่เหมาะสมต่อการโตของผลึกเพชรจึงทำการทดลอง ให้อัตราการไหลของไฮโดรเจนผ่านแอลกอฮอล์ ที่ 12 ml/min, 14 ml/min และ 16 ml/min จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วย Raman Spectroscopy และ SEM

3.3.3 การทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการเกิดผลึกเพชร

จากการทดลองเพื่อศึกษาถึงอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์มายังระบบ เพื่อหาอัตราการไหลที่ดีที่สุดที่เหมาะสมกับการทดลองในครั้งนี้ จึงได้มีการศึกษาถึงระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดเป็นผลึกขนาดใหญ่ พอที่จะสามารถนำออกมาวัดขนาดด้วย Digital Vernier และทำการวิเคราะห์ Raman กับ Microscope ได้ด้วยการหยิบออกด้วยตาเปล่า

จึงทำการเลือกช่วงเวลาในการสังเคราะห์ที่

- 1.) 6 ชั่วโมง
- 2.) 12 ชั่วโมง
- 3.) 24 ชั่วโมง

จากนั้นนำไปวิเคราะห์ผล และทำการทดลองเพื่อเพิ่มขนาดและปรับปรุงคุณภาพของผลึกต่อไป

3.3.4 การทดลองเพื่อหาอุณหภูมิ ของฐานรองซิลิกอนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดผลึกเพชร บริเวณ "จุดตัด" (ขั้นตอนที่1ฐานรองที่มีการเตรียมพื้นผิว)

ในรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ทำการเตรียมพื้นผิว ของฐานรองซิลิกอน ด้วยการกรีดผิวหน้า เป็นรูปตาราง เพื่อให้มีความหนาแน่นของการเกิด นิวเคลียสชั้นที่สูง ตรงบริเวณ "จุดตัด" จึงทำการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองเป็น 800 , 900 และ 1000 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ผลึกด้วย Microscope และวัดขนาดด้วย Digital Vernier

3.3.5 การทดลองใช้ฐานรองที่ไม่เตรียมพื้นผิว เพื่อเพิ่มขนาด ผลึกเพชร

การทดลองนี้เป็นการเพิ่มขนาดและปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ดังที่อธิบายในการทดลองที่ผ่านมา โดยนำไปสังเคราะห์ต่ออีกเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง รวมเป็นระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 36 ชั่วโมง บนฐานรองที่ไม่เตรียมพื้นผิว และปรับปรุงคุณภาพโดยการแอนนัล ในบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน

จากนั้นนำไปวิเคราะห์พื้นผิวผลึกเพชรด้วย Microscope และวัดขนาดด้วย Digital Vernier

แล้วจึงวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผลึกด้วย Raman spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 การทดลองเพื่อเพิ่มขนาดของผลึก

เมื่อได้ผลึกเพชรที่สมบูรณ์แล้ว ทำการคัดเลือกผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ มาทำการสังเคราะห์ต่อบนฐานรองซิลิกอนแบบขัดมัน เป็นฐานรองที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ผลึกเพชรในขั้นตอนการเพิ่มขนาดของผลึก การทดลองเพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชรนี้จะใช้เวลาในการสังเคราะห์ครั้งละ 24 ชั่วโมง โดยมีการแอนนีสลทุกๆ 12 ชั่วโมง จากนั้นจะนำชิ้นงานมาวัดขนาดด้วย Digital Vernier และวิเคราะห์พื้นผิวด้วย SEM จากนั้นทำการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดผลึกด้วยวิธีเดียวกันนี้อีกทั้งหมด 5 ครั้ง ซึ่งทุกครั้งผลึกเพชรที่สังเคราะห์นั้นจะถูกนำมาวัดขนาดและวิเคราะห์พื้นผิวเช่นเดียวกัน จากนั้นจะทำการสังเคราะห์ต่ออีก 12 ชั่วโมง และทำการแอนนีสล ด้วย รวมเป็นระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 192 ชั่วโมง

ผลึกเพชรที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย SEM , Digital Vernier , Raman Spectroscopy และ Diamond Tester

3.3.7 การทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน

จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสังเคราะห์ผลึกให้มีขนาดใหญ่ เพื่อง่ายต่อการทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและอีกทั้งยังง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ คือมีขนาดใหญ่พอที่จะทำการต่อสายโพรบได้

โดยใช้ชุดทดลองที่สร้างขึ้นจากซิลิกอนออกไซด์มาเป็นฐานรอง ทำการต่อขั้วโลหะเงินทั้ง 4 ด้าน ของผลึกเพชร ทำการจ่ายกระแสและแรงดัน ให้กับขั้วโลหะเงินโดยจะทำการจ่ายเป็นคู่ยกตัวอย่างเช่น ขา 1 กับขา 2, ขา 1 กับขา 3, ขา 1 กับขา 4 เป็นต้น จนครบทุกคู่ ระหว่างการจ่ายกระแสและแรงดันให้ขาคู่ต่างๆทำการวัด V ตกคร่อม R ในการทดลองนี้ให้ค่าความต้านทานที่ 20 M Ω จากนั้นทำการคำนวณหากระแสและแรงดันด้วยสมการ และหาค่าความต้านทานของผลึกเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์เทียบกับผลึกเพชรธรรมชาติ

3.3.8 การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลึกเพชร

โดยปรกติแล้วสารกึ่งตัวนำทั่วไปจะมีคุณสมบัติคือจะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากเกิดประจุพาหะเพื่อขึ้นทั้งโฮลและอิเล็กตรอน เริ่มทำการทดลองโดยทำการต่อขั้วโลหะเงินกับผลึกเพชรด้วยกาวเงินเพื่อให้เกิดรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยนำไปวางบนแผ่นทองแดง จากนั้นจึงจะนำไปวางบน Hot Plate ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C , 100°C , 150°C และ 200°C โดยเริ่มจาก อุณหภูมิห้อง สังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานของผลึกเพชร ที่อุณหภูมิแต่ละการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อนนั้น ผลึกเพชรที่ได้จากการทดลองโดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ นั้นได้ถูกนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy , SEM และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ตามความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

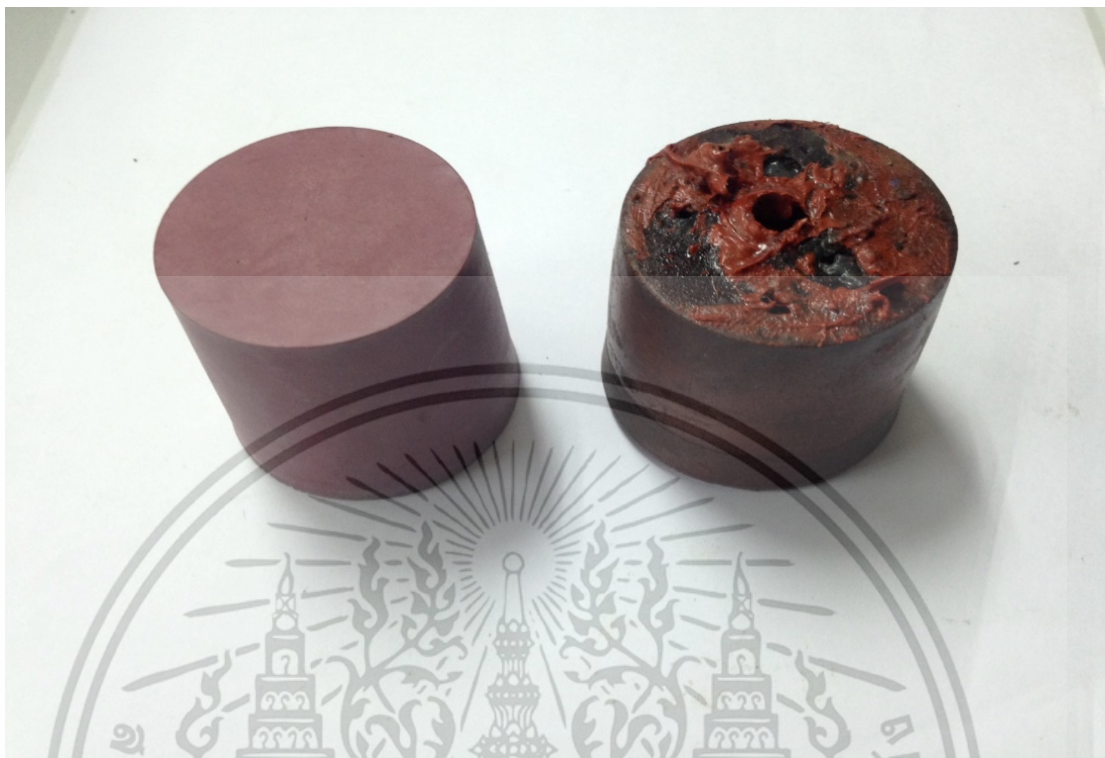
4.1 ผลการทดลองที่ได้จากการแก้ไขปัญหาคำร้อนสะสมสูงของหลอดทดลองและทำการออกแบบชุดทดลองใหม่

ชุดทดลองเก่านั้นมีขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลให้ระยะห่างระหว่าง ขดลวดนำความร้อนกับหลอดทดลอง นั้นมีระยะที่ใกล้กัน จึงส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมสูง ขณะทำการทดลองที่มีระยะเวลาานาน และด้วยขดลวดนำความร้อนนั้นมีอุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ชุดทดลองนั้นเกิดความเสียหายจึงมาสามารถทำการทดลองที่มีระยะเวลาานานอย่างต่อเนื่องได้ ความเสียหายของชุดทดลองที่เกิดจากความร้อนสะสมสูง ได้แก่ จุกยาง และหลอดทดลอง เป็นต้นดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 จุกยางของชุดการทดลองเก่าหลังผ่านการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 จุกยางก่อนการสังเคราะห์และหลังการสังเคราะห์

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า จุกยางนั้นเกิดความเสียหาย และได้เสื่อมสภาพไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในการทดลองครั้งต่อไปได้อีก และหลอดทดลองนั้นเกิดการรั่ว เนื่องจากการเย็นตัวกลับเข้าสู่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เป็นขีดจำกัดของชุดทดลองแบบเก่า ในชุดทดลองแบบเก่าน้ำได้ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์ของ นางสาวลัดดาวัลย์ สุภาดี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้นำเสนอ การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชรด้วยเทคนิค HFCVD (HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION) เป็นการสังเคราะห์ผลึกเพชรระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 19 ชั่วโมง ได้ผลึกเพชรขนาด $620\ \mu\text{m}$ ซึ่งขีดจำกัดของชุดการทดลองแบบเก่านี้อาจมีความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยเวลาเพียงอันสั้นแค่ 5 ชั่วโมง จำไม่สามารถสร้างผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ได้ แสดงในรูปชุดการทดลองแบบเก่าดังรูปที่ 4.3

จากรูป สังเกตเห็นได้ว่า หลอดทดลองนั้นมีขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร และขณะที่ทำการทดลอง อุณหภูมิของหลอดทดลองนั้นมีอุณหภูมิ 350 และอุณหภูมิของจุกยางมีอุณหภูมิขณะทำการทดลองที่ 210 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้จุกยางเกิดการละลายจึงไม่สามารถทำการทดลองเป็นเวลานานต่อเนื่องได้ ส่งผลให้ไม่สามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากผลึกเพชรขนาดใหญ่จะเกิดจากการสังเคราะห์ด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 หลอดทดลองแบบเก่า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอชุดทดลองใหม่ ด้วยการออกแบบใหม่ ให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าชุดทดลองแบบเก่า ให้มีความสามารถในการทนอุณหภูมิ แก้ไขปัญหาความร้อนสะสมสูง จึงสามารถทำการทดลองได้เป็นระยะเวลาาน และยังมีท่อระบายแก๊สออกไปยังระบบภายนอกในตัว จุกยางที่ใช้ในการออกแบบชุดการทดลองใหม่นี้ ยี่ห้อ AS ONE เป็นจุกยางสีแดง ชนิดทนอุณหภูมิสูง และหลอดทดลองมีขนาด ของเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร ดังแสดงชุดทดลองแบบใหม่ ในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 หลอดทดลองแบบใหม่

ขณะที่ทำการทดลองนั้น อุณหภูมิของชุดหลอดทดลองแบบใหม่ได้มีอุณหภูมิขณะทำการทดลอง เพียง 150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของจุกยาง ขณะทำการทดลองเพียง 70 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้จุกยางและหลอดทดลองนั้นไม่เกิดความเสียหายจากความร้อนสะสมสูง และยังสามารถทำการสังเคราะห์ได้เป็นระยะเวลาที่นานเกินกว่าขีดจำกัดของชุดการทดลองแบบเก่าถึง 5 เท่า สามารถทำการทดลองได้เกินกว่าครั้งละ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางการทดลองที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิของหลอดทดลองและจุกยาง ในชุดการทดลองแบบเก่าและชุดการทดลองแบบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิขณะทำการทดลองของหลอดทดลองและจุกยาง

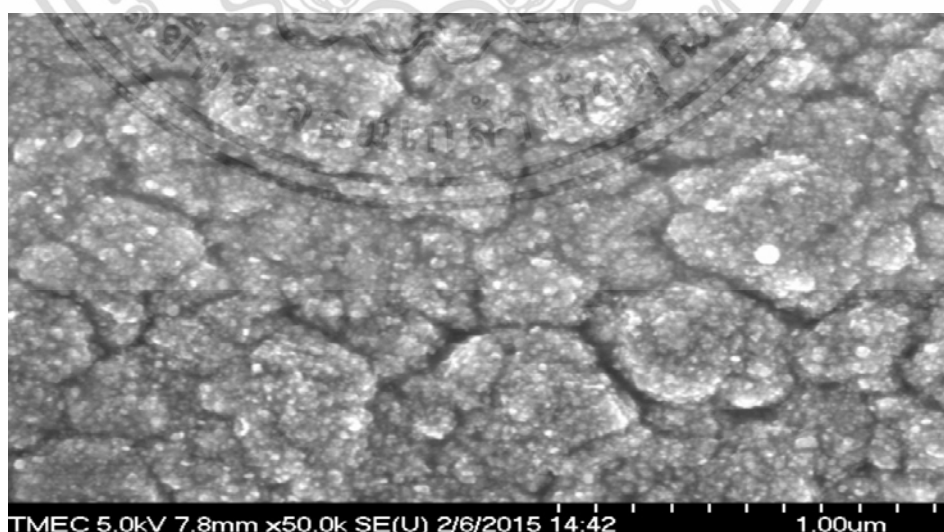
ชุดการทดลอง	อุณหภูมิหลอดทดลอง (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิจุกยางทดลอง (องศาเซลเซียส)	ขีดจำกัดในการ สังเคราะห์ (ชั่วโมง)
เก่า	380	210	5
ใหม่	150	90	24

หลอดทดลองชุดใหม่นี้มีขนาดที่ใหญ่และสูงกว่าหลอดทดลองชุดเก่าถึง 2 เท่า ซึ่งจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของหลอดทดลองแบบใหม่มีอุณหภูมิขณะทำการทดลองต่ำกว่าหลอดทดลองแบบเก่ามากกว่าถึง 2 เท่า และอุณหภูมิของจุกยางแบบใหม่มีอุณหภูมิขณะทำการทดลองต่ำกว่าจุกยางแบบเก่ามากกว่าถึง 3 เท่า อีกทั้งชุดการทดลองแบบใหม่นี้มีความสามารถในการสังเคราะห์ผลึกเพชรได้นานเกินกว่า 24 ชั่วโมง ต่อ หนึ่งการทดลอง ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าชุดการทดลองแบบเก่าถึง 5 เท่า จึงเหมาะกับการทดลองสังเคราะห์ผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่

4.2 ผลการทดลองอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ ไปยังระบบ

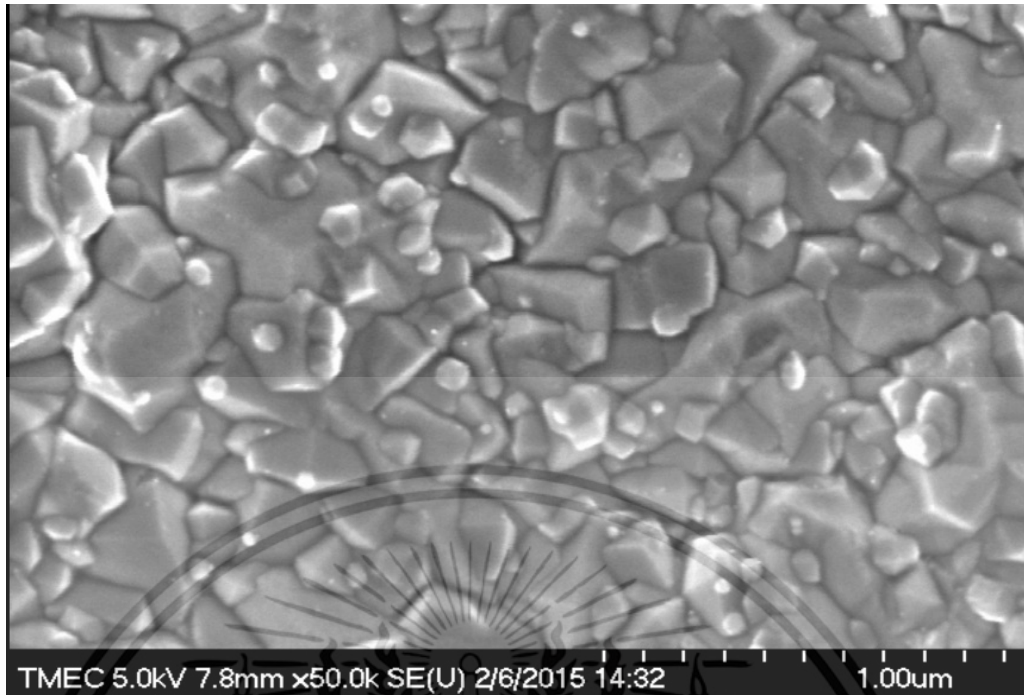
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การทดลองที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุง และพัฒนา หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จึงเกิดเป็นชุดทดลองแบบใหม่ ที่มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์มากกว่าชุดการทดลองแบบเก่าถึง 5 เท่า ดังนั้น เพื่อที่จะให้ระบบมีการไหลของไฮโดรเจนผ่านแอลกอฮอล์ที่สมบูรณ์ จึงต้องมีการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของไฮโดรเจนผ่านแอลกอฮอล์ เพื่อให้การสังเคราะห์นั้นเกิดมีผลึกเพชรขึ้น ทำการทดลองที่อัตราการไหลที่ 12 ml/min , 14 ml/min และ 16 ml/min ที่อุณหภูมิฐานรองที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาในการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง

จากนั้นชิ้นงานจากการทดลองหาอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านแอลกอฮอล์ มาวิเคราะห์ด้วย Raman และ SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.5

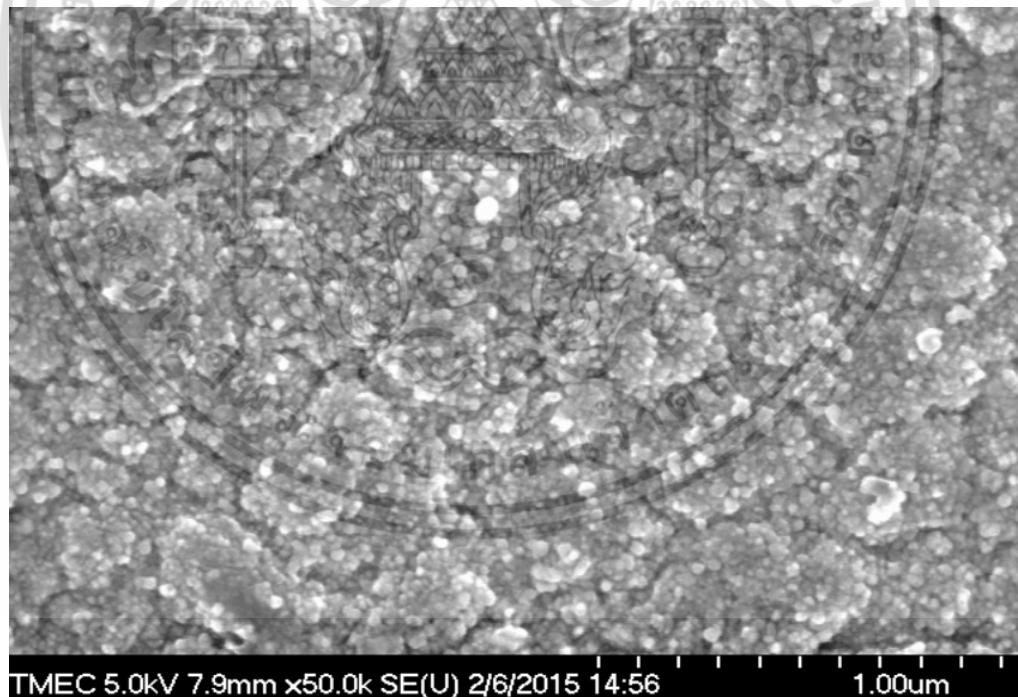


รูปที่ 4.5 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 12 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

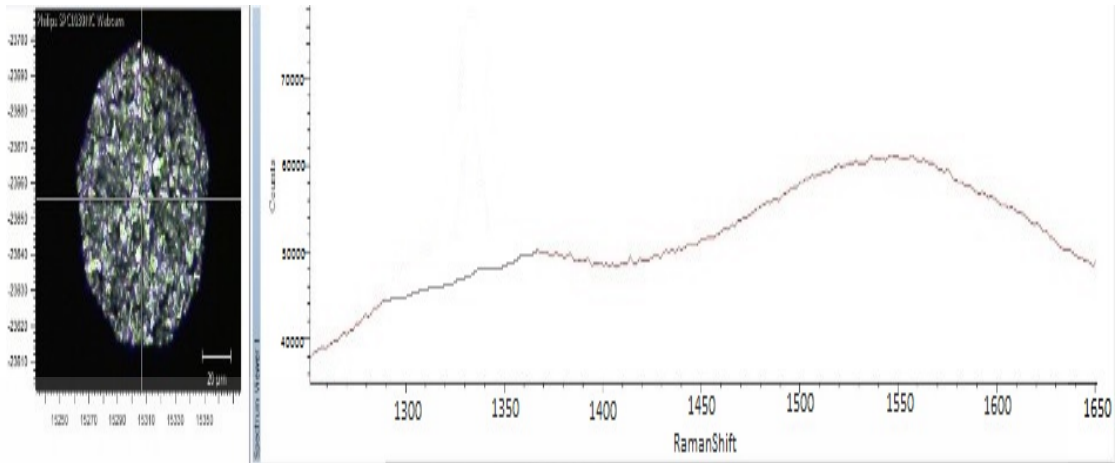


รูปที่ 4.6 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 14 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

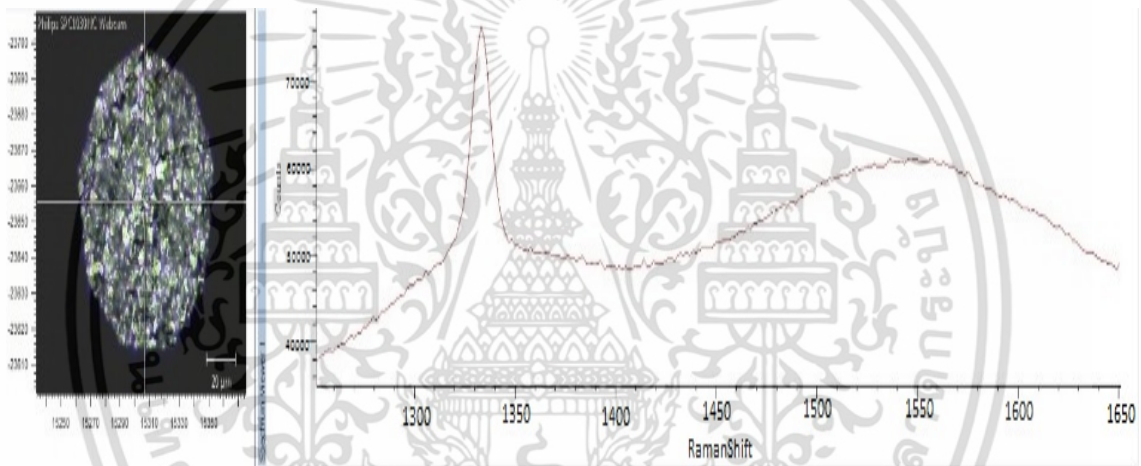


รูปที่ 4.7 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 16 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

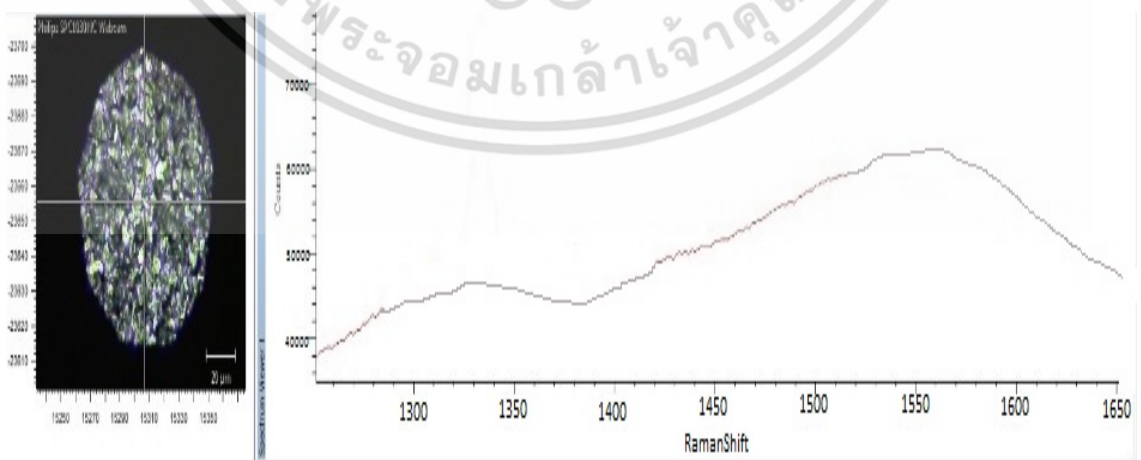
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 12 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย Raman



รูปที่ 4.9 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 14 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย Raman



รูปที่ 4.10 การเกิดผลึกเพชรที่อัตราการไหลของไฮโดรเจน 16 ml/min จากการวิเคราะห์ด้วย Raman เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์การเกิดผลึกของเพชร จากการวิเคราะห์ด้วย Raman และ SEM ดังกล่าว พบว่า ที่อัตราการไหลของไฮโดรเจนผ่านแอลกอฮอล์ที่ 14 ml/min นั้น มีผลึกเพชรเกิดขึ้นบน ซิลิกอนฐานรองและนอกจากนี้ยังเกิดผลึกเพชรขึ้นยังบริเวณร่องตัดจากการเตรียมผิวหน้าของซิลิกอน ที่ได้ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ Raman Spectroscopy คือมียอดความเข้มที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงความเป็นเพชร และผลของของการวิเคราะห์ด้วย SEM นั้นพบว่าผลึกเพชรนั้นมีผลึก เป็นรูปสี่เหลี่ยมและรูปสามเหลี่ยม เป็นผลึกระนาบ {111}และ{100} และที่การทดลองอัตราการไหล ของไฮโดรเจนผ่านแอลกอฮอล์ ที่ 12 ml/min และ 16 ml/min พบว่าไม่เกิดเป็นผลึกเพชรจากผล การวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าไม่มีลักษณะของผลึกแต่จะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนคล้ายดอกกะหล่ำ ด้วยผลของการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy พบว่า ไม่แสดงถึงจุดยอดของกราฟที่แสดง ความเป็นผลึกเพชร แต่พบจุดยอดกราฟที่ 1550 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับตาราง Raman Spectrum ตารางที่ 1.2 พบว่าเป็น Diamond - like Carbon

แต่อย่างไรก็ตามผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้นั้นยังพบความไม่สมบูรณ์ของผลึก จากผลการ วิเคราะห์ด้วย Raman จะเห็นได้ว่ามีจุดยอดของกราฟที่ 1580 cm^{-1} ซึ่งแสดงในส่วนของแกรไฟต์ จึง ต้องมีการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลึกและยังรวมไปถึงการเพิ่มขนาดของผลึกอีกด้วย

4.3 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดผลึกเพชร

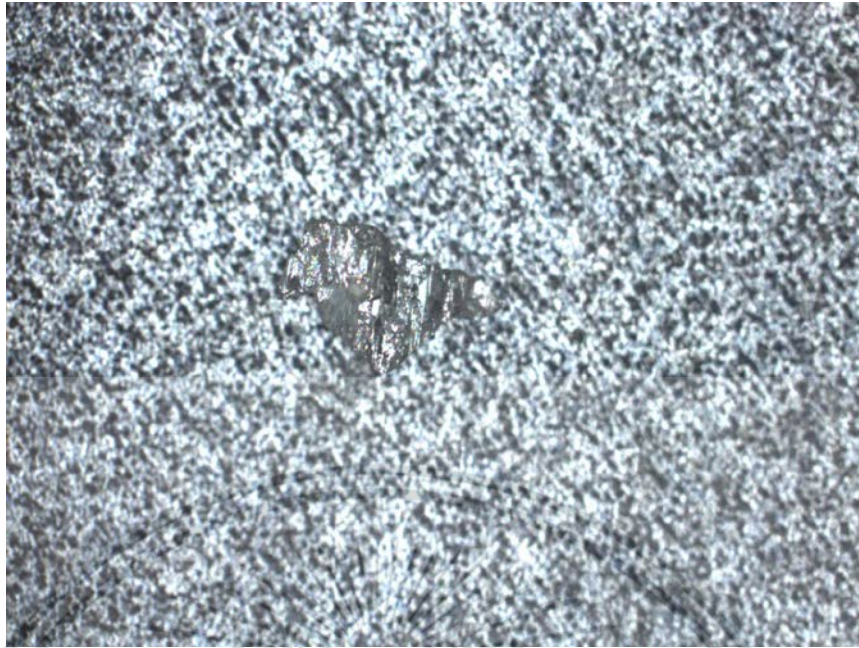
การสังเคราะห์ผลึกเพชรนี้จะต้องทำการสังเคราะห์ที่เป็นระยะเวลาานาน อันเนื่องมาจากอัตรา การโตนั้นมีผลจากระยะเวลาในการสังเคราะห์โดยตรง

จากผลของการสังเคราะห์เป็นระยะเวลาานานถึง 12 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ พอที่จะสามารถนำมาวัดและวิเคราะห์ด้วย Raman และ SEM ได้ คือสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า และสามารถหยิบไปวัดขนาดด้วยเวอเนียร์คาลิเปอร์ได้ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลึกเพชรขนาด $490\text{ }\mu\text{m}$ ที่ได้จากการวัด ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลึกเพชรขนาด 490 μm ที่ถ่ายภาพจากกล้อง Microscope

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าผลึกเพชรที่ได้นั้นมีขนาด 490 μm ซึ่งเทียบกับเพชรขนาดครึ่งตันค์ที่มีตามท้องตลาดเป็นเครื่องประดับแล้วสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าโดยไม่ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ในการส่องเพื่อหยิบขึ้นไปวิเคราะห์ ดังรูป



(a)

(b)

รูปที่ 4.13 (a) ผลึกเพชรสังเคราะห์ขนาด 490 μm จากกล้องกำลังขยาย 10 เท่า
(b) ผลึกเพชรธรรมชาติขนาด 490 μm จากกล้องกำลังขยาย 10 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบผลึกเพชรธรรมชาติผลึกกับเพชรสังเคราะห์ขนาด 490 μm จากกล้องกำลังขยาย 10 เท่า

และในการทดลองนี้ยังได้ทำการทดลองที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง และเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดและระยะเวลาในการสังเคราะห์

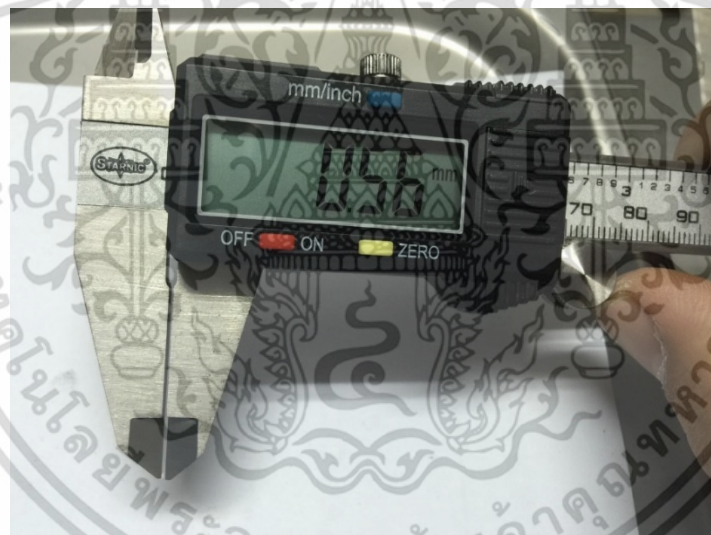
ครั้งที่	ระยะเวลาในการสังเคราะห์ (ชั่วโมง)	ขนาด(μm)
1	6	ไม่สามารถวัดขนาดได้
2	12	490
3	24	560

จากการทดลอง ในการทดลองครั้งแรกเป็นการสังเคราะห์ผลึกเพชรที่เวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวด้วย SEM คือยังไม่เกิดเพชรในรูปของผลึกแต่เกิดรูปของฟิล์มเพชร และในการทดลองครั้งที่สอง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบเป็นชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์ว่ามีผลึกเพชรที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้แล้ว จากนั้นจึงได้ทำการทดลองในครั้งที่สาม ใช้เวลาในการสังเคราะห์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลึกเพชรที่ได้มีขนาด 560 μm จากการวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ดังแสดงในรูปการวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ในการทดลองที่ 2, 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



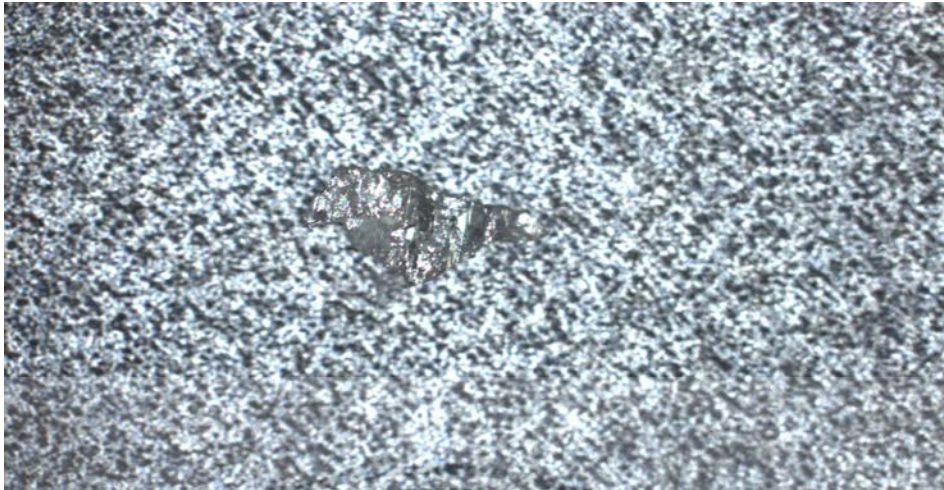
รูปที่ 4.15 ผลึกเพชรขนาด 490 μm ที่ได้จากการวัด ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์ ก่อนเพิ่มขนาด



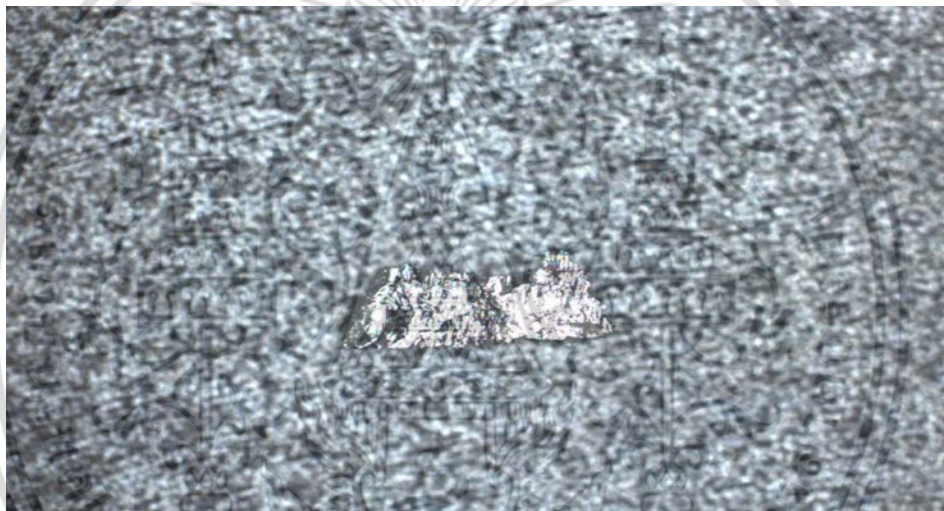
รูปที่ 4.16 ผลึกเพชรขนาด 560 μm ที่ได้จากการวัด ด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์ หลังเพิ่มขนาด

จากนั้นนำไปวิเคราะห์สภาพพื้นผิวด้วย กล้องMicroscope และตรวจความเป็นเพชรด้วยการวิเคราะห์ Raman จะได้ผลการทดลองดังรูป

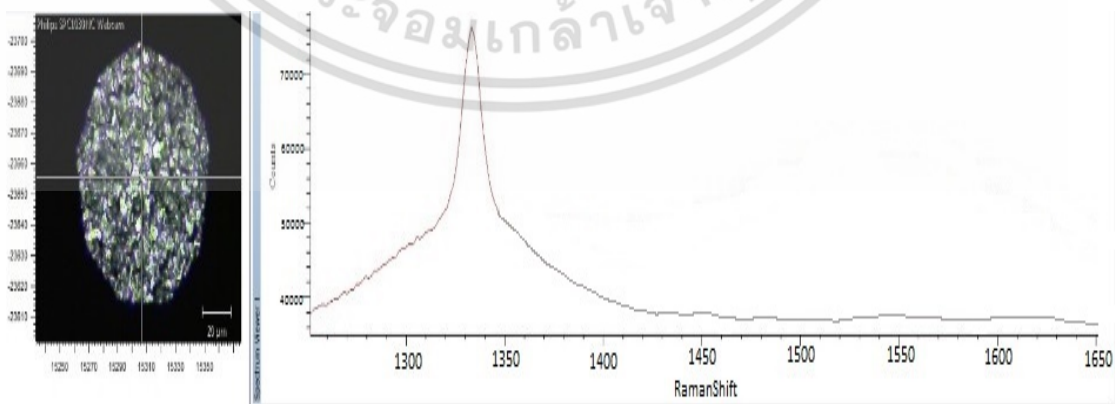
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลึกเพชรขนาด 490 μm ก่อนทำการสังเคราะห์ จาก กล้องMicroscope



รูปที่ 4.18 ผลึกเพชรขนาด 560 μm หลังทำการสังเคราะห์ จาก กล้องMicroscope



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรที่ทำการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองนี้พบว่า การสังเคราะห์ผลึกเพชรเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง นี้พบว่าเกิดเป็นผลึกเพชรที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และสามารถนำไปวิเคราะห์ผลได้ จึงเลือกใช้การทดลองในการสังเคราะห์ผลึกเพชรที่เวลา 12 ชั่วโมง ไปสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดและปรับปรุงคุณภาพของผลึกในการทดลองหัวข้อต่อไป

4.4 การทดลองเพื่อหาอุณหภูมิ ของฐานรองซิลิกอนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดผลึกเพชร บริเวณ "จุดตัด" (ขั้นตอนที่ 1 ฐานรองที่มีการเตรียมพื้นผิว)

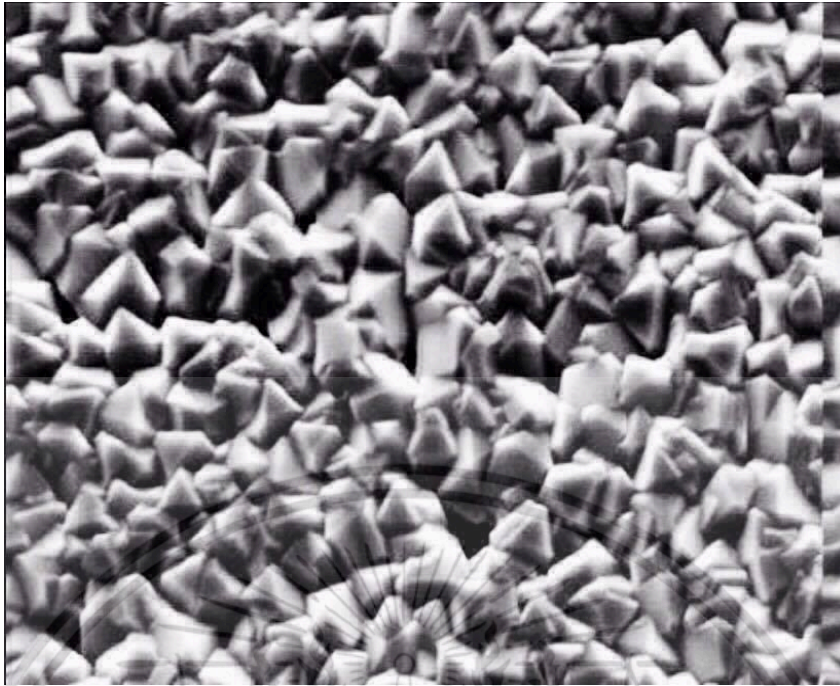
จากการทดลองนำซิลิกอน แบบเตรียมพื้นผิวมาทำการสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิฐานรอง ที่ 800-1000 °C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบ การเกิดของผลึกเพชร ที่อุณหภูมิการทดลองดังกล่าว จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วย กล้อง Microscope 150 เท่า

จะสังเกตได้ว่า การสังเคราะห์ผลึกเพชรที่อุณหภูมิของฐานรองที่ 800 องศาเซลเซียส จะได้ผลึกเพชรที่มีลักษณะ ของผลึกเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งแสดงถึงระนาบ {111} และที่ อุณหภูมิฐานรองของฐานรองที่ 900 องศาเซลเซียส จะได้ผลึกเพชรที่มีลักษณะ ของผลึกเป็นรูปสามเหลี่ยมและผลึกรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งแสดงถึงระหว่างระนาบ {100} , {111}เป็นระนาบผสม และเมื่อทำการทดลอง ที่อุณหภูมิของฐานรองที่ 1000 องศาเซลเซียส จะได้ผลึกเพชรที่มีลักษณะ ของผลึกเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งแสดงถึงระนาบ {100}

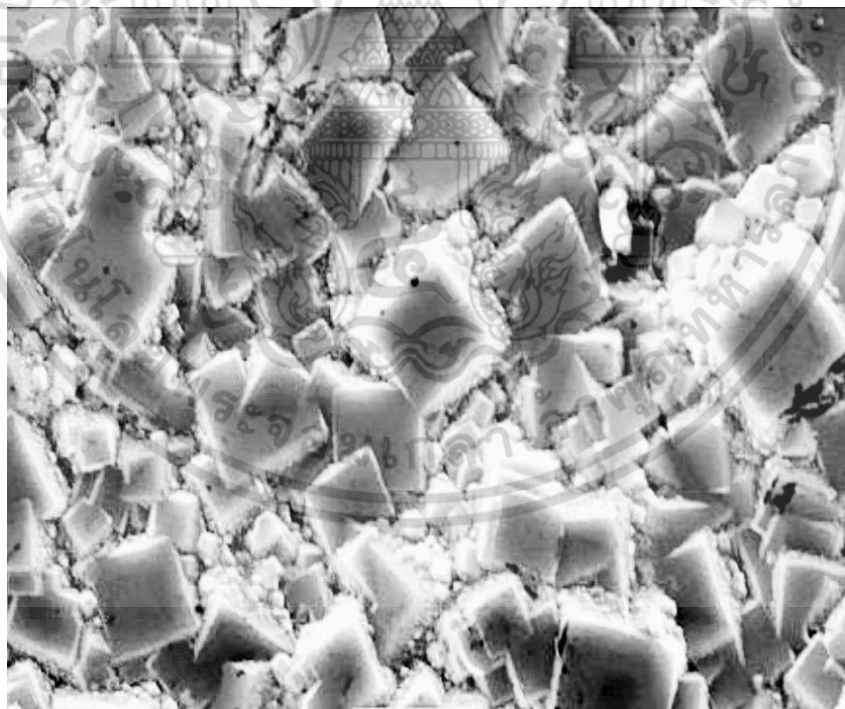


รูปที่ 4.20 อุณหภูมิของฐานรองที่ 800°C จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 อุณหภูมิของฐานรองที่ 900°C จากการวิเคราะห์ด้วย SEM



รูปที่ 4.22 อุณหภูมิของฐานรองที่ 1000°C จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจสอบการเกิดผลึกเพชรบนซิลิกอน พบว่า ที่อุณหภูมิของฐานรองที่ 900 องศาเซลเซียส เกิดผลึกเพชรตรงบริเวณ จุดตัด ดังรูปที่ 4.23 ที่มีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปทำการวัดขนาดด้วยดิจิตอล เวอร์เนียร์ และวิเคราะห์ลักษณะของผลึกด้วย Microscope ซึ่งมีขนาด 490 μm ดังรูปที่ 4.24 และมีลักษณะผลึกดังรูปที่ 4.25 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ความเป็นเพชรด้วยเครื่อง Raman Spectroscope ซึ่งแสดง จุดยอดกราฟที่ 1332 cm^{-1} บ่งบอกถึงความเป็นผลึกเพชร ดังรูปที่ 4.26

และในส่วนของการทดลอง อุณหภูมิฐานรองที่ 800 และ 1000 องศาเซลเซียส นั้นพบว่า ไม่พบผลึกเพชรเกิดบนแผ่นซิลิกอน พบเพียงฟิล์มเพชร ที่เกิดขึ้น

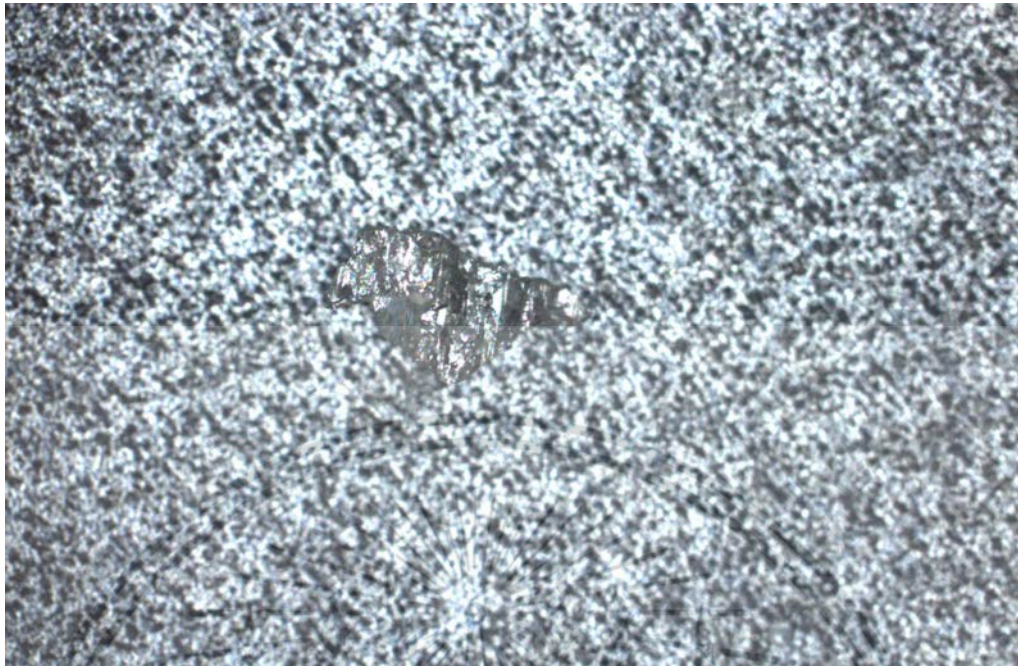


รูปที่ 4.23 ผลึกเพชรที่เกิดตรงบริเวณ “จุดตัด”

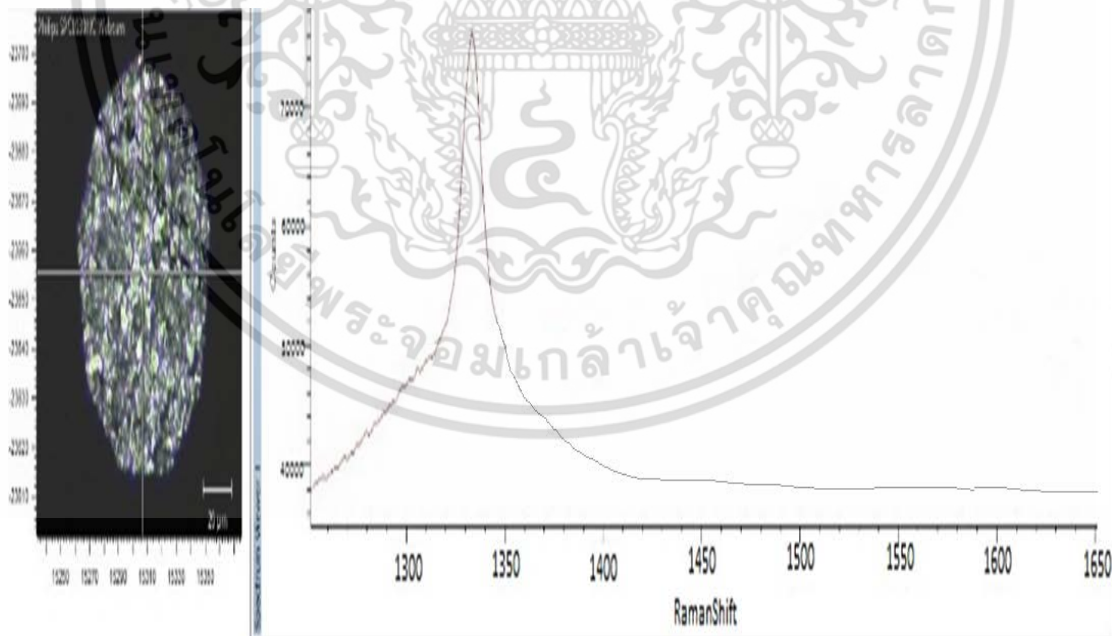


รูปที่ 4.24 ผลึกเพชรขนาด 490 μm จากการวัดด้วย ดิจิตอลเวอร์เนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ลักษณะของผลึกเพชร จากการถ่ายภาพด้วย Microscope



รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ของผลึกเพชรที่ทำการสังเคราะห์

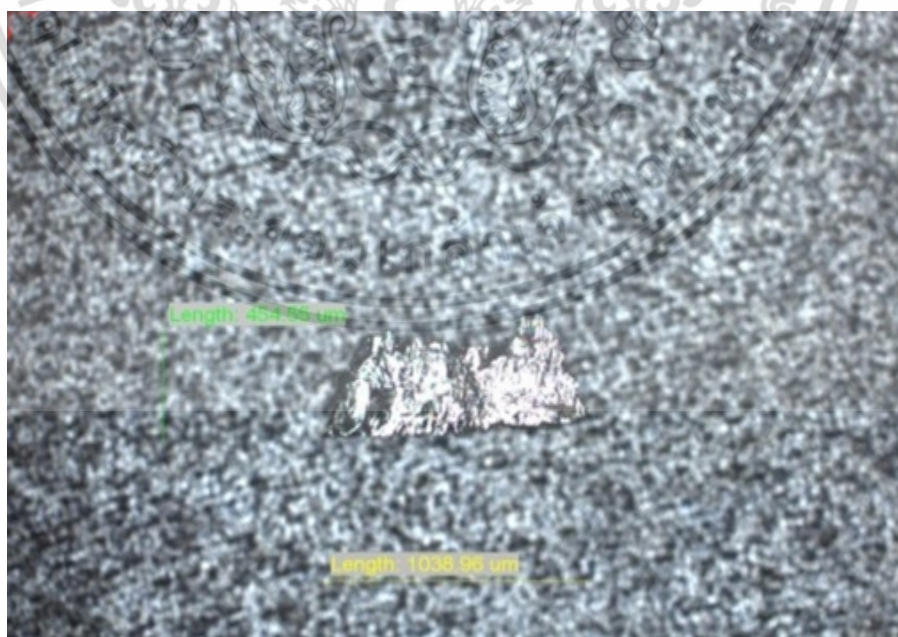
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดลองใช้ฐานรองที่ไม่เตรียมพื้นผิว เพื่อเพิ่มขนาด ผลึกเพชร

จากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดผลึกเพชร ตรงบริเวณจุดตัด ด้วยการใช้อุณหภูมิเตรียมพื้นผิวในการทดลองที่ผ่านมา ซึ่งได้ผลึกเพชรขนาด 490 μm จึงนำผลึกเพชรที่ได้มาทำการสังเคราะห์เพิ่มขนาด อีกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง บนฐานรองซิลิกอนที่ไม่ได้ทำการเตรียมพื้นผิว พร้อมกับการปรับปรุงคุณภาพของผลึกด้วยการแอนนีส บบนบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ 36 ชั่วโมง พบว่าผลึกเพชรนั้นมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งมีขนาด 670 μm จากการวัดขนาดด้วย ดิจิตอลเวอร์เนียร์ ดังรูปที่ และลักษณะของผลึกที่ได้จากการถ่ายภาพด้วย Microscope ดังรูปที่



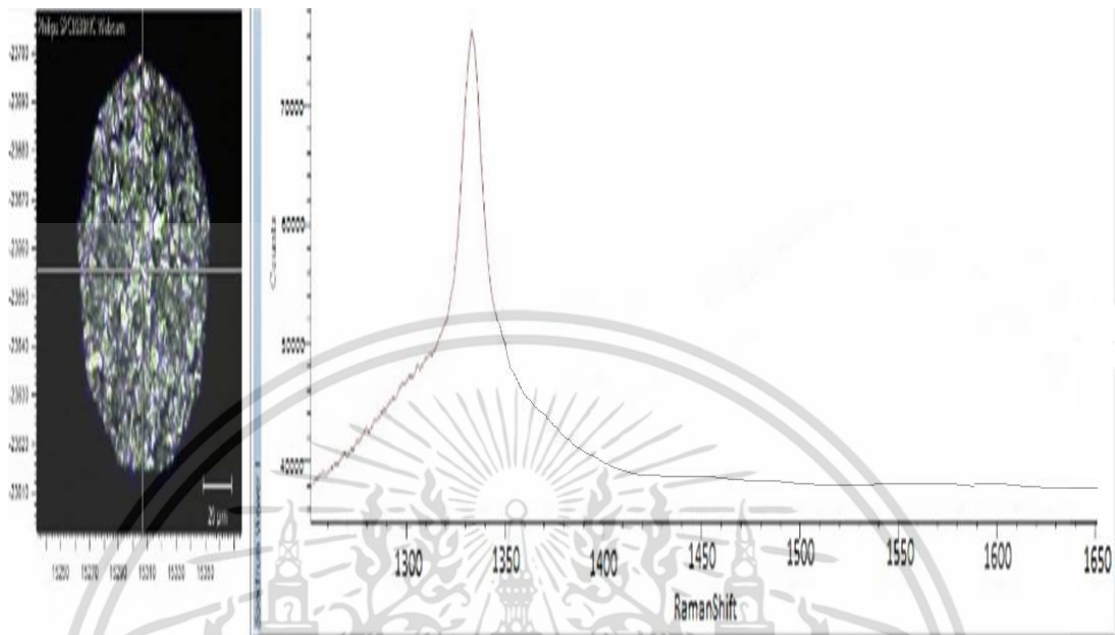
รูปที่ 4.27 ผลึกเพชรขนาด 670 μm จากการวัดขนาดด้วย ดิจิตอลเวอร์เนียร์



รูปที่ 4.28 ลักษณะของผลึกเพชรขนาด 670 μm จากการถ่ายภาพด้วย Microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

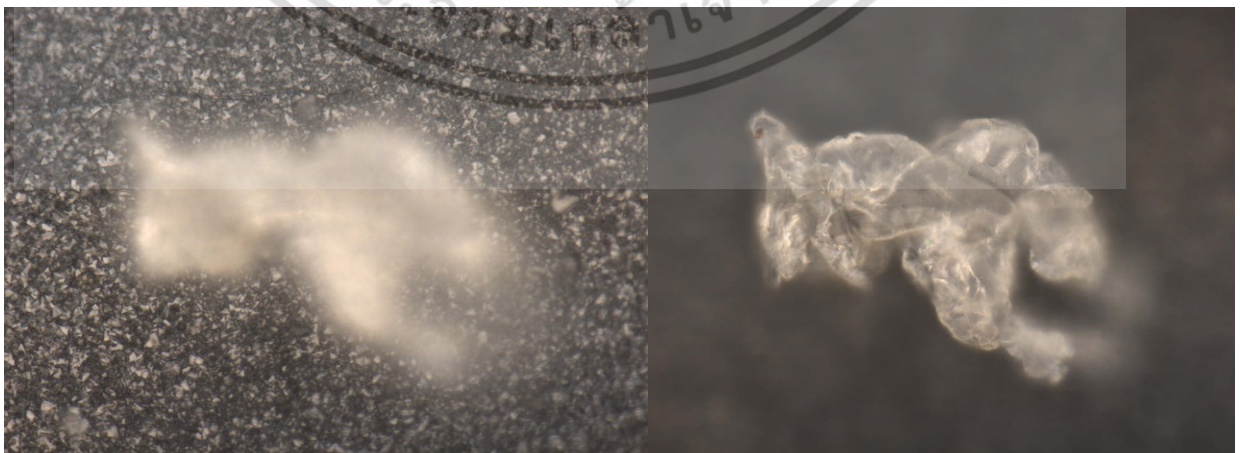
จากนั้นนำผลึกเพชรไปทำการวิเคราะห์ความเป็นเพชร ด้วยเครื่อง Raman Spectroscope พบว่าแสดง จุดยอดกราฟที่ 1332 cm^{-1} ดังรูปที่



รูปที่ 4.29 การวิเคราะห์ด้วยRamanของผลึกเพชรขนาด 670 μm

จะสังเกตเห็นว่า ผลึกเพชรหลังจากทำการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาด เป็นระยะเวลาอีก 24 ชั่วโมง นั้นมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น โดยมีขนาดเท่ากับ $670\text{ }\mu\text{m}$ จากระยะเวลารวมในการสังเคราะห์ทั้งหมด คือ 36 ชั่วโมง

และยังพบว่าบนพื้นผิวของซิลิกอนซัดมันแบบธรรมดา ที่ใช้ในการทดลองขั้นที่สอง มีอัตราการเกิดน้อยมาก เนื่องจากซิลิกอนซัดมันแบบธรรมดา มีความหนาแน่นของการเกิดนิวเคลียสที่ต่ำ เพชรจึงมีอัตราการเกิดบนผลึกเพชรมากกว่าฐานรองซิลิกอน



รูปที่ 4.30 ฐานรองซิลิกอนซัดมันแบบธรรมดา มีความหนาแน่นนิวเคลียสที่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการทดลองเพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชร

การทดลองนำผลึกเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นจากการทดลองทำการสังเคราะห์เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง มาทำการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดนั้น ผลึกเพชรมีอัตราการโตเป็นไปอย่างตาราง

ตารางที่ 4.3 แสดงระยะเวลาในการสังเคราะห์กับขนาด เวลาในการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง

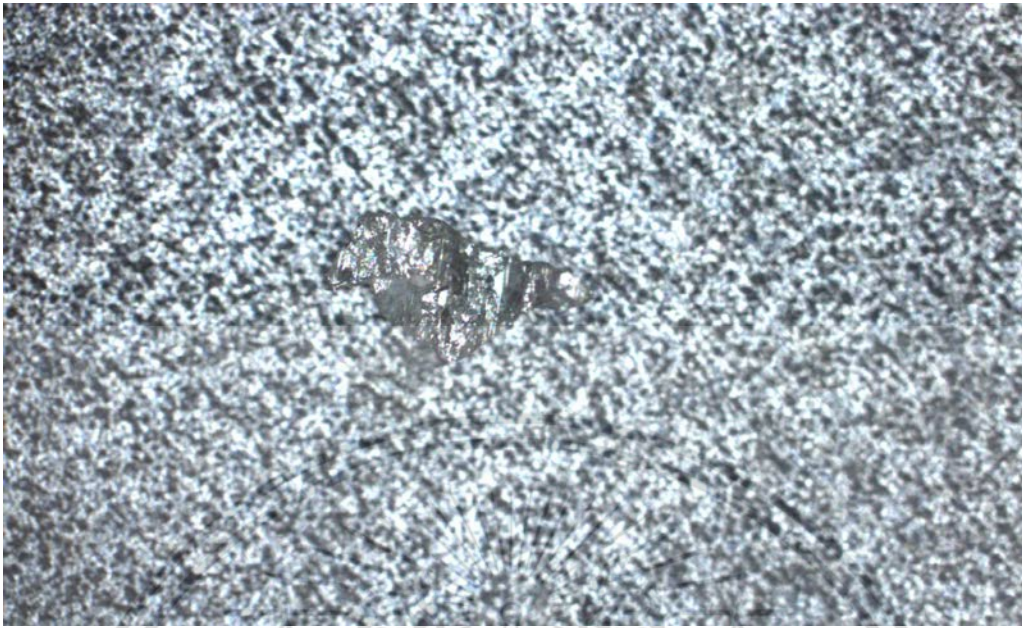
ครั้งที่	เวลารวมในการสังเคราะห์ (ชั่วโมง)	ขนาดของผลึกเพชร (μm)
1	12	490
2	36	670
3	60	800
4	84	960
5	108	1090
6	132	1117
7	156	1210
8	180	1250
9	192	1260

และจากนั้นนำผลการทดลองมาทำการเปรียบเทียบอัตราการโตกับระยะเวลาในการสังเคราะห์ แสดงดังกราฟที่ 4.1 และนำผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้นั้นไปทำการวิเคราะห์ SEM และทำการวัดขนาดด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ แสดงดังรูปที่ 4.31

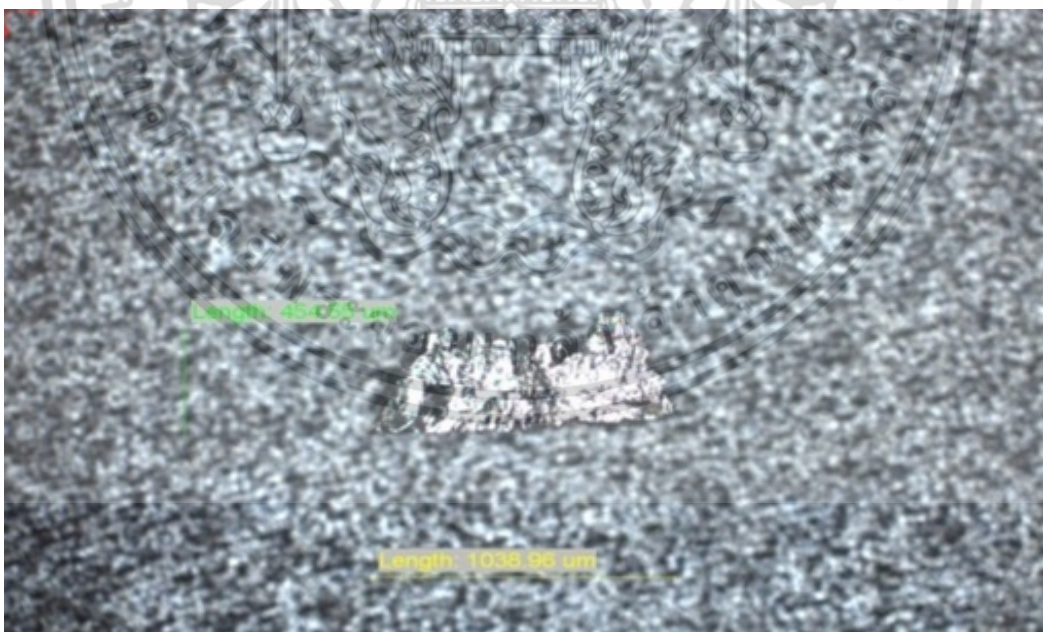


รูปที่ 4.31 ผลึกเพชรขนาด 490 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง จากดิจิตอลเวอร์เนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

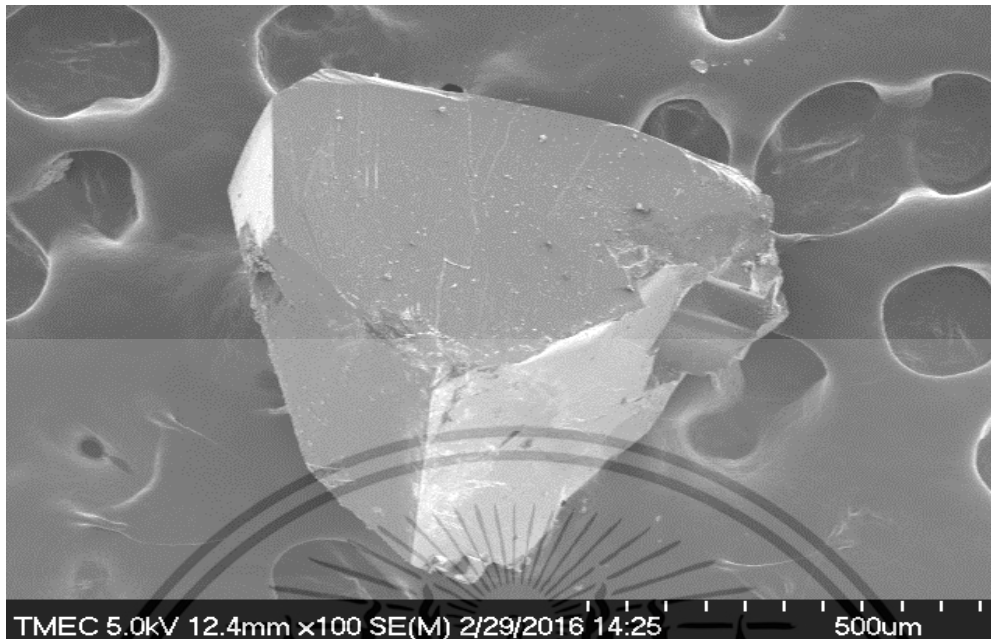


รูปที่ 4.32 ผลึกเพชรขนาด 490 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง จาก Microscope



รูปที่ 4.33 ผลึกเพชรขนาด 670 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 36 ชั่วโมง จาก microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

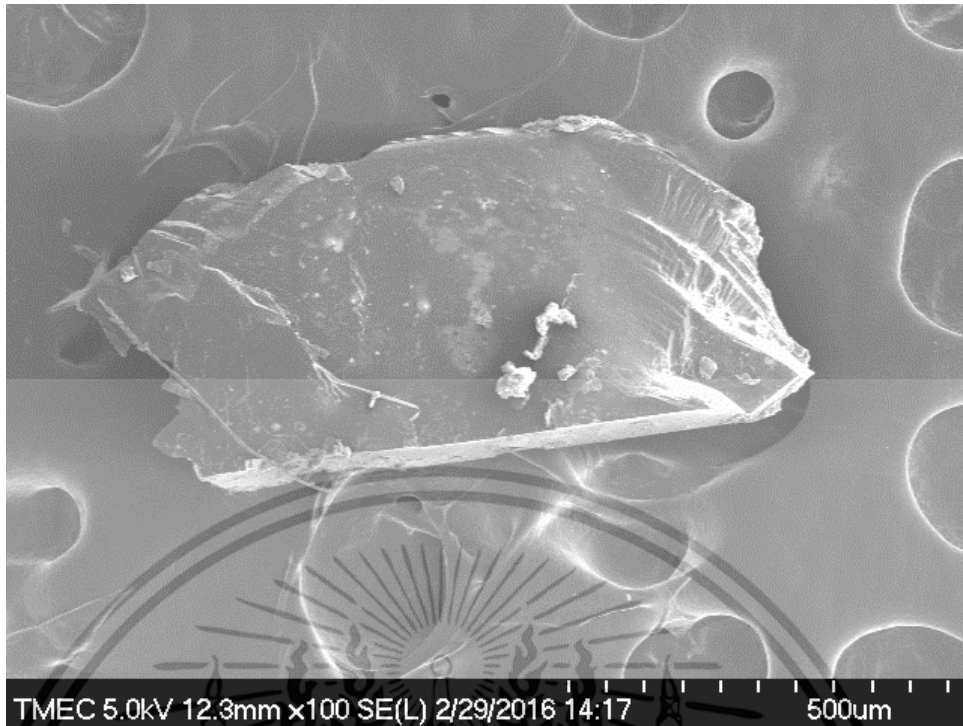


รูปที่ 4.34 ผลึกเพชรขนาด 670 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 36 ชั่วโมง จาก SEM

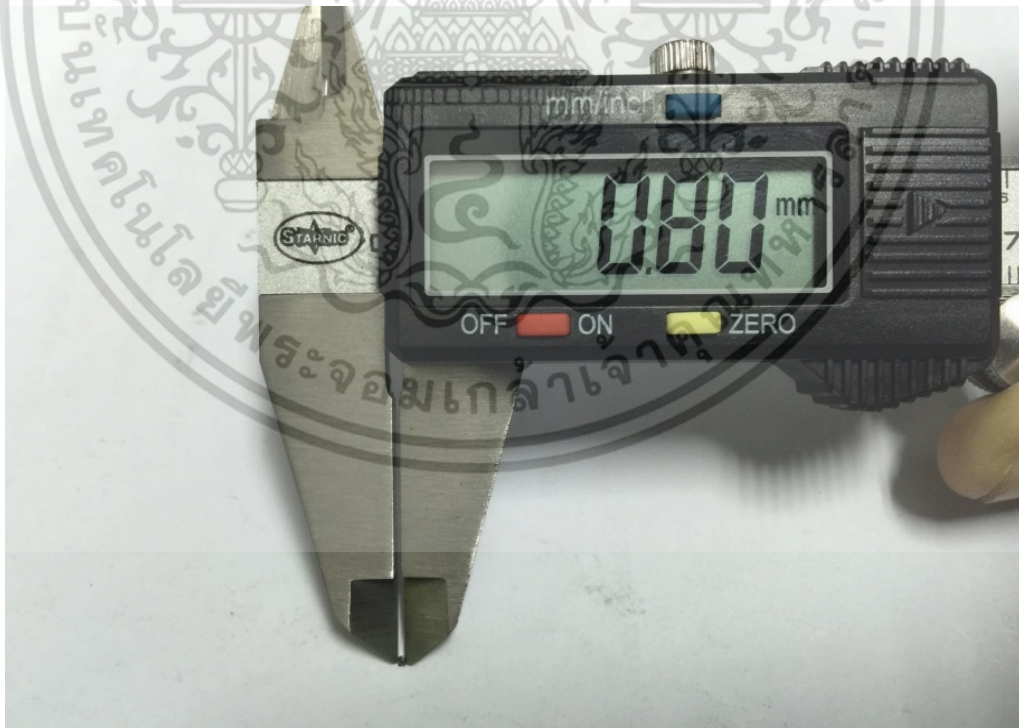


รูปที่ 4.35 ผลึกเพชรขนาด 670 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 36 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

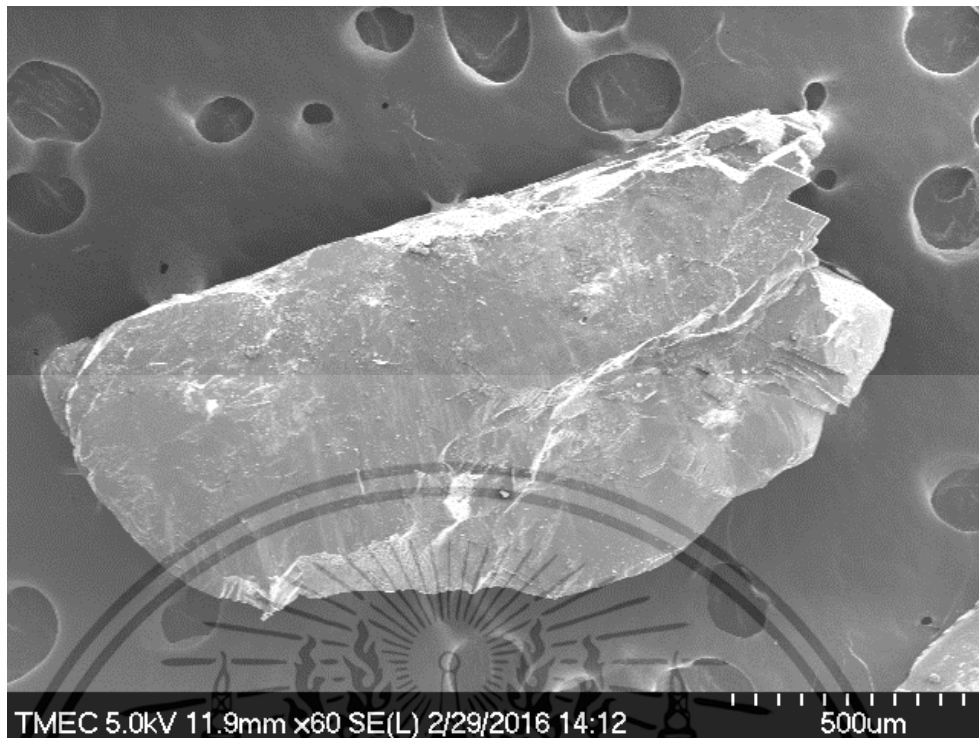


รูปที่ 4.36 ผลึกเพชรขนาด 800 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง จาก SEM



รูปที่ 4.37 ผลึกเพชรขนาด 800 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

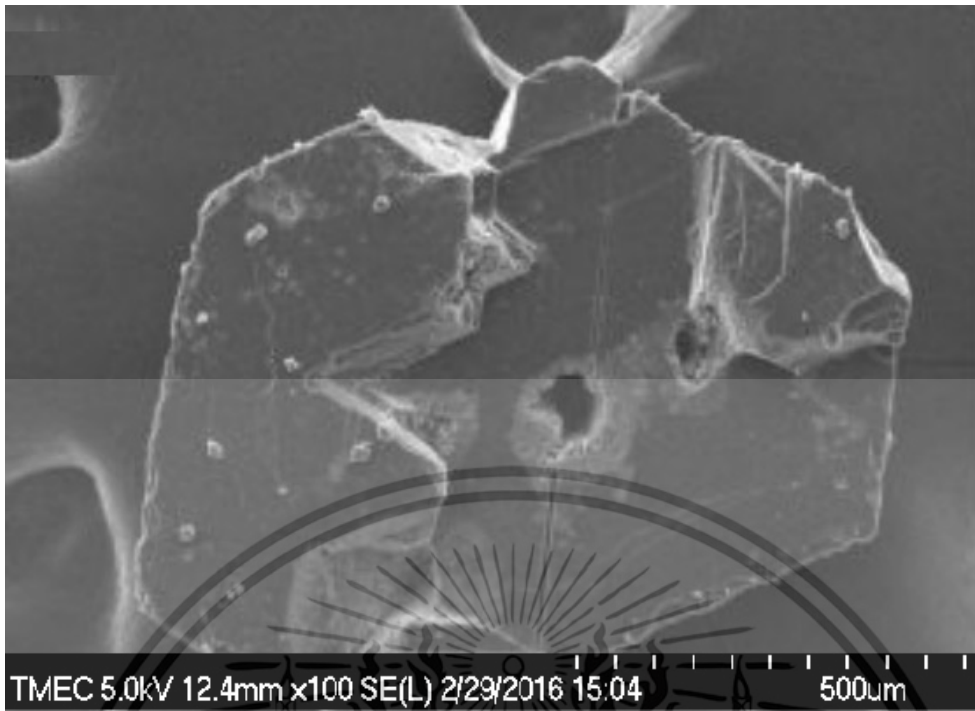


รูปที่ 4.38 ผลึกเพชรขนาด 960 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 84 ชั่วโมง จาก SEM

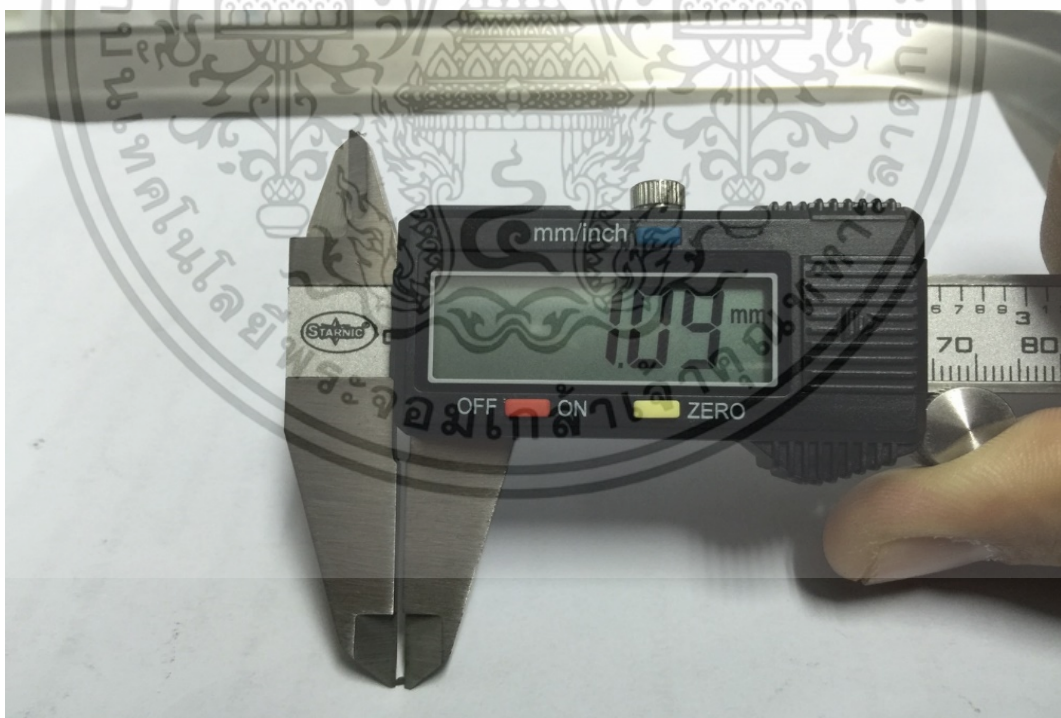


รูปที่ 4.39 ผลึกเพชรขนาด 960 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 84 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

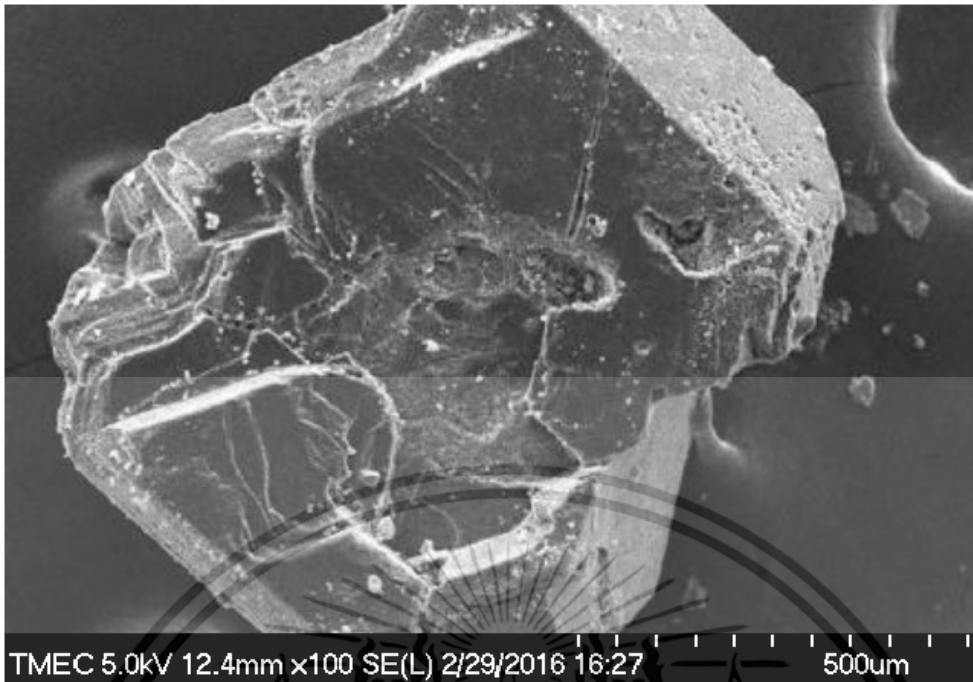


รูปที่ 4.40 ผลึกเพชรขนาด 1090 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 108 ชั่วโมง จาก SEM



รูปที่ 4.41 ผลึกเพชรขนาด 1090 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 108 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์

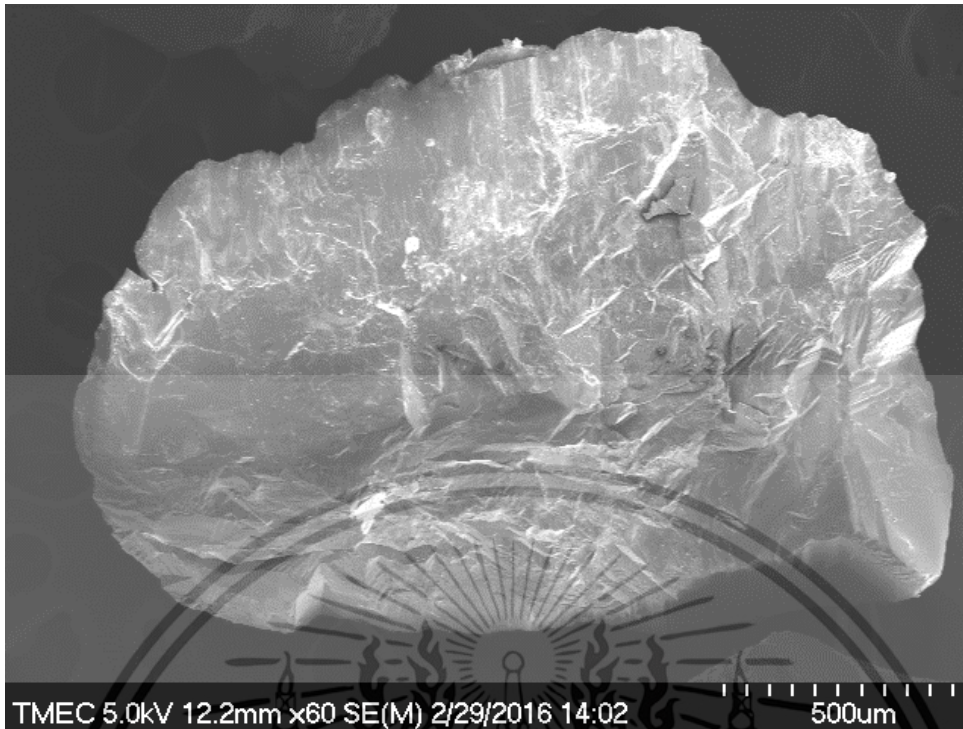
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 ผลึกเพชรขนาด 1117 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 132 ชั่วโมง จาก SEM



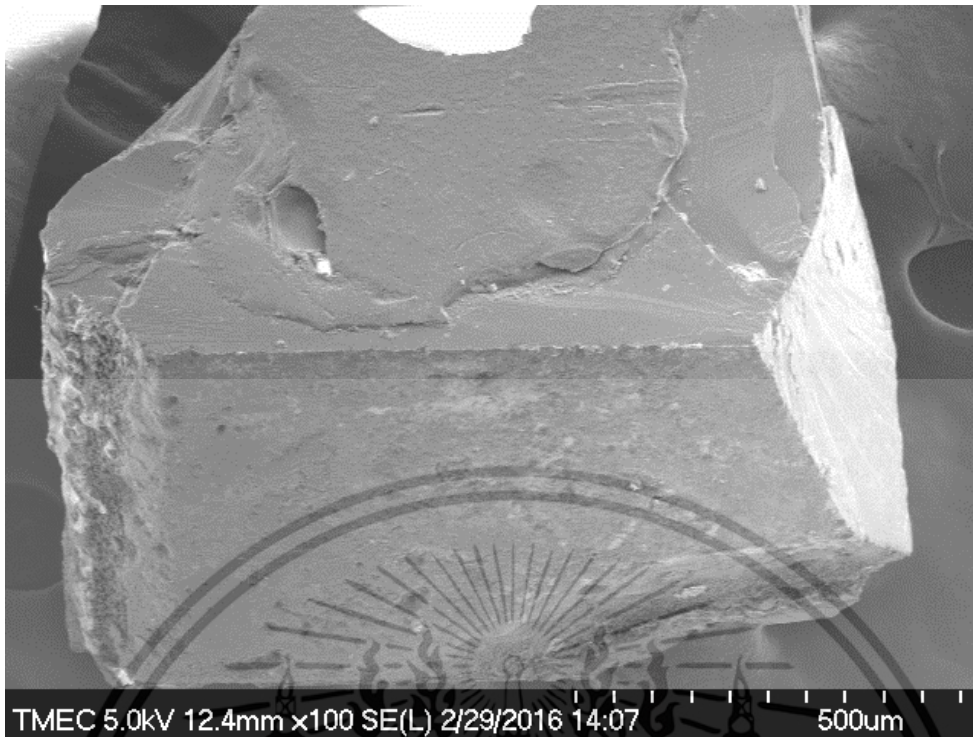
รูปที่ 4.43 ผลึกเพชรขนาด 1117 um ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 132 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



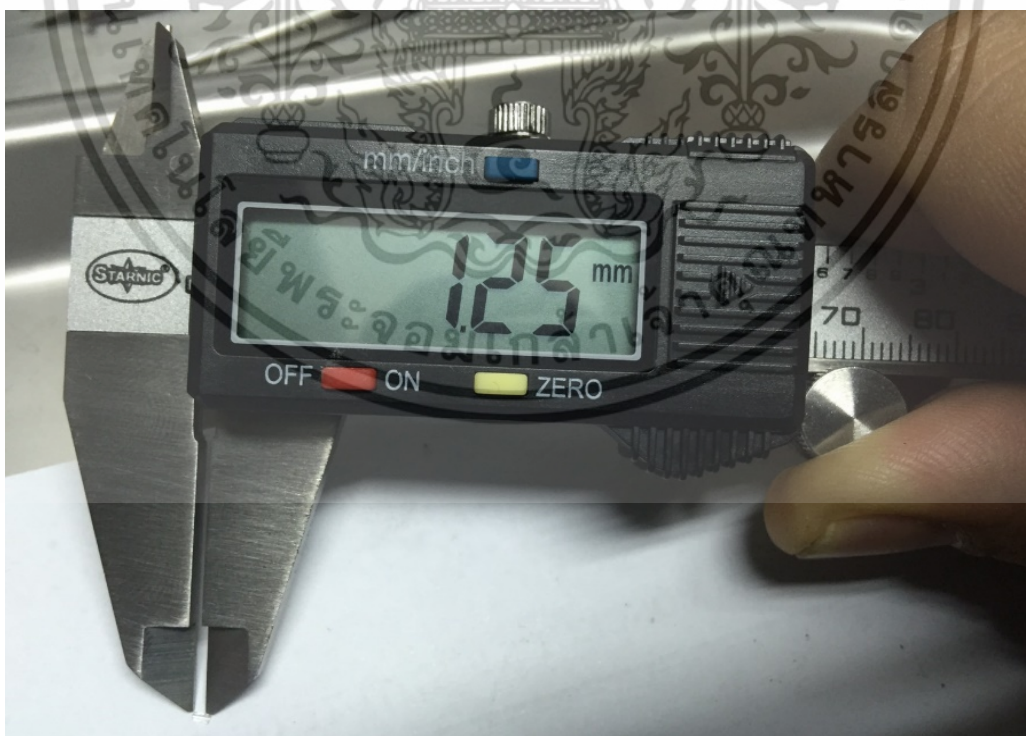
รูปที่ 4.44 ผลึกเพชรขนาด 1210 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 156 ชั่วโมง จาก SEM



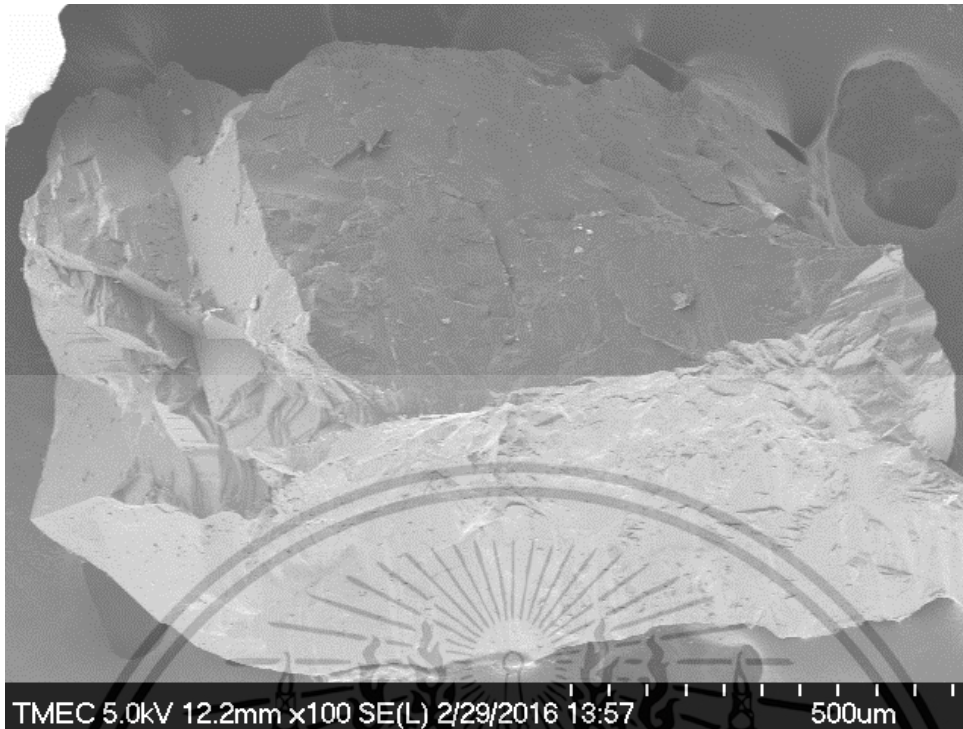
รูปที่ 4.45 ผลึกเพชรขนาด 1210 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 156 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 ผลึกเพชรขนาด 1250 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 180 ชั่วโมง จาก SEM



รูปที่ 4.47 ผลึกเพชรขนาด 1250 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 180 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



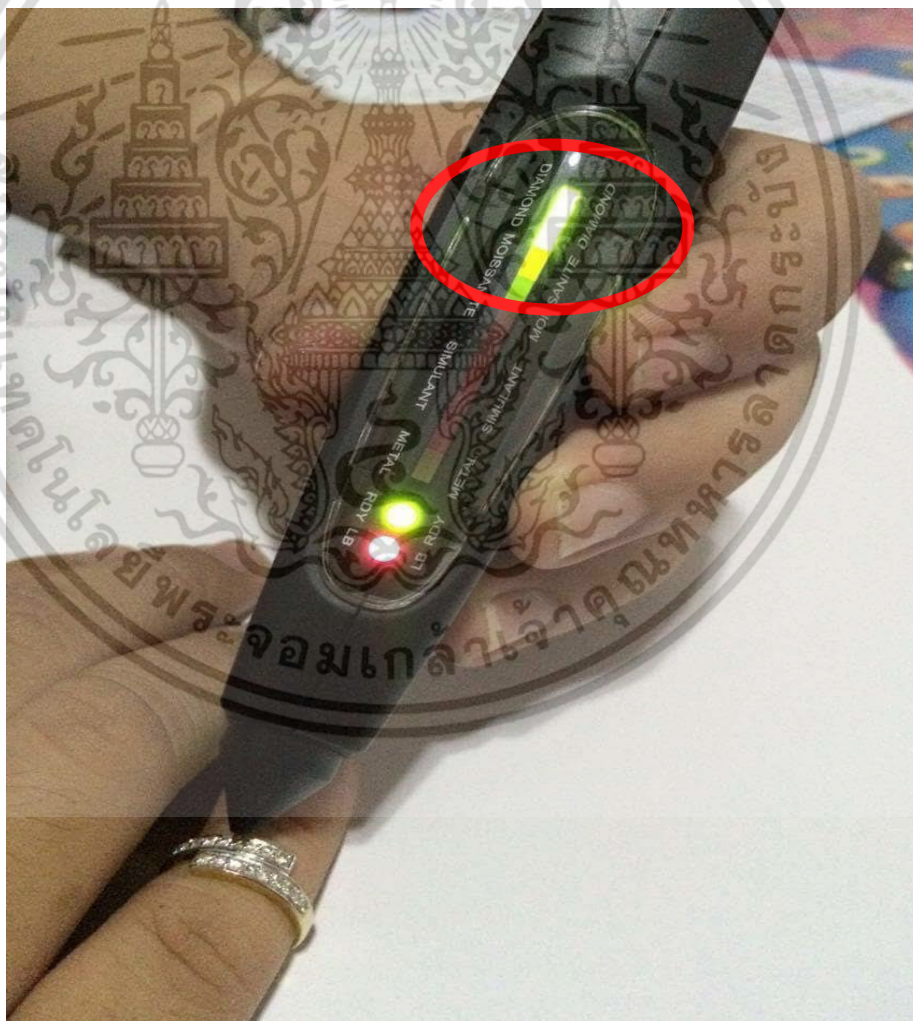
รูปที่ 4.48 ผลึกเพชรขนาด 1260 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 192 ชั่วโมง จาก SEM



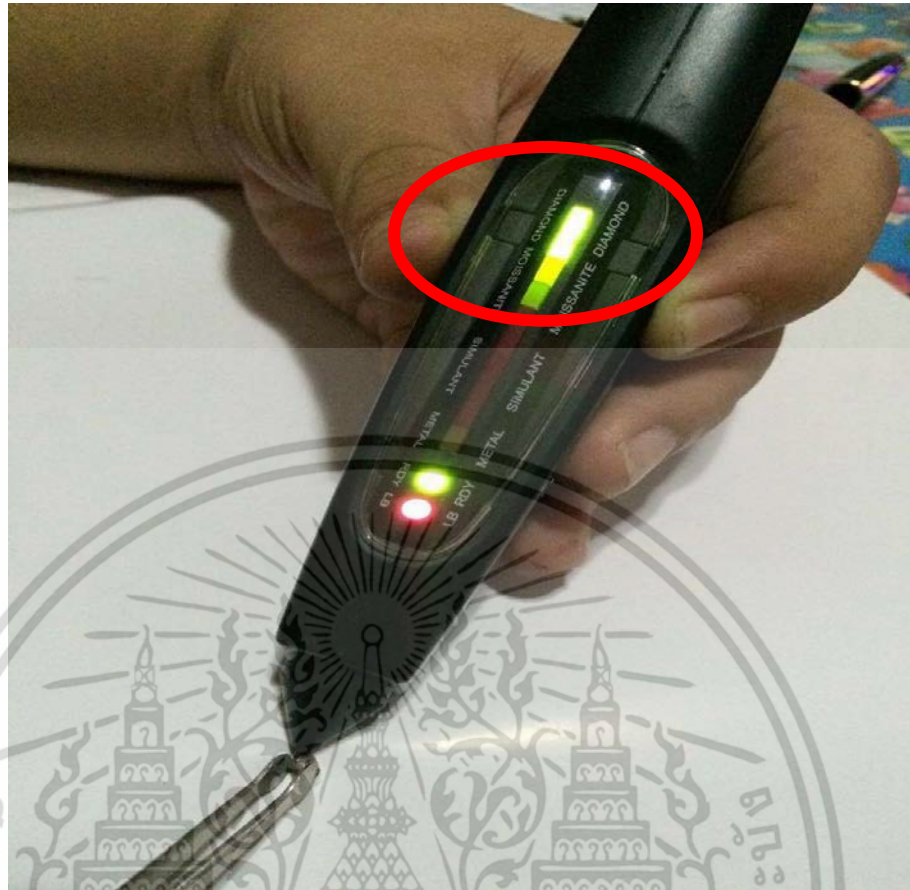
รูปที่ 4.49 ผลึกเพชรขนาด 1260 μm ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 192 ชั่วโมง ดิจิตอลเวอร์เนียร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลอง ได้มีการปรับปรุงคุณภาพของผลึกไปด้วยขณะทำการทดลองที่เวลา 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 9 นาที เนื่องจากผลึกเพชรขณะทำการสังเคราะห์นั้นมีความหนาที่ต่ำมาก จึงต้องทำการแอนนیلเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพื่อเพิ่มอัตราการโต และการทดลองนี้ ได้ทำการทดลองเป็นระยะเวลารวมทั้งหมด 192 ชั่วโมง ได้ผลึกเพชรขนาดใหญ่ ถึง 1260 μm

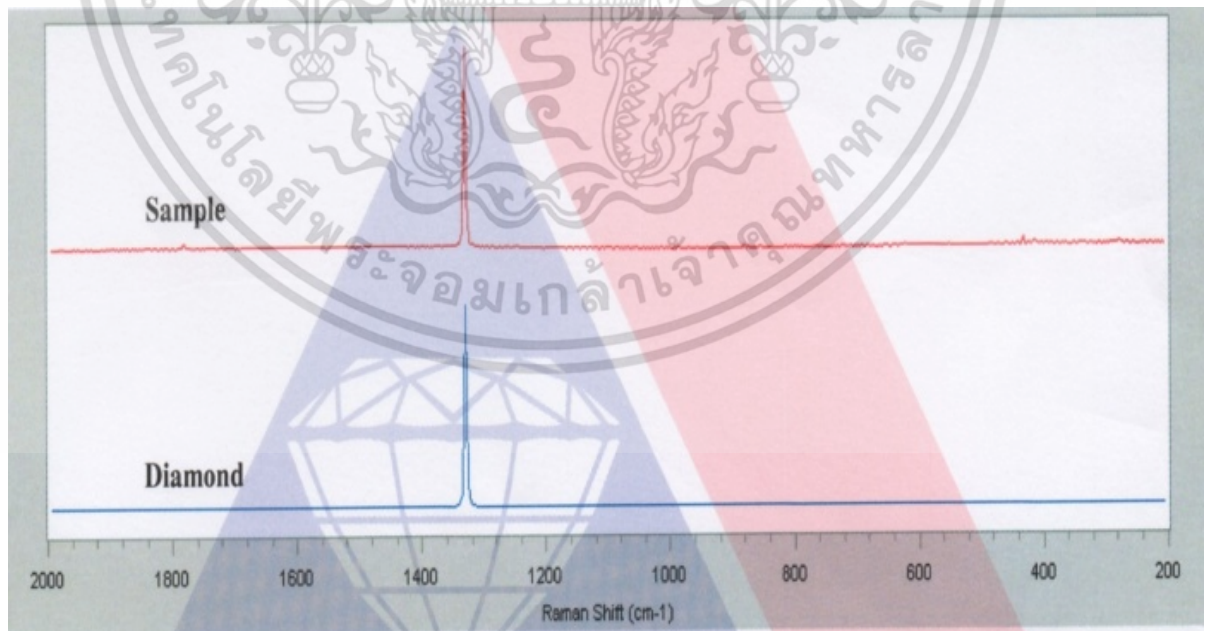
จากนั้นนำไปทำการตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลึกเพชรธรรมชาติโดยทำการตรวจสอบแหวนเพชร ด้วยเครื่อง Diamond Tester รุ่น Multi III นั้นพบว่า เมื่อทำการตรวจเพชรธรรมชาติ เครื่อง Diamond Tester จะแสดงไฟในแถบสีเขียว ดังรูปที่ และเมื่อทำการตรวจสอบเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ ก็พบว่าแสดงไฟในแถบสีเขียวเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.50 และ รูปที่ 4.51 และเมื่อนำไปวิเคราะห์หาความเป็นผลึกเพชร ด้วย Raman Spectroscope เปรียบเทียบกับเพชรธรรมชาติพบว่า แสดงในจุดยอดของกราฟเดียวกันที่ 1332 cm^{-1} ดังรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.50 ตรวจสอบเพชรธรรมชาติ (แหวนเพชร) ด้วยเครื่อง Diamond Tester รุ่น Multi 3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



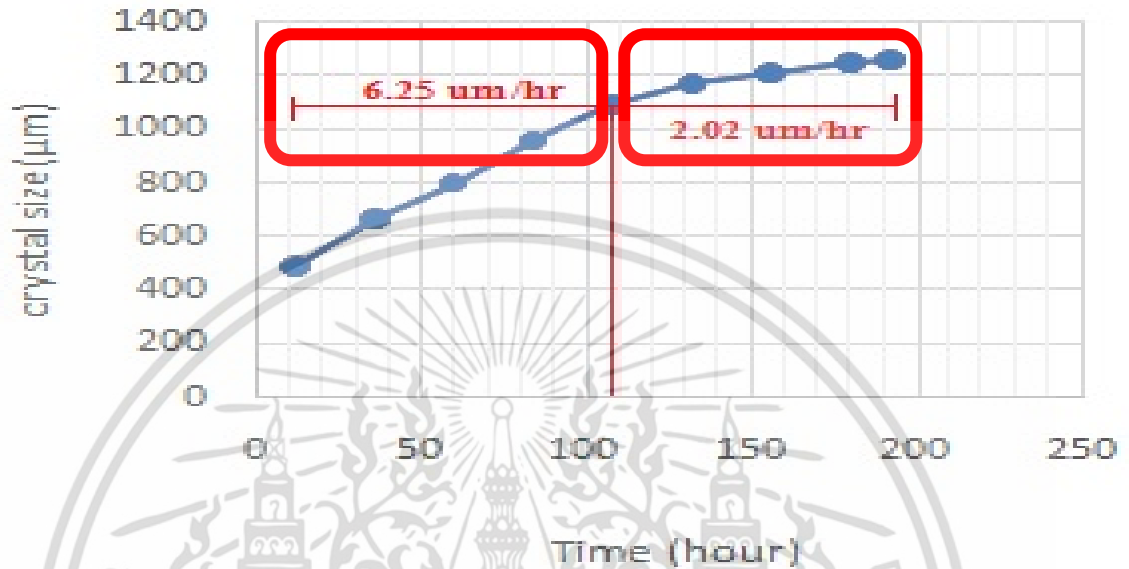
รูปที่ 4.51 ตรวจสอบเพชรธรรมชาติ (แหวนเพชร) ด้วยเครื่อง Diamond Tester รุ่น Multi 3



รูปที่ 4.52 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรที่สังเคราะห์จากการทดลอง เปรียบเทียบกับเพชรธรรมชาติ ด้วย Raman

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

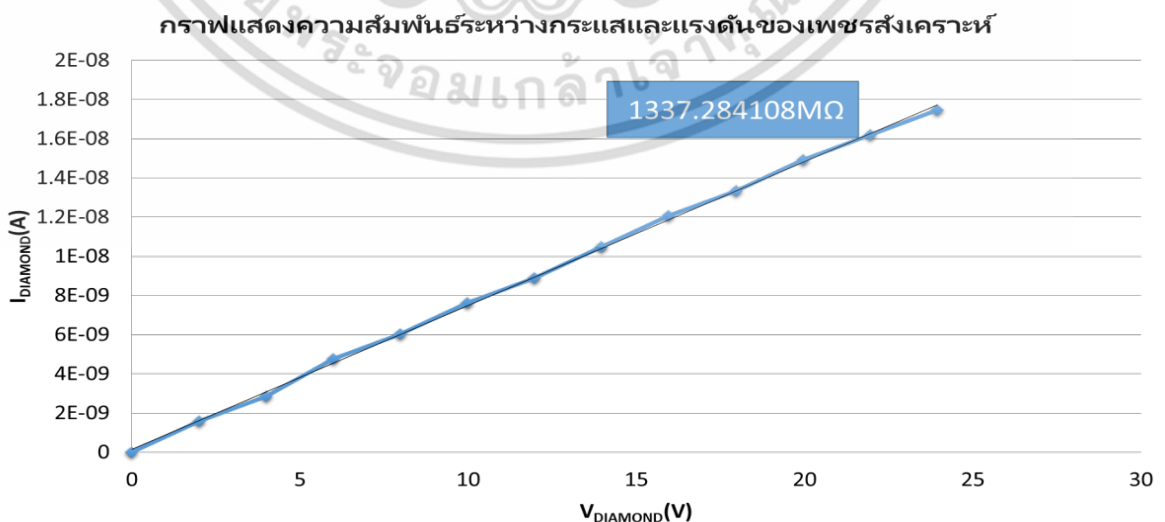
นำผลของขนาดที่ได้จากการวัดขนาดในแต่ละการสังเคราะห์มาแสดงความสัมพันธ์กับเวลาในการสังเคราะห์พบว่า ในช่วง 108 ชั่วโมงแรกนั้นผลึกเพชรมีอัตราการโตที่ 6.25 $\mu\text{m/hr}$ จากนั้นจะลดลงมาที่ 2.02 $\mu\text{m/hr}$ ในช่วงสุดท้ายสิ้นสุดการทดลองที่ 192 ชั่วโมง ดังแสดงใน กราฟที่ 4.1



กราฟที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (μm) กับเวลา (hr)

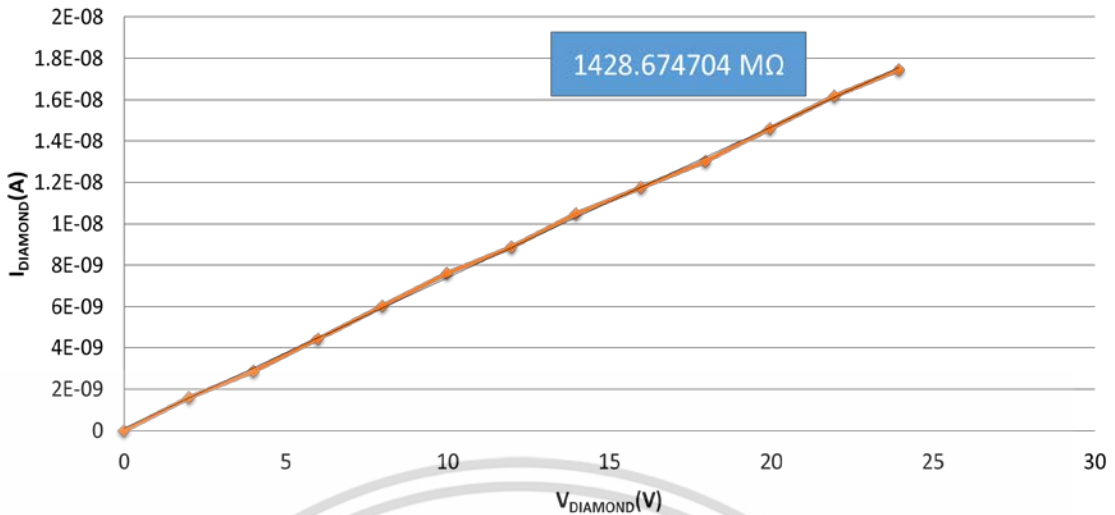
4.7 ผลการทดลองหาคคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันของเพชรสังเคราะห์กับเพชรธรรมชาติ

จากการทดลอง ทำการหาค่ากระแสและแรงดัน ของผลึกเพชรที่สังเคราะห์ กับผลึกเพชรธรรมชาติ พบว่าค่ากระแสและแรงดันแสดงดังกราฟ ที่ 4.2 และ 4.3



กราฟที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ ผลึกเพชรสังเคราะห์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเพชรธรรมชาติ



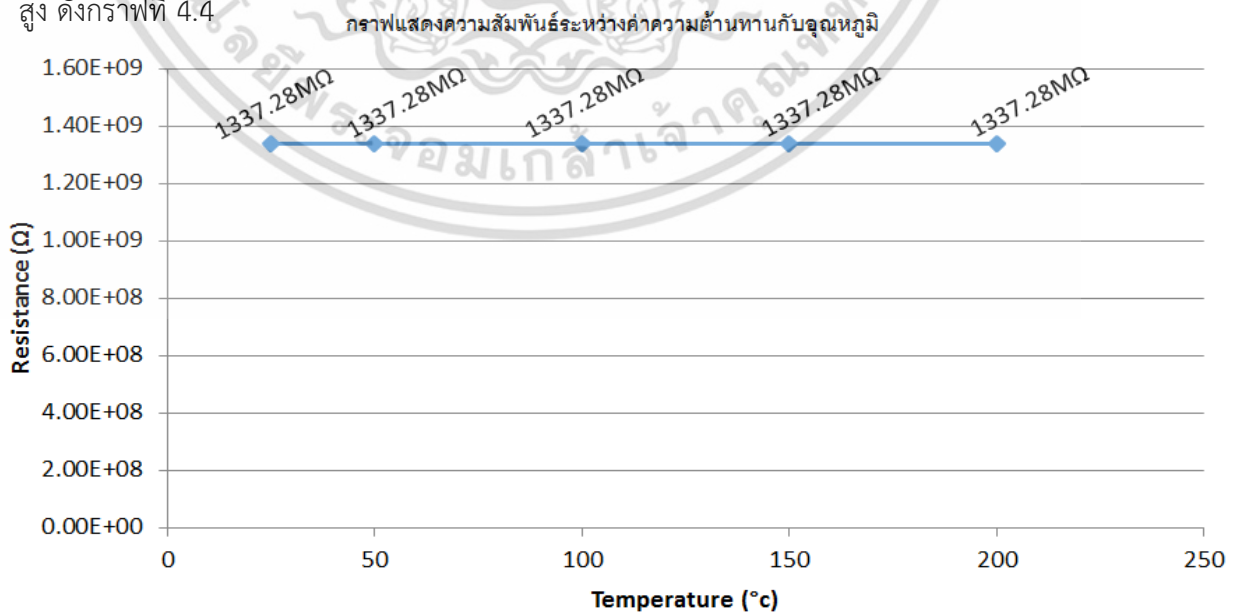
กราฟที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ ผลึกเพชรธรรมชาติ

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่า กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของผลึกเพชรที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์นั้นมี ค่าความต้านทานที่ได้จาก slope ของกราฟ มีค่าเท่ากับ 1337.2841 MΩ และจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของผลึกเพชรที่เกิดขึ้นจากธรรมชาตินั้นมี ค่าความต้านทานที่ได้จาก slope ของกราฟ มีค่าเท่ากับ 1428.6747 MΩ

จะเห็นได้ว่า ผลึกเพชรที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์นั้นมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับผลึกเพชรที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติเป็นอย่างมาก

4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลึกเพชร

เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานจากการให้ความร้อนกับผลึกเพชรด้วย Hot Plate ตั้งแต่ อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ไม่พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน แสดงว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากผลึกเพชรนั้น สามารถทำงานได้ดีในอุณหภูมิสูง ดังกราฟที่ 4.4



กราฟที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ

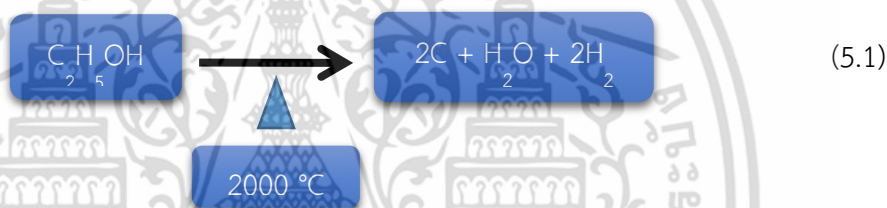
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยเพื่อการศึกษาและพัฒนาระบบการสังเคราะห์ผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ จากวิธี HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ต่างๆได้

การสังเคราะห์ผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ มีการออกแบบชุดการทดลองแบบใหม่ เพื่อให้มีขีดความสามารถในการสังเคราะห์ได้เป็นระยะเวลานาน จนเกิดเป็นผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ ถึง 1.26 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เอทิลแอลกอฮอล์เป็นแหล่งจ่ายอนุภาคมูลคาร์บอนโดยมีแก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาไปทำปฏิกิริยาการแตกตัวทางเคมี ที่บริเวณไส้หลอดนำความร้อน ตามสมการที่ 5.1



ผลึกเพชรหรือโครงสร้างคาร์บอนจะตกลงบนฐานรองซิลิกอนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ 900 องศาเซลเซียส โดยลดอัตราการเกิดจากขอบเขตเกรนของผลึกข้างเคียงได้ โดยใช้ฐานรองซิลิกอนที่มีความหนาแน่นของการเกิดนิวเคลียสและอัตราการโตของผลึกที่แตกต่างกันได้ โดยใช้ฐานรองชนิดแรกทำการเตรียมพื้นผิวเพื่อสังเคราะห์ผลึกเพชรที่สมบูรณ์และโตพอ ที่จะนำไปคัดแยกเพื่อทำการเพิ่มขนาด และปรับปรุงคุณภาพของผลึกต่อไป จากนั้นทำการสังเคราะห์ต่อเพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชรบนฐานรองซิลิกอนชนิดมันแบบธรรมดา ซึ่งฐานรองชนิดที่สองนี้มีการเกิดนิวเคลียสที่ต่ำมาก เพื่อป้องกันผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ไปรบกวนอัตราการโตของผลึกเพชรในสามมิติ จากผลการวิจัยพบว่าในช่วงเวลาการสังเคราะห์แรกถึงช่วงเวลาในการสังเคราะห์ที่ 108 ชั่วโมง มีอัตราการโตที่สูงมาก และช่วงเวลาในการสังเคราะห์ที่มีระยะเวลานานขึ้นจนถึงช่วงระยะเวลาในการสังเคราะห์สุดท้ายที่ 192 ชั่วโมงนั้น พบว่ามีอัตราการโตที่น้อยลงเป็นอย่างมากถึง 3 เท่า ซึ่งเป็นผลมาจากไฮโมอิตีแตกเสียดแต่ยังคงมีขนาดใหญ่เป็นอย่างมาก แม้ว่าผลึกเพชรที่สังเคราะห์จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น แต่คุณภาพของผลึกนั้นก็ยังมีคุณภาพต่ำลง เนื่องจากปริมาณแกรไฟต์ที่สะสมเพิ่มมากขึ้น จากระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่มีระยะเวลานาน จึงต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของผลึกด้วยการแอนนیلที่บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน พบว่าผลึกเพชรนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสูงสุดที่ 1.26 มิลลิเมตร จากระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่นานถึง 192 ชั่วโมง ผลึกเพชรที่ได้นั้นยังมีคุณภาพที่ดี สังเกตจากสเปกตรัมของ Raman ที่มีจุดยอด ณ ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ชัดเจน และผลึกเพชรที่เกิดจากการสังเคราะห์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีผลึกที่สมบูรณ์เป็นผลึกรูปเดี่ยว และยังมีขนาดที่โตพอที่จะนำไปสังเคราะห์ต่อเพื่อทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มขนาดได้ และนอกจากนี้ผลึกเพชรที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ ยังมีคุณสมบัติ ทางไฟฟ้า เทียบเท่ากับเพชรธรรมชาติอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Singh. Semiconductor Devices : an introduction. New York : McGraw-Hill. 1994.
- [2] M. Shur. Phisic of Semiconductor Devices. New Jersey : Prentice-Hall. 1990.
- [3] กอบศักดิ์ ศรีประภา. “การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบ ความร้อน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541.
- [4] รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ศุภเดช “ เซมิคอนดักเตอร์ ดีไวซ์” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- [5] ลัดดาวัลย์ สุภาติ “ การปลูกผลึกเพชรด้วยเทคนิค HFCVD” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544
- [6] บัญชา กิตติรังสี , นริศ จันทรแดง , วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ,ดร. สมเกียรติ ศุภเดช “ผลของอุณหภูมิฐานรองต่อ ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่17, พ.ศ.2537
- [7] รุ่งนภา จิตภักดี , ลัดดาวัลย์ สุภาติ , ดร.อิทธิพล แจ่มชัด , รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “เทคนิคการลดการรบกวนจากผลึกข้างเคียงในการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD.” First National Symposium on GRAD-RESEARCH Chiang Mai University, June 2000.
- [8] ลัดดาวัลย์ สุภาติ , รุ่งนภา จิตภักดี , อิทธิพล แจ่มชัด , วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. การศึกษาการลดจุดบกพร่องของผลึกเพชรระหว่างการสังเคราะห์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น. “วารสารการประชุมทางวิชาการ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 สาขาวิศวกรรมศาสตร์. 2543 หน้า 382-388.
- [9] คชพงศ์ สุมานนท์ , ลัดดาวัลย์ สุภาติ , รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “ผลจากระนาบของซิลิกอนต่อการสังเคราะห์ผลึกเพชรแบบHFCVDให้มีขนาดใหญ่” “วารสารการประชุมทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย.ครั้งที่ 1 , 2543. หน้า 181-184
- [10] นายปิยชาติ สดงาม , นายวศิน ปัญญาเลิศ , วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง “การสร้าง DIAMOND MESFET FABRICATION OF DIAMOND MESFET” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6
- [11] ประภัสสร มีเคลือบ , ปิยชาติ สดงาม , วศิน ปัญญาเลิศ , ชบา สุริยอภรณ์ , วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร , วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง “การสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยวิธีHFCVD SYNTHETIC OF LARGE DIAMOND CRYSTALS BY HFCVD” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8
- [12] พรศักดิ์ อรรถวานิช. วัสดุศาสตร์. พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2536
- [13] Donal A. Neaman. Semiconductor Physics Devices. Illinois : IRWIN. 1992.
- [14] Pat L. Mangomon. The Principles of Materials Selection for Engineering Design. New jersy : Prentice-Hall International, Inc. 1999.
- [15] J.E.Field. The Properties of daimond. London : Academic Press, Inc.1979.

เอกสารนี้ [15] J.E.Field. The Properties of daimond. London : Academic Press, Inc.1979. ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

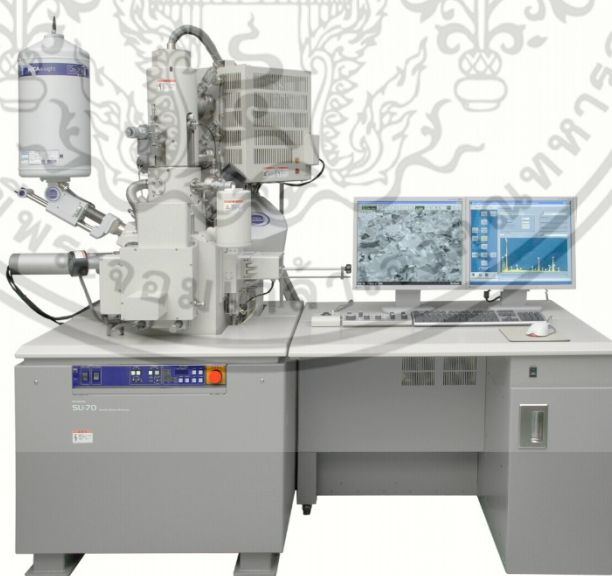


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.



รูปที่ ก-1 เครื่อง Microscope ของ Nikon รุ่น 1500x ติดตั้งประจำอยู่ที่ TMEC



รูปที่ ก-2 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของ Hitachi รุ่น S-4700 ติดตั้ง

อยู่ที่ TMEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 เครื่อง Raman Spectroscopy ของ RENISHAW ติดตั้งประจำอยู่ที่
บริษัท WESTERN DIGITAL



รูปที่ ก-4 เครื่อง Diamond Tester ยี่ห้อ Presidium Multi III

ได้รับความอนุเคราะห์จาก นายมินนา ปัญญาเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] นายปิยชาติ สดงาม นายวศิน ปัญญาเลิศ และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง “การสร้าง DIAMOND MESFET FABRICATION OF DIAMOND MESFET” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล **ครั้งที่ ๖**

6th Electrical Engineering Network 2014
of Rajamangala University of Technology Conference

นวัตกรรมวิจัยแห่งเทคโนโลยี ตอบสนองเออีซีด้านโครงข่ายพลังงาน
Technology Research Innovation for Responding
to the Energy Network of AEC

Volume II

- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

๒๖ - ๒๘ มีนาคม พ.ศ. ๒๕๕๖

ณ มาริไทม์ ปาร์คแอนสปารีสอร์ท จังหวัดกระบี่

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014(EENET 2014)

การสร้าง DIAMOND MESFET
FABRICATION OF DIAMOND MESFET

นายปิยชาติ สดงาม นายวศิน ปัญญาเลิศ และวิศุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1 ซอยคลองกรุง 1 ถ.คลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์: 0-2739-0643 E-mail: kmitlbbk_55@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอเทคนิคในการสร้าง และ คุณสมบัติ ของ Diamond MESFET โดยสร้างชั้นนำไฟฟ้าฟิล์ม เพชรชนิด p บนฟิล์มเพชรชนิดอนินทรีย์ด้วยเทคนิคไฮโดรเจน เอร์มินชัน จากนั้นจึงใช้ทองคำในการสร้าง ขั้ว ขอส กับ เสรน และ ใช้โลหะ อลูมิเนียม ในการสร้าง ขั้ว เสรน จากการศึกษาเปรียบเทียบ การสังเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้าง MESFET พบว่า สามารถทำงานได้ ทั้งใน Depletion-mode และ Enhancement-mode จากผลการทดลองพบว่าMESFET ที่สร้างขึ้นสามารถ ทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 200 °C

คำสำคัญ: MESFET , เพชรชนิด p, เพชรชนิด n, ไฮโดรเจน เอร์มินชัน

Abstract

This paper presents the fabrication technique and properties of Thin film Diamond MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor). The p-type Diamond conductive layer was synthesized on intrinsic Diamond film by Hydrogen termination process. On the layer, two Au-pads were coated for DRAIN and SOURCE electrodes and one Al-pad was coated for GATE electrode. They were found that a suitable synthesis condition of MESFET was capable to operate as Depletion-mode and Enhancement-mode. From the results show that this MESFET can perform the operational stability to 200 °C

Keyword : MESFET , p-type diamond, i-type diamond, Hydrogen termination

1.บทนำ

ในโลกElectronicsปัจจุบัน โครงสร้างMOSFET ได้ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ทาง Electronics อย่างมากมาย โดยใช้ซิลิคอนเป็นวัสดุพื้นฐานซึ่งจำกัดของซิลิคอน คือ มีช่องว่างพลังงาน

เพียง 1.12 eV จึงสามารถใช้งาน ได้ที่ อุณหภูมิไม่ควรมากเกิน 75°C แต่ถ้าใช้งานภายใต้อุณหภูมิสูงๆเช่น ในอุตสาหกรรมพลังงาน Solar Field / Farm จะต้องใช้ระบบระบายความร้อนช่วยทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น จึงมีการเลือกหาวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เช่น เพชร ที่มีช่องว่างพลังงาน 5.5 eV(มากกว่า ซิลิคอนประมาณ 4 เท่า) แทนเพื่อจะสามารถใช้งาน ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าซิลิคอนประมาณ 4 เท่า ในงานวิจัยนี้เราจึงทำการสังเคราะห์เพชรเพื่อใช้งานแทนซิลิคอน และสำหรับส่วนGate จะใช้ Al เป็นรอยสัมผัส Schottky(ระหว่างโลหะกับเพชร) สำหรับ ส่วน Source และส่วน Drain จะใช้ Au เป็นรอยสัมผัส Ohmic ทำให้เราสร้างอุปกรณ์ FET ที่มีสามเกตเป็นรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบ Schottky ซึ่งเรียกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ว่า Diamond MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) [1][2]

2.กระบวนการสร้างและการทดลอง

การสร้าง Diamond MESFET มีกระบวนการอยู่หลาย ขั้นตอน เช่นการเตรียมฐานรอง กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร เป็นต้น

2.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

นำแผ่นซิลิคอนชนิดพี หนา 100 ไมล์มในอะซิโตนเพื่อทำความสะอาดเบื้องต้น จากนั้นจึงใช้ครีมเพชรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมโครเมตร ขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนให้เกิดเป็นรูพรอย เพื่อเป็นการกระตุ้นฐานรองซิลิคอนให้มีความหนาแน่นของการเกิดกรณาคาร์บอนเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรเร็วขึ้น หลังจากนั้นจึงทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนอีกครั้งด้วยน้ำบริสุทธิ์(Deionization Water) แล้วป้อนให้ด้วยก๊าซไนโตรเจน

2.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร [3]

ในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยใช้วิธี Chemical Vapor Deposition แบบ Hot-Filament (HFCVD) ดังแสดงด้วยชุดเครื่องมือในรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014(EENET 2014)



รูปที่ 1 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

โดยจะมีโคเลกเตอร์ของระบบ CVD ที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 2 เริ่มจากเปิดวาล์วที่ 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านเข้าไปใน Chamber 15 นาที เพื่อให้บรรยากาศภายใน Chamber เป็น H₂ จากนั้นเปิดวาล์วที่ 1 แล้วปิดวาล์วที่ 2 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวพาไอระเหยของแก๊สออกซิเจนเข้า Chamber ด้วยอัตราการไหลคงที่ 10 sccm. จ่ายกระแสให้กับไส้หลอดเพื่อเพิ่มอุณหภูมิไส้หลอดให้ได้เป็น 2000°C... (text continues)



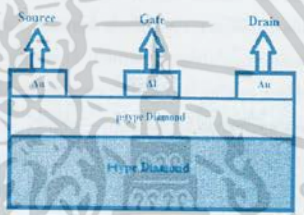
รูปที่ 2 แผนผังระบบ HFCVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร

2.3 กระบวนการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้า P-Type Diamond

ในขั้นตอนนี้เป็นการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้า โดยไม่มีการเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่นๆเลย... (text continues)

2.4 กระบวนการสร้าง Diamond MEFET

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆ และทำการสร้างกระจกต้นแบบเสร็จแล้ว นำแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างฟิล์ม... (text continues)

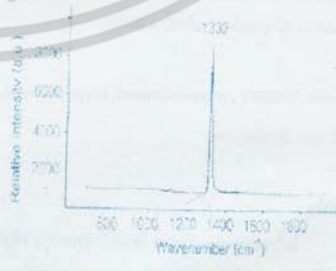


รูปที่ 3 ภาพตัดขวางโมเดลสร้าง Diamond MEFET

ลักษณะโครงสร้างของ MEFET ที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่แสดงดังรูปที่ 3 ส่วนของ เคมและจอกซ์ จะใช้โลหะ Au เพื่อให้เกิดเป็น Ohmic Contact... (text continues)

3.ผลการทดลอง

3.1 ผลการตรวจคุณสมบัติของชั้นความนำไฟฟ้า... (text continues)



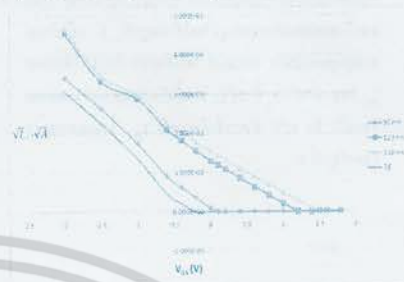
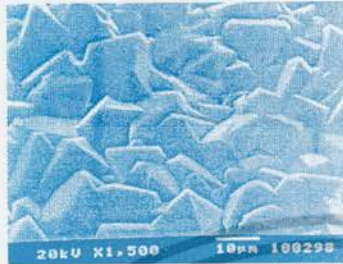
(ก)ผลการวัดคุณสมบัติด้วยวิธี Raman Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)



(ข) ภาพผิวหน้าชิ้นงานที่ถ่ายจาก SEM

รูปที่ 4 ผลการตรวจสอบผิวหน้าชิ้นงาน

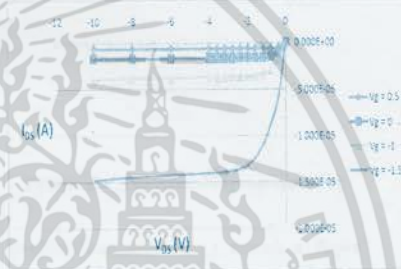
จากภาพรูปที่ 4 (บน) จะเห็นได้ว่าค่าของพื้นที่ที่ได้จาก Raman Spectrum มีค่า 1332 cm^2 เมื่อเทียบกับค่าของมาตรฐานของ Raman Spectrum (รูป 1) ได้ว่าเป็นโครงสร้างของพอร์ซิมอง จากรูปที่ 4 (ข) คือผลการตรวจสอบผิวหน้าชิ้นงานด้วย SEM จะเห็นได้ว่า เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่เชื่อมเป็นส่วนใหญ่ จึงสรุปได้ว่าเป็นพื้นที่ของผลึกเดี่ยวที่มีขนาด (100)

3.2 ความหนาแน่นของไอออนที่มีผลต่อแรงดันขั้วกริม MESFET [41]

โดยจะใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์ชิ้นงานที่ทำที่อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดคือที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 นาที, 600°C เป็นเวลา 5 นาที, 600°C เป็นเวลา 10 นาที, 600°C เป็นเวลา 15 นาที และ 700°C เป็นเวลา 15 นาที

จากนั้นทำการสร้าง MESFET โดยขนาดความกว้างและยาวของช่องทางเดินกระแสที่ 200 μm และ 20 μm ตามลำดับ แล้วทำการทดสอบแรงดันขั้วกริมและความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} กับแรงดัน V_{GS} โดยใช้วงจรรูปที่ 5 ซึ่งผลการวัดแสดงได้ดังรูปที่ 6 รูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ และสรุปเป็นตาราง ดังตารางที่ 1

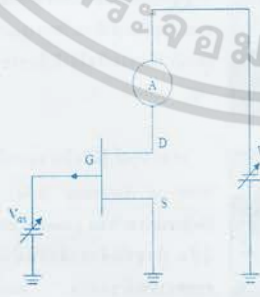
รูปที่ 6 กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ (\sqrt{A}) กับ V_{GS} (V)



รูปที่ 7 กราฟกระแสกับแรงดันที่ทำงานแบบ Depletion-mode



รูปที่ 8 กราฟกระแสกับแรงดันที่ทำงานแบบ Enhancement-mode



รูปที่ 5 วงจรที่ใช้ในการวัดค่า V_T

ตารางที่ 1 แสดง Carrier Concentration กับ V_T ในแต่ละ condition

Condition	Carrier Concentration (cm^{-3})	V_T (V)
500°C เวลา 3 นาที	5.39×10^{15}	-0.4
600°C เวลา 5 นาที	6.05×10^{16}	0.6
600°C เวลา 10 นาที	7.88×10^{16}	1.5
600°C เวลา 15 นาที	1.11×10^{17}	2.6
700°C เวลา 15 นาที	1.83×10^{17}	6.0

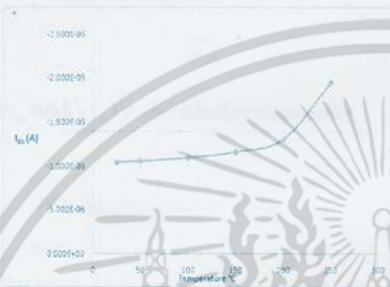
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014(EENET 2014)

จากนั้นทดสอบผลของอุณหภูมิโดยใช้วงจรรูปที่ 5 แล้วทำการควบคุมอุณหภูมิของ MESFET โดยใช้เตาอบ เริ่มปรับให้กระแส I_{DS} โหลด 1×10^{-4} A ที่ 30°C จากนั้นจึงปรับอุณหภูมิของเตาอบจาก 30°C ถึง 50°C ทำการวัดค่ากระแส I_{DS} ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่ากระแส I_{DS} ของ MESFET

จากรูปที่ 9 ค่ากระแส I_{DS} มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิค่าต่ำกว่า 200°C แต่ถึงกับอุณหภูมิขึ้นไปถึงจะเห็นว่าค่ากระแส I_{DS} จะเพิ่มอย่างรวดเร็ว แสดงว่า MESFET ที่สร้างขึ้นจะมีเสถียรภาพของการทำงานจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 200°C นั่นเอง

4.สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร โดยการพัฒนาเป็น MESFET เมื่อใช้เทคนิค Ti-Termination จะสามารถเปลี่ยนเพชรชนิด i-type เป็น p-type สำหรับความหนาแน่นของไอโซนเพชรชนิด p-type จะถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิและเวลาในการแกลนัล โดยพิจารณาในรูปของความหนาแน่นของฟิล์มไอโซความหนาแน่นที่ได้จะอยู่ในช่วง $76 - 151\text{nm}$ ส่วนค่าความหนาแน่นของไอโซที่ได้ จะมีค่าในช่วง $5.39 \times 10^{18} - 1.83 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ จากนั้นทำการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่มของ MESFET ที่สร้างขึ้นซึ่งจากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 พบว่ามีการทำงานได้ 2 โหมด คือ Depletion-mode กับ Enhancement-mode เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่ามีความหนาแน่น 76 nm เป็นพื้นที่แสดงคุณสมบัติของ Enhancement-mode นอกนั้น จะทำงานแบบ Depletion-mode นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MESFET ที่อุณหภูมิสูง พบว่า สามารถทำงาน ได้อย่างมีเสถียรภาพจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 200°C

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณพนักงาน TMEC ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy และ SEM ในครั้งนี้จนกระทั่งประสบผลสำเร็จได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Singh. Semiconductor Devices : an introduction. New York : McGraw-Hill. 1994.
- [2] M. Shur. Phisic of Semiconductor Devices. New Jersey : Prentice-Hall. 1990.
- [3] ถอบศักดิ์ ศรีประภา. “การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบ ความร้อน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2541.
- [4] รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภเกียรติ สุภคช “ เจริญกลอนคัลเลอร์ ดีไวซ์” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ประวัติผู้เขียน



นายอัครเดช สดงาม จบการศึกษาระดับปริญญาตรีคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



นายวศิน มีบุญเลิศ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



รศ.ดร.วิสุทธิ์ วิฑูริ่งเรื่อง จบการศึกษา Doctor of Engineering (Solid State Electronics) จาก Tokai University ประเทศญี่ปุ่น มีจตุมนต์ดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปิยชาติ สดงาม
วัน เดือน ปีเกิด	1 พฤศจิกายน 2531 ที่จังหวัดสิงห์บุรี
ที่อยู่	6 หมู่ 6 ตำบลน้ำตาล อำเภออินทร์บุรี จังหวัดสิงห์บุรี 16110
ประวัติการศึกษา	2553 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2.) HFCVD 3.) MESFET

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] นายปิยชาติ สดงาม นายวศิน ปัญญาเลิศ และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง “การสร้าง DIAMOND MESFET FABRICATION OF DIAMOND MESFET” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6