

การศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด P ขนาดใหญ่
ด้วยวิธี HFCVD โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน

THE STUDY AND DEVELOPMENT OF HFCVD PROCESS FOR LARGE
P-TYPE DIAMOND SYNTHESIS BY BORON ADDITION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-043-048

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด P ขนาดใหญ่
ด้วยวิธี HFCVD โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน

THE STUDY AND DEVELOPMENT OF HFCVD PROCESS FOR LARGE
P-TYPE DIAMOND SYNTHESIS BY BORON ADDITION



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **148781**
วันเดือนปี **23 11 2560**

b. 00267079
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-043-048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY AND DEVELOPMENT OF HFCVD PROCESS FOR LARGE
P-TYPE DIAMOND SYNTHESIS BY BORON ADDITION



PRAPASSORN MEEKLUAB

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
2017

KMITL-2017-EN-M-043-048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด P ขนาดใหญ่ ด้วยวิธี HFCVD โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน

Thesis Title The Study and Development of HFCVD Process for Large P-type Diamond Synthesis by Boron Addition

นักศึกษา นางสาวประภัสสร มีเคลือบ

รหัสประจำตัว 58601173

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-043-048

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.อัมพร โปธิโย	
รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ	
ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ	
ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 08.00-10.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด P
ขนาดใหญ่ ด้วยวิธี HFCVD โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน

นักศึกษา

นางสาว ประภัสสร มีเคลือบ

รหัสนักศึกษา

58601173

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร
ชนิดพี (p-type diamond) ขนาดใหญ่ ด้วยวิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition
(HFCVD) โดยการเติมโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) ลงในเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ทำให้ผลึกเพชรที่
สังเคราะห์มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบ ผลึกเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์
ขึ้น กับผลึกเพชรชนิดอินทรีนซิคซึ่งสังเคราะห์ขึ้นพร้อมกัน ผลการวิจัยพบว่าผลึกเพชรชนิดอินทรีนซิค
ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 180 ชั่วโมง และมีการแอนนัลในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็น
เวลา 12 นาที ทุกๆการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง จะได้ผลึกเพชรขนาด 1.498 มิลลิเมตร และมีค่าความ
ต้านทาน $1.428 \text{ G}\Omega$ ผลึกเพชรชนิดพีที่ใช้แหล่งจ่ายเอทิลแอลกอฮอล์ผสมโบรอนไตรออกไซด์ ใน
อัตราส่วน B : C เป็น 50,000 ppm จะได้ผลึกเพชรขนาด 1.568 มิลลิเมตร และมีค่าความต้านทาน
เพียง $4.909 \text{ k}\Omega$ ในการนี้ได้ทดสอบยืนยันว่าเป็นผลึกเพชรชนิดพีด้วย เทคนิค Raman
spectroscopy และ Hot Probe

Thesis Title	THE STUDY AND DEVELOPMENT OF HFCVD PROCESS FOR LARGE P-TYPE DIAMOND SYNTHESIS BY BORON ADDITION
Student	MISS PRAPASSORN MEEKLUAB
Student ID	58601173
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. WISUT TITIROONGRUANG

ABSTRACT

This thesis presents the study and development of Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) process for large p-type diamond synthesis process by addition of boron trioxide (B_2O_3) in ethyl alcohol (C_2H_5OH). The synthetic diamond has better electrical conductivity. In this research, the synthetic p-type diamond is compared to the intrinsic diamond synthesised at the same time. It was found that the intrinsic diamond that used synthesis time of 180 hours with annealing under hydrogen (H_2) atmosphere of 12 minutes for every synthesis time of 60 hours, diamond of 1.498 millimetre and resistance of 1.428 $G\Omega$ was obtained. P-type diamond from ethyl alcohol with boron trioxide at B : C ratio of 50,000 ppm, diamond of 1.568 millimetre and resistance of only 4.909 $k\Omega$ was achieved. The diamond was confirmed to be p-type diamond using Raman spectroscopy and Hot Probe.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้อบรมสั่งสอน ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียนและการดำเนินชีวิตจนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ 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 รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้แก่ศิษย์ทุกคน

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

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

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆและรุ่นน้องในศูนย์วิจัย ERC ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ นายรักเกียรติ มีเคลือบผู้เป็นบิดาและนางประไพร มีเคลือบผู้เป็นมารดา ที่ทุ่มเทแรงกายแรงใจ สนับสนุนข้าพเจ้าทั้งในด้านการเรียน และให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คุณอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

ประภัสสร มีเคลือบ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อ	XI
รายการสัญลักษณ์	XII
รายการคำศัพท์เทคนิค	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 การสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง	2
1.3 เทคโนโลยีต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำในปัจจุบัน	5
1.3.1 การสร้างด้วยวิธี Hot filament activation	6
1.3.2 การสร้างโดยวิธี Plasma activation	7
1.3.3 การสร้างด้วยวิธี electron Cyclotron Resonance (ECR)	8
1.3.4 การสร้างด้วยวิธี Plasma torch	8
1.3.5 การสร้างด้วยวิธี combustion activation	9
1.4 การประยุกต์ใช้งาน	11
บทที่ 2 ทฤษฎี	13
2.1 เพชรธรรมชาติ	13
2.2 สมดุลยภาพของคาร์บอน	13
2.3 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชรเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น	16
2.4 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน	17
2.4.1 กระบวนการของแก๊สเฟส	19
2.4.2 ปฏิกิริยาที่ใส่หลอด	20
2.4.3 ผลของอุณหภูมิฐานรอง	20
2.4.4 บทบาทของแก๊สไฮโดรเจน	20
2.4.5 บทบาทของแก๊สออกซิเจน	21
2.5 ปรากฏการณ์นิวคลีเอชัน	21
2.6 กระบวนการโต	23
2.7 ความบกพร่องของผลึก	25
2.7.1 ทวิน	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงไว้ในเว็บไซต์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.2 ความบกพร่องแบบจุด (Point defect).....	27
2.7.3 Non-diamond carbon phases.....	28
2.7.4 ความบกพร่องอื่นๆ.....	28
2.7.4.1 ขอบของเกรน (Grain boundaries).....	28
2.7.4.2 พื้นผิวและรอยต่อ (Surface and interface).....	28
2.8 การแอนนีสล (Annealing).....	29
2.9 ระดับพลังงาน.....	30
2.10 สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และ พี.....	32
2.10.1 สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น.....	32
2.10.2 สารกึ่งตัวนำชนิด พี.....	33
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและวิธีการทดลอง.....	34
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง.....	34
3.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิกอน.....	34
3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรและกรีดผิวหน้า ให้เป็นตารางด้วยเพชรตัดกระฉก กับฐานรองซิลิกอนขัดมันธรรมดา.....	35
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร.....	36
3.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด อินทรีนซิค.....	36
3.2.2 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด P.....	39
3.3 การทดลองสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดอินทรีนซิค และผลึกเพชรชนิด P.....	41
3.3.1 การสังเคราะห์เพื่อให้เกิดผลึกเพชรด้วยระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง.....	41
3.3.2 การทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพชรด้วยวิธีแอนนีสล.....	41
3.3.3 การทดลองเพื่อเพิ่มขนาดของผลึก.....	41
3.4 การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชร ด้วยวิธี Hot Probe.....	42
3.5 การทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	42
3.6 การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลึกเพชรชนิด P.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	45
4.1 ฐานรองซิลิกอน.....	45
4.1.1 ฐานรองซิลิกอนแบบเตรียมผิวหน้า.....	45
4.1.2 ฐานรองซิลิแบบขัดมัน.....	46
4.2 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพชรชนิดอินทรีนซิคและเพชรชนิด P.....	46
4.2.1 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพชรชนิด อินทรีนซิค.....	46
4.2.2 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพชรชนิด P.....	50
4.3 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพื่อให้เกิดผลึกเพชรอินทรีนซิค และผลึกเพชรชนิด P ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพื่อให้เกิดผลึกเพชรชนิด อินทรีนซิค ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง.....	52
4.4 ผลการทดลองเพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชรชนิด อินทรีนซิค และผลึกเพชรชนิด P.....	55
4.5 ผลการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอน (B ₂ O ₃) ด้วยวิธี Hot Probe.....	60
4.6 ผลการทดลองหาคคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันของผลึกเพชร ชนิด อินทรีนซิค กับผลึกเพชรชนิด P.....	61
4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลึกเพชรชนิด P.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	70
ภาคผนวก ค.....	73
ประวัติผู้เขียน.....	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. แสดงตัวอย่างการนำคุณสมบัติของเพชรไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆในปัจจุบัน.....	11
2. แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของเพชรเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน.....	16
3. ชนิดของฐานรองเมื่อแบ่งตามการฟอร์มตัวของชั้นอินเทอร์มิเดียท.....	23
4. ตารางแสดงธาตุเชิงปริมาณระหว่างคาร์บอนกับโบรอนจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง.....	50
5. ตารางแสดงธาตุเชิงปริมาณระหว่างคาร์บอนกับโบรอนจากการสังเคราะห์ 180 ชั่วโมง.....	59
6. แสดงน้ำหนักโบรอนที่ตรึงออกไซด์ที่ค่า B/C ต่างๆที่เตรียมเอทิลแอลกอฮอล์ 50 ลบ.ซม.	72



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1. แสดงเครื่องมือความดันสูงที่ใช้ในการสร้าง (a) เกล็ดเพชร (b) ผลึกเพชรเดี่ยว.....	3
2. แสดงผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้ที่ความดันสูง.....	3
3. แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเพชรที่สร้างที่ความดันสูง (C= cube, D= dodecahedron, O= octahedron).....	4
4. แสดงเครื่องสังเคราะห์เพชรแบบอัญมณีและความดันสูง โดยตรง ของ National Institute for Research Material (NIRIM).....	4
5. แสดงไดอะแกรมของระบบที่ใช้วิธี Hot filament activation.....	6
6. แสดงไดอะแกรมของระบบ microwave plasma activation.....	7
7. แสดงไดอะแกรมของระบบ ECR.....	8
8. แสดงไดอะแกรมการสร้างวิธี DC arc jet.....	9
9. แสดงไดอะแกรมบริเวณที่เกิดฟิล์มเพชรจากเปลวไฟของระบบ Combustion activation CVD..	10
10. แสดงไดอะแกรมการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation.....	10
11. แสดงการประยุกต์นำฟิล์มเพชรไปใช้งาน เช่น เคลือบเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ เพื่อป้องกันการสึกกร่อน.....	12
12. แสดงการนำฟิล์มเพชรไปใช้งานโดยการเคลือบกับใบมีดสำหรับตัดวัสดุที่มีความแข็ง.....	12
13. แสดงโครงสร้างของเพชร.....	13
14. แสดงโครงสร้างของกราฟไฟท์.....	14
15. เปรียบเทียบโครงสร้างของเพชร (111) และกราฟไฟท์ (0001).....	14
16. แสดงแผนภาพสมดุลภาคของคาร์บอน.....	15
17. แสดงระบบ CVD แบบความร้อน.....	18
18. แสดงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ CVD ของเพชร.....	19
19. กลไกการนิวคลิเอชันและการเกิดชั้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง.....	22
20. แบบจำลองการก่อตัวของไอเคมีของเพชรซึ่งจะก่อตัวเป็นคาร์บอน sp ² หรือ sp ³	24
21. แสดงลักษณะความบกพร่องแบบทวิน.....	26
22. แสดงลักษณะของ Dislocation (a) Screw dislocation (b) Edge dislocation (c) Mixed dislocation.....	27
23. ลักษณะความบกพร่องแบบจุดชนิดต่างๆ.....	28
24. สภาวะ Recovery (a) การจัดเรียงตัวของเกรนเริ่มต้น (b) ระหว่าง Recovery.....	29
25. แสดงวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ละชั้น และ แถบพลังงาน.....	30
26. แสดงแถบพลังงานของ a) ฉนวน b) สารกึ่งตัวนำ c) ตัวนำ.....	31
27. แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่าง อะตอมสารเจือชนิด เอ็น และอะตอมสารกึ่งตัวนำ.....	32
28. แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่าง อะตอมสารเจือชนิด พี และอะตอมสารกึ่งตัวนำ.....	33
29. รูปครีမ်เพชร.....	35
30. รูปตัวตัดกระจก.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
31. รูประบบHFCVD อย่างง่าย.....	37
32. สารเจือโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3).....	39
33. เครื่องซึ่งสารแสดงน้ำหนักของโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3).....	39
34. เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร.....	40
35. เครื่องกวนสารเคมีแท่งกวนแม่เหล็ก.....	40
36. แสดงอุปกรณ์การหาชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชร.....	42
37. ผลึกเพชรที่ทำการต่อขั้วไฟฟ้า.....	43
38. วงจรการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน.....	43
39. แผ่นซิลิกอนแบบเตรียมผิวหน้า.....	45
40. แผ่นซิลิกอนแบบขัดมัน.....	46
41. พิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีส 9 นาที จากSEM.....	47
42. พิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีส 9 นาที จากSEM.....	47
43. พิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีส 12 นาที จากSEM.....	48
44. พิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีส 12 นาที จากSEM.....	49
45. พิล์มเพชรชนิด P จากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีส 12 นาที จาก SEM.....	51
46. การก่อตัวของอะตอมคาร์บอนในรูปของผลึกบนแผ่นซิลิกอนแบบเตรียมผิวหน้าแบบตาราง.....	52
47. การก่อตัวของอะตอมคาร์บอนและโบรอนในรูปของผลึกบนแผ่นซิลิกอนแบบเตรียมผิวหน้าแบบตาราง.....	53
48. ลักษณะของผลึกเพชรที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 60 ชั่วโมงจากการวิเคราะห์ด้วย SEM.....	54
49. ลักษณะของผลึกเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 60 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM.....	54
50. ลักษณะของผลึกเพชรที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 120 ชั่วโมงจากการวิเคราะห์ด้วย SEM.....	55
51. ลักษณะของผลึกเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 120 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM.....	56
52. ลักษณะของผลึกเพชรที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 180 ชั่วโมงจากการวิเคราะห์ด้วย SEM.....	57
53 ลักษณะของผลึกเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 180 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM.....	57
54. เข็มของกัลวานอ์มิเตอร์ ซีไปยังด้านบวก.....	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-1 เครื่อง Microscope ของ Nikon รุ่น 1500x ติดตั้งประจำอยู่ที่ TMEC.....	68
ก-2 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของ Hitachi รุ่น S-4700 ติดตั้ง อยู่ที่ TMEC.....	68
ก-3 เครื่อง Raman Spectroscopy ของ RENISHAW ติดตั้งประจำอยู่ที่ บริษัท WESTERN DIGITAL.....	69
ก-4 เครื่อง Daimond Tester ยี่ห้อ Presidium Multi III.....	69



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	ฐานรองซิลิคอนโพลต์ิ่งโซน
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	คลื่นความถี่ย่านวิทยุ
Si	Silicon	ซิลิคอน
s	Second	วินาที
TMEC	Thai Microelectronics Center	ศูนย์เทคโนโลยีไมโคร
อิเล็กทรอนิกส์		
µm	Micrometer	ไมโครเมตร

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	ค่ากระแสอิมิตวย้อนกลับ
I_F	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสตรง
I_{MS}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ
I_R	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสย้อนกลับ
I_s	คือ	ค่ากระแสอิมิตวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส
I_{SM}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ
I_p	คือ	กระแสแสง
I_c	คือ	กระแสคอนดัคเตอร์
I_d	คือ	กระแสไฟโตะไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

J	คือ	ความหนาแน่นกระแส
k	คือ	ค่าคงที่โบสตันน์
kV	คือ	พลังงานรังสีเอกซ์
mA	คือ	กระแสที่ถูกป้อนให้หัวจ่ายรังสีเอกซ์
n	คือ	แฟกเตอร์อุคมคติ
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	ความสูงกำแพงศักย์ชนิดตติย
ϕ_M	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_S	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กรดปิรันยา	Piranha
กระบวนการดูดกลืนแสง	Absorption process
กระบวนการสปัตเตอร์ริง	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	Penetrarion
การไบอัสไปข้างหน้า	Forward bias
การไบอัสย้อนกลับ	Reverse bias
การพังทลายแบบบอวาแลนซ์	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
ตัวตรวจจับแสง	Photodetectors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XIV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
ไตรโคลอเอทิลีน	Trichloroethylene
แถบนำไฟฟ้า	Conduction band
แถบวาเลนซ์	Valence band
เนื้อสารกึ่งตัวนำ	Bulk
น้ำยาขึ้นลวดลาย	Developer
น้ำยาไวแสง	Photoresist
เข้าหลอมสาร	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
เรกติไฟเออร์	Rectifier
แรงดันพังทลาย	Breakdown voltage
รอยสัมผัสขั้วต่อตักกี	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 ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง
สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง
สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค
สารเจือระดับลึก
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
สัมประสิทธิ์การแพร่
ศูนย์กลางการดักจับ
ศูนย์กลางการรวมตัว
ศูนย์กลางการเกิดพาหะ
อบแผ่นครั้งแรก
อะซิโตน
อายุการรวมตัวของพาหะ
อายุการเกิดของพาหะ
อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
อัลตราโซนิก
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

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

เป็นที่ทราบกันดีว่า เพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงที่สุด และมีความยืดหยุ่นน้อยที่สุด เป็นตัวนำความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น และมีความโปร่งแสงที่สุดเมื่อเพชรปราศจากรอยตำหนิ และสารเจือ จากตัวอย่างคุณสมบัติของเพชรเหล่านี้ บรรดานักวิจัยได้สนใจนำคุณสมบัติที่สุดยอดของเพชรพัฒนาเป็นเทคโนโลยีที่เป็นประโยชน์ ซึ่งเรื่องราวต่างๆเกี่ยวกับการสร้างเพชรและการนำเพชรมาประยุกต์ใช้งาน สามารถลำดับเหตุการณ์โดยย่อ ดังนี้

ราวศตวรรษที่ 18 Antoine Laurent Lavoisier ได้ค้นพบเพชรเป็นรูปผลึกของคาร์บอน นักทดลองได้พยายามสังเคราะห์เพชรนั้น ซึ่งผู้ประสบความสำเร็จเป็นคนแรก คือ William G. Eversole แห่ง Union Carbide [1]

ในปี 1952 ได้มีการสร้างเมล็ดผลึกเพชรจาก คาร์บอนโมนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดันปานกลาง ความพยายามในตอนต้นๆส่วนใหญ่ มุ่งประเด็นที่กระบวนการสร้างที่ความดันสูงในปี 1953 กลุ่มชาวสวีเดน ที่ Alimanna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) ได้สังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง แต่ไม่มีการบันทึกไว้ว่าพวกเขาค้นพบด้วยวิธีการอย่างไร

ในปี 1955 General Electric ได้ประกาศความสำเร็จในการสร้างเพชรที่ความดันสูง ซึ่งกระบวนการสร้างเพชรที่ความดันสูงต้องการเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีราคาแพงมากและมีใช้เฉพาะ ในด้านอุตสาหกรรมขนาดใหญ่หลายๆ เพชรที่สร้างได้มีผลผลิตประมาณ 100 ตันต่อปี ระหว่างเวลาที่เทคนิคการสร้างเพชรที่ความดันสูง ได้ถูกพัฒนา นักวิจัยหลายคนได้สนใจการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำซึ่งเหมือนกับการเปลี่ยนธาตุตะกั่วไปเป็นทองคำ

ในปี 1956 Bori V. Spitsyn นักศึกษาที่สถาบันเคมี ฟิสิกส์ ไนมอสโคว์ ได้สังเคราะห์เพชร โดยการสลายตัวของคาร์บอนเตตระไฮไดรด์บนเม็ดผลึกเพชร แต่โครงสร้างเหล่านี้ไม่มีการตีพิมพ์

ในปี 1965 Angus ได้เริ่มงานที่ Case Western Reserve University จุดประสงค์ของการวิจัย คือ การสร้างเพชรที่ความดันต่ำให้ได้ Angus และเพื่อนร่วมงาน ได้ใช้ไฮโดรเจนในตอนแรก พวกเขาได้สร้างเพชรและกราไฟท์ได้พ่นก๊าซไฮโดรเจนที่พื้นผิวเพื่อสกัดการเกิดกราไฟท์ และต่อมาได้สังเคราะห์ทั้งเพชรและกราไฟท์ โดยพวกเขาได้นำเสนอวิธีการ ในการประชุมที่ Kiva ในปี 1971 ว่าสามารถใช้ใส่หลอดถึงสแตนเพื่อแยกโมเลกุลไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างปี 1981 ถึง 1983 กลุ่มชาวญี่ปุ่นที่ National Institute for Research in Inorganic Material (NIRIM) ใน Tsukuba-shi ได้เปิดเผยวิธีสำหรับการสร้างฟิล์มเพชรอย่างรวดเร็ว ที่ความดันต่ำ Nobuo Setake, Yoichiro Sato, Seiichiro Matsumoto และ Mutsukazu Kaamo และผู้ร่วมงานได้ใช้ไส้หลอดทั้งสแตนเลสและ microwave discharges เพื่อกำเนิดอะตอมไฮโดรเจนที่ต้องการในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เทคนิคเหล่านี้ยังเป็นที่ยอมรับ นอกจากนี้เทคนิคการใช้กระแสตรง และ discharge ก็ยังถูกนำมาใช้ Yoichi Hirose แห่ง Nippon Institute of technology ได้จากเปลวไฟ (Fuel-rich oxyacetylene torch) เปลวไฟทำให้เกิดทั้ง อะตอมไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งรวมตัวกันเกิดเพชร

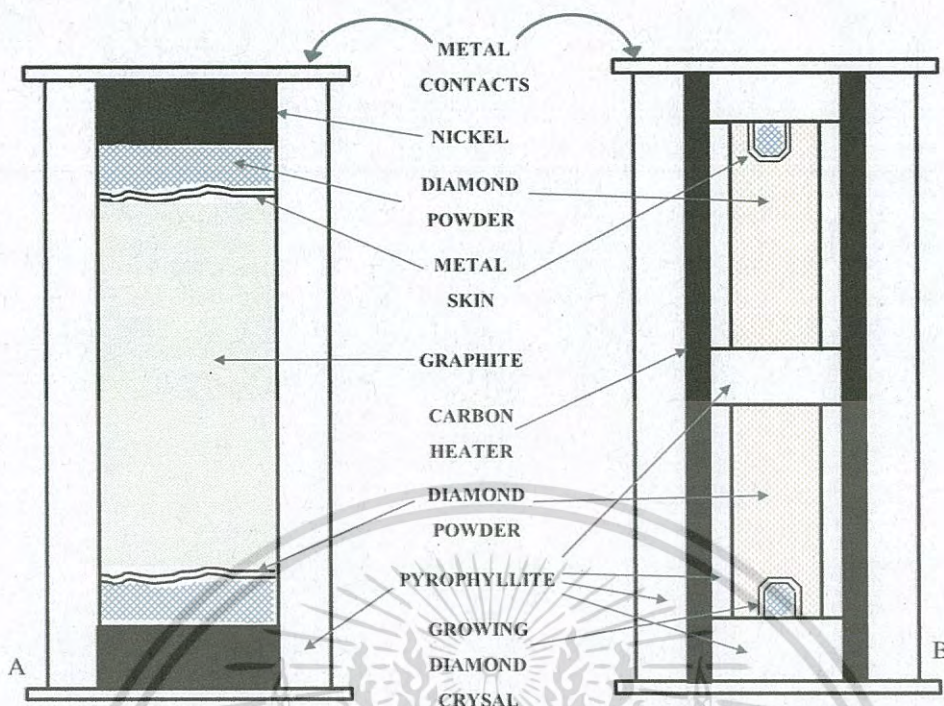
ภายหลังที่ญี่ปุ่นได้พัฒนาก้าวหน้าไปมาก ทางอเมริกาและยุโรป ก็ได้เริ่มกลับมาสนใจอย่างจริงจังอีกครั้ง โดยในปัจจุบันมีการศึกษาและวิจัยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ต่างๆทั่วโลก รวมถึงที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นอกจากนี้ความสามารถในการสร้างฟิล์มเพชรได้เปิดกว้างไปถึงการสร้างเพชรบนฐานรองสารกึ่งตัวนำ ได้มีจุดมุ่งหมายนำฟิล์มเพชรมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ไดโอด และ ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น[2]

1.2 การสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง[3]

ความก้าวหน้าในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง ได้เริ่มอย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1955 ที่ห้องวิจัยของ General Electric (GE) เมื่อ Bundy และผู้ร่วมทำการวิจัย ได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรที่สามารถผลิตเพชรซ้ำได้ (แต่เดิม การอ้างอิงการสังเคราะห์เพชรส่วนใหญ่จะไม่สามารถสังเคราะห์ซ้ำได้และถูกพิสูจน์ว่าไม่เป็นความจริงในเวลาต่อมา) ทีมงานได้พัฒนาเครื่องมือความดันสูงและอธิบายกระบวนการที่ซึ่งคาร์บอนรูปแบบธรรมดา สามารถเปลี่ยนไปเป็นเพชร

วิธีการสร้างเริ่มจากสารละลายที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง คาร์บอน (ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแกรไฟท์) กับ โลหะ เช่น นิกเกิล เหล็ก โคบอลต์ แมงกานีส พาราเดียม และ แพลททินัม กราไฟท์ จะถูกบรรจุในหลอด pyrophyllite มีโลหะปิดหัวท้าย ดังแสดงในรูป 1 ต่อมาทำการเพิ่มความดันประมาณ 1 ล้านปอร์นต่อตารางนิ้ว ใช้กระแสไฟฟ้าผ่านจากลูกสูบของเครื่องอัด ไปยังโลหะที่ส่วนปลายและแกรไฟท์ จนถึงลูกสูบอีกด้านหนึ่ง เมื่อกราฟิทมีความต้านทานทางไฟฟ้าถึงจุดสูงสุดที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นในทางเดินกระแส กระแสจะถูกปรับจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ คือประมาณ 1800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะนี้โลหะ เช่น นิกเกิล จะหลอมละลาย แกรไฟท์เริ่มก่อตัวเป็นผลึกเพชร ฟิล์มโลหะแยกแกรไฟท์จากเพชร อาจจะมีขนาดหนาน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร และคาร์บอนจะถูกขจัดจากโลหะอย่างรวดเร็ว ในเวลาเพียง 2-3 วินาที แกรไฟท์ทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นเพชรในขณะที่นิกเกิลจะไหลจากปลายทั้งสองด้านของเครื่องมือไปยัง Hotter center

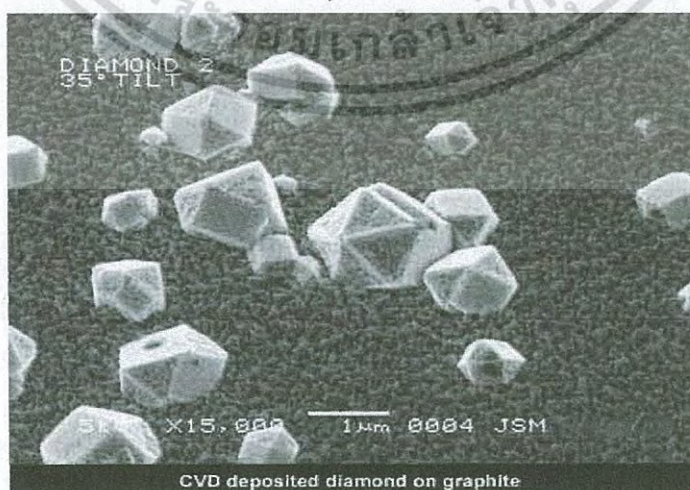
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 แสดงเครื่องมือความดันสูงที่ใช้ในการสร้าง (a) เกสดีเพชร (b) ผลึกเพชรเดี่ยว[3]

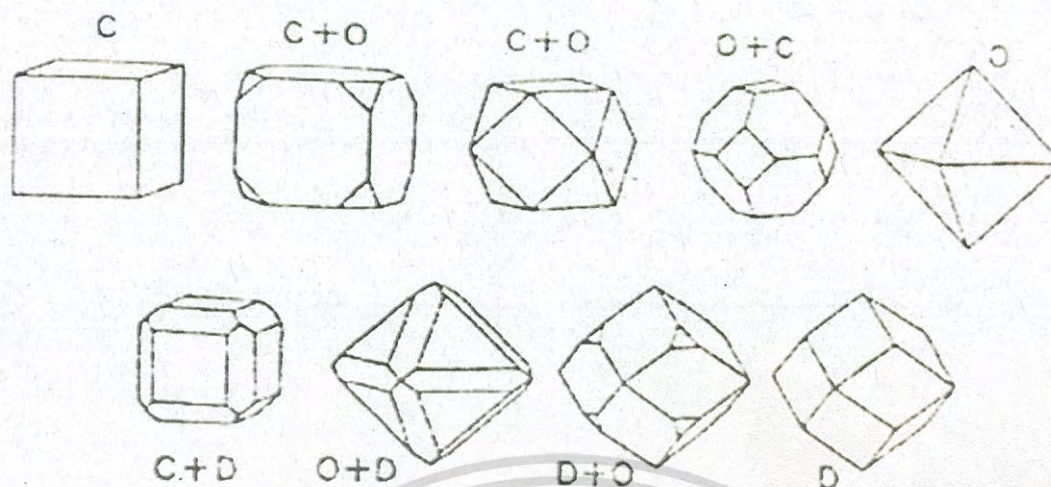
ถ้าความดันถูกปล่อยในเวลาสั้น เพชรจะเปลี่ยนกลับไปเป็นแกรไฟท์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจะไม่ปล่อยความดันจนกว่าจะทำการปิดกระแสไฟฟ้าและขึ้นทดลอง (ผลึกเพชร) เย็นตัวลงเสียก่อนขนาดของเพชรที่ได้จะขึ้นกับสภาวะในการทดลอง เช่น ชนิดของโลหะที่เลือกใช้ รูปแบบแกรไฟท์ อุณหภูมิ ความดัน และเวลา

ส่วนรูปร่างของผลึกขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งรายงานพบว่ารูปร่างจะเปลี่ยนจาก cubic (100) ที่ 1300 องศาเซลเซียส ไปเป็นรูปร่างผสมระหว่าง cubic และ octahedral ที่ 1400 – 1500 องศาเซลเซียส เป็นรูปร่าง octahedral (111) ที่ 1600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แสดงผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้ที่ความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเพชรที่สร้างที่ความดันสูง (C= cube, D= dodecahedron, O= octahedron)

โดยอุณหภูมิที่เพิ่มจะอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดไว้ที่ 900,000 psi นอกจากนี้ยังอาจจะพบรูปร่าง rhombohedral (100) โดยจะพบที่สภาวะบริเวณแคบๆ ใกล้กับเส้นแบ่งเพชรและกราไฟท์ ในรูปที่ 15 นอกจากวิธีการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูงโดยใช้วิธีโลหะทรานสิชันหลอมมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ในปัจจุบันยังมีการสังเคราะห์เพชรที่อุณหภูมิและความดันสูงโดยตรง โดยไม่ต้องใช้โลหะมาเป็นตัวช่วย ดังรูปที่ 4 และวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ความดันสูงแต่ใช้อุณหภูมิต่ำ ที่เรียกว่า shock wave technique



รูปที่ 4 แสดงเครื่องสังเคราะห์เพชรแบบอุณหภูมิและความดันสูง โดยตรง ของ National Institute for Research Material (NIRIM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เทคโนโลยีต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำในปัจจุบัน[4]

ในปัจจุบันนี้ มีการสนใจฟิล์มเพชรที่สร้างจากระบบ CVD เป็นอย่างมากทั้งในการที่จะขยายขนาดและทำการค้า ไม่เพียงเพราะว่าอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูกกว่า ต้นทุนการปฏิบัติงานต่ำและเพชรที่สังเคราะห์ได้ยังมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกรวมเข้าไว้ในเทคนิคการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ และที่สำคัญมากกว่านั้นเพราะว่า ความผสมผสานคุณสมบัติที่ไม่เหมือนใครของเพชรควบคู่ไปกับความสามารถใหม่ที่จะทำให้เกิดรูปแบบฟิล์มบางบนวัสดุที่หลากหลาย เป็นการประกาศศักราชใหม่ในเทคโนโลยีของเพชร และเปิดโอกาสมากขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่มีศักยภาพ โดยวิธีการแบบเดิมคือ วิธีความดันและอุณหภูมิสูง เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่จากคุณสมบัติของเพชร เช่น การเคลือบวัสดุอื่นๆ ที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน ด้วยฟิล์มเพชร เป็นต้น

ถึงแม้ว่า เพชรที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นรวมถึงเพชรธรรมชาติ โดยปกติจะจัดตัวภายใต้เงื่อนไขของความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งก็ไม่ได้แปลว่า การเกิดผลึกเพชรไม่สามารถเกิดที่ ความดันและอุณหภูมิต่ำกว่า ในระยะแรก ได้มีข้อบ่งชี้ว่า เพชรสามารถที่จะก่อตัวภายใต้เงื่อนไขที่ซึ่งกราไฟท์และสิ่งที่ไม่ใช่เพชร เป็นสถานะคาร์บอนที่เสถียร ความเป็นไปได้ของการก่อตัว เป็นผลึกเพชรในข้อกำหนดของความดันและอุณหภูมิ ซึ่งเพชรที่ไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกเมื่อเทียบกับกราไฟท์ นั่นคือ ที่ความดันต่ำกว่าหนึ่งบรรยากาศ และอุณหภูมิต่ำกว่า 1373 เคลวิน สามารถเกิดเพชรได้เนื่องจาก การรวมกันของปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิก จลศาสตร์ และทางเคมี การสร้างเพชรที่มี ความสมดุลทางความร้อน จะใช้วิธีสังเคราะห์จากสถานะก๊าซ ซึ่งเป็นก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรเจน อย่างไรก็ตาม อะตอมของไฮโดรเจนก็มีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์เพชร เพราะเป็นตัวแยกกราไฟท์ออกไป แต่ไม่แยกเพชรออก ดังนั้นอะตอมของไฮโดรเจนมีความสำคัญมากต่อการสร้างเพชรที่ความดันต่ำ

ความก้าวหน้าในการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำ โดยส่วนใหญ่เป็นผลงานของนักวิจัยชาวโซเวียต ในปลายทศวรรษที่ 1970 และต้นทศวรรษที่ 1980 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า เทคนิคการกระตุ้นในสถานะที่เป็นก๊าซสามารถที่จะเพิ่มอัตราการเกิดเพชรได้อย่างมาก ในขณะที่ยับยั้งการตกลงมาของกราไฟท์ ซึ่ง NIRIM ในญี่ปุ่น ได้ทำการวิจัยมาโดยตลอด การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำมีอยู่หลายวิธี วิธีที่เป็นที่นิยมในการนำมาสังเคราะห์ฟิล์ม มีอยู่ 5 วิธีด้วยกันคือ

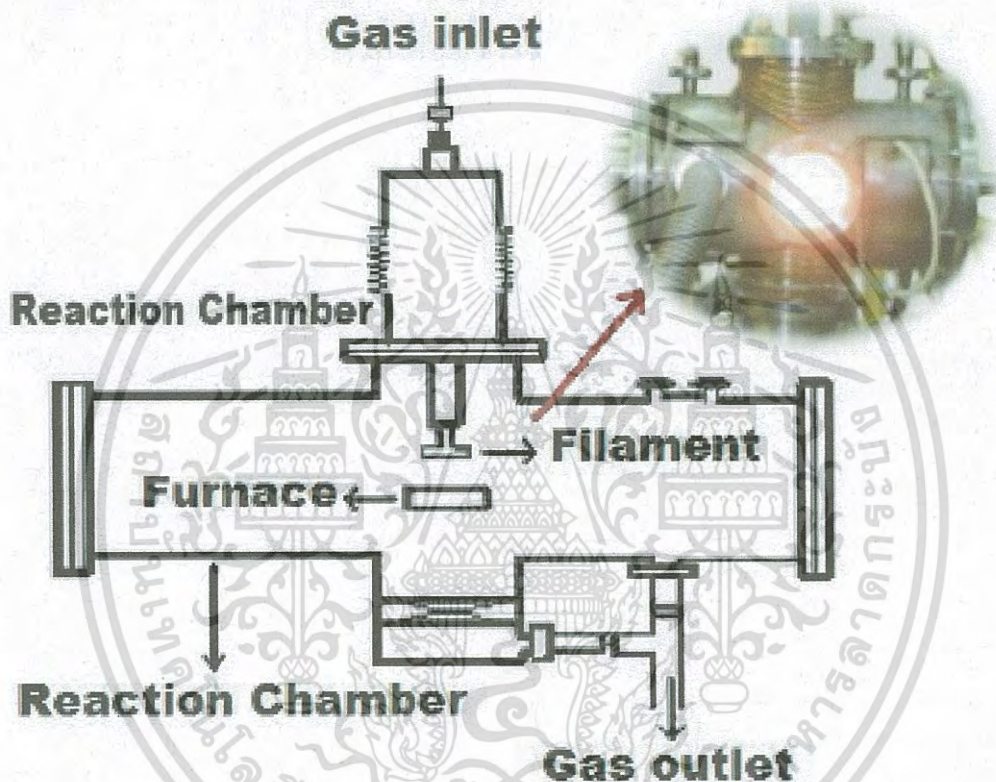
- 1.การสร้างด้วยวิธีใช้ความร้อนจากไส้หลอด (Hot filament activation)
- 2.การสร้างโดยวิธีพลาสมา (Plasma activation)
- 3.การสร้างโดยวิธี Electron cyclotron resonance
- 4.การสร้างโดยวิธี Plasma torch
- 5.การสร้างด้วยวิธี เปลวไฟ (Combustion activation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งต่อไปนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดทั้งข้อดีและข้อเสียของวิธีการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

1.3.1 การสร้างด้วยวิธี Hot filament activation[4]

วิธีนี้เป็นวิธีที่สร้างได้ง่าย ไม่แพง สามารถสร้างฟิล์มให้มีพื้นที่ครอบคลุมฐานรองขนาดใหญ่ได้ ชุดเครื่องมือจะประกอบด้วยก๊าซจากแหล่งจ่ายไหลผ่านไส้หลอดที่ทำจากทังสเตน (หรืออาจจะเป็นพวก แทนทาลัม โมลิบดีนัม เรเนียม) ไปยังฐานรองที่จะทำให้เกิดฟิล์มเพชรบนบริเวณนี้ ดังแสดงในรูปที่ 5



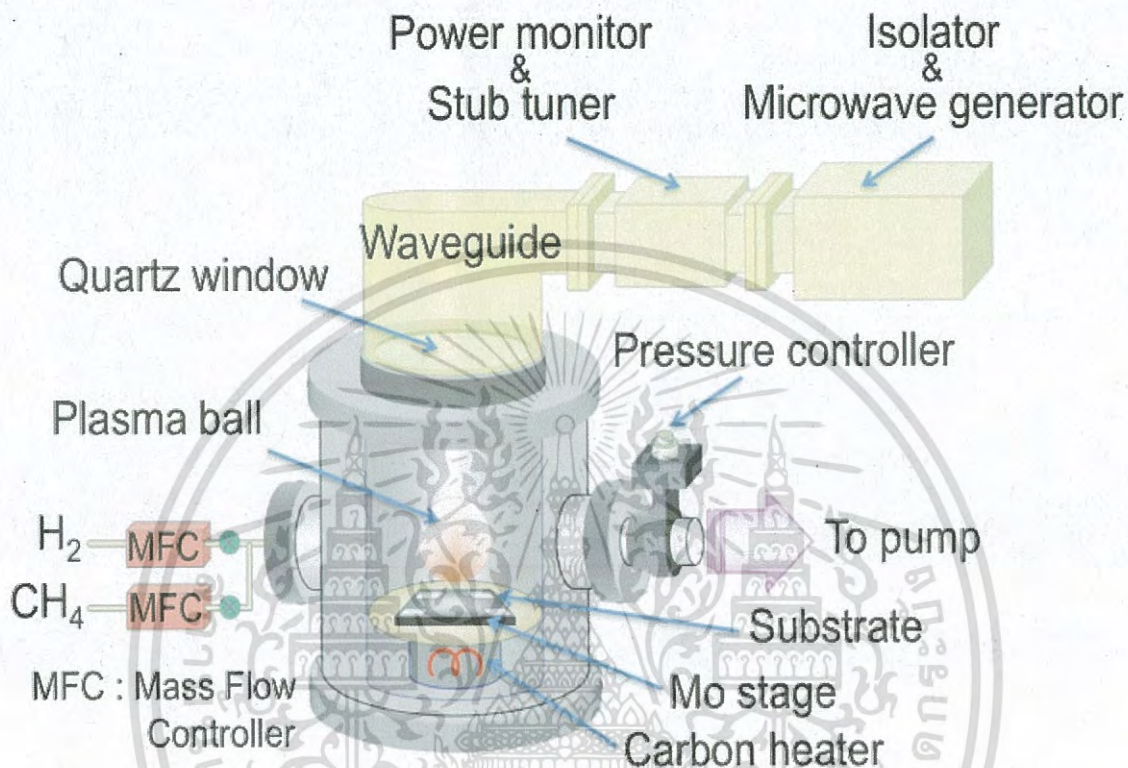
รูปที่ 5 แสดงไดอะแกรมของระบบที่ใช้วิธี Hot filament activation

ไส้หลอดถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 2000 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนที่ผสมกันอยู่แตกตัวออกจากกัน ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองมีค่าประมาณ 1 เซนติเมตร ฐานรองมีอุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ผลจากการกระตุ้นด้วยความร้อน ทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอน เกิดการแพร่และทำปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณผิวฐานรอง ส่วนความหนาของฟิล์มขึ้นกับเวลาที่ใช้ ข้อดีของระบบนี้ คือ สามารถสร้างฟิล์มเพชรให้มีขนาดพื้นที่ใหญ่ได้ และค่าใช้จ่ายมีค่าต่ำ การเกิดฟิล์มที่สม่ำเสมอเป็นพื้นที่ใหญ่ จะเป็นไปได้ เพราะว่า ก๊าซเพชรจะเกิดที่ไส้หลอด ซึ่งวิธีอื่นจะให้ความร้อนเป็นบริเวณจุด อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบนี้ จะอยู่ที่ไส้หลอดที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จะเกิดการเปราะและผิดรูปไป ซึ่งเป็นผลจากการก่อตัวของคาร์ไบด์ขึ้นบนไส้หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 การสร้างโดยวิธี Plasma activation[4]

วิธีการนี้จะใช้ความถี่ในการสังเคราะห์เพชร ขนาด 2.45 GHz, 915 GHz และ 13.56 MHz ซึ่งไดอะแกรมของระบบที่ใช้ การสร้างเพชรด้วยวิธีนี้จะแสดงในรูป 6



รูปที่ 6 แสดงไดอะแกรมของระบบ microwave plasma activation

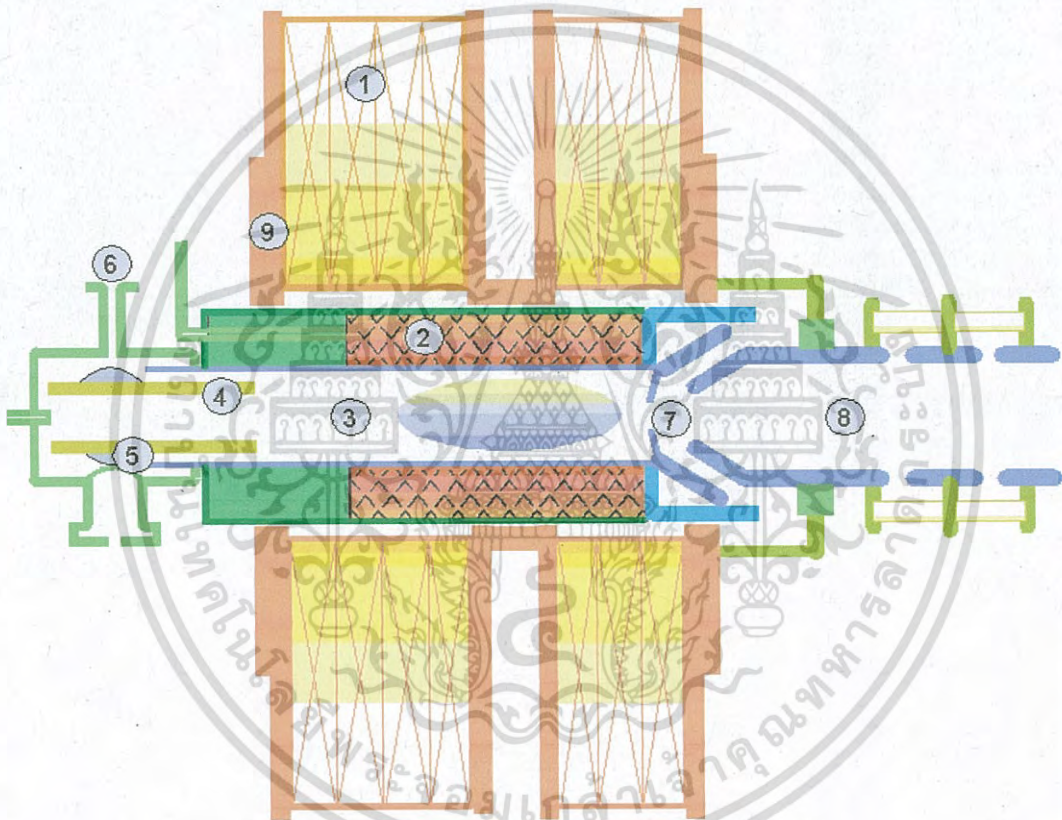
พลังงานไมโครเวฟจะถูกปล่อยไปยังท่อแก้วผ่านไปยังพื้นผิวของฐานรอง ซึ่งเพชรจะถูกเคลือบลงบนฐานรองที่เป็นขั้วไฟฟ้าละลายอยู่ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกับวิธี Hot filament คือที่ความดัน 40 – 100 ทอร์ อุณหภูมิฐานรอง 800 – 1000 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของมีเทน 0.2 – 5 % ในบรรยากาศของไฮโดรเจน อัตราการเคลือบประมาณ 1 – 5 ไมครอน/ ชั่วโมง ฐานรองถูกทำให้ร้อนโดยพลาสมาและการแผ่รังสี ข้อดีของระบบนี้คือ การที่ไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรอง จึงทำให้สะดวกสร้างเพชรได้พื้นที่ใหญ่ และการเคลือบจะราบเรียบสม่ำเสมอ มีความสมดุลของพลาสมา เนื่องจากไม่มีปฏิกิริยากับผนัง

สำหรับระบบ RF plasma เป็นวิธีหนึ่งที่น่าไปใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเช่นกัน ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะได้ขนาดผลึกที่ไม่ใหญ่เท่าวิธี microwave plasma ก็ตาม แต่ระบบทั้งสองใช้ความถี่ในช่วง 100 Hz และ 13.5 MHz โดยเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มเหมือนกับของ microwave plasma มีอัตราการเกิด 0.5 – 3.0 ไมครอน / ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 การสร้างด้วยวิธี electron Cyclotron Resonance (ECR)[4]

Kawarada ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ขึ้น ดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็น magneto microwave plasma โดย Helmholtz type coil จะวางอยู่รอบ cylindrical waveguide และใช้การกระจายของสนามแม่เหล็กในการควบคุมพื้นที่ของการเคลือบฟิล์ม โดยทำการจ่ายสนามแม่เหล็กขนาด 875 G ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อ Electron Resonance ความถี่ของ electron gyration มีค่าเท่ากับไมโครเวฟขนาด 2.45 GHz ข้อได้เปรียบของ ERC คือ ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีความสม่ำเสมอ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลาสมากับพื้นที่ที่จะสูง และใช้คุณสมบัติในการสร้างต่ำประมาณ 500 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.1 ทอร์

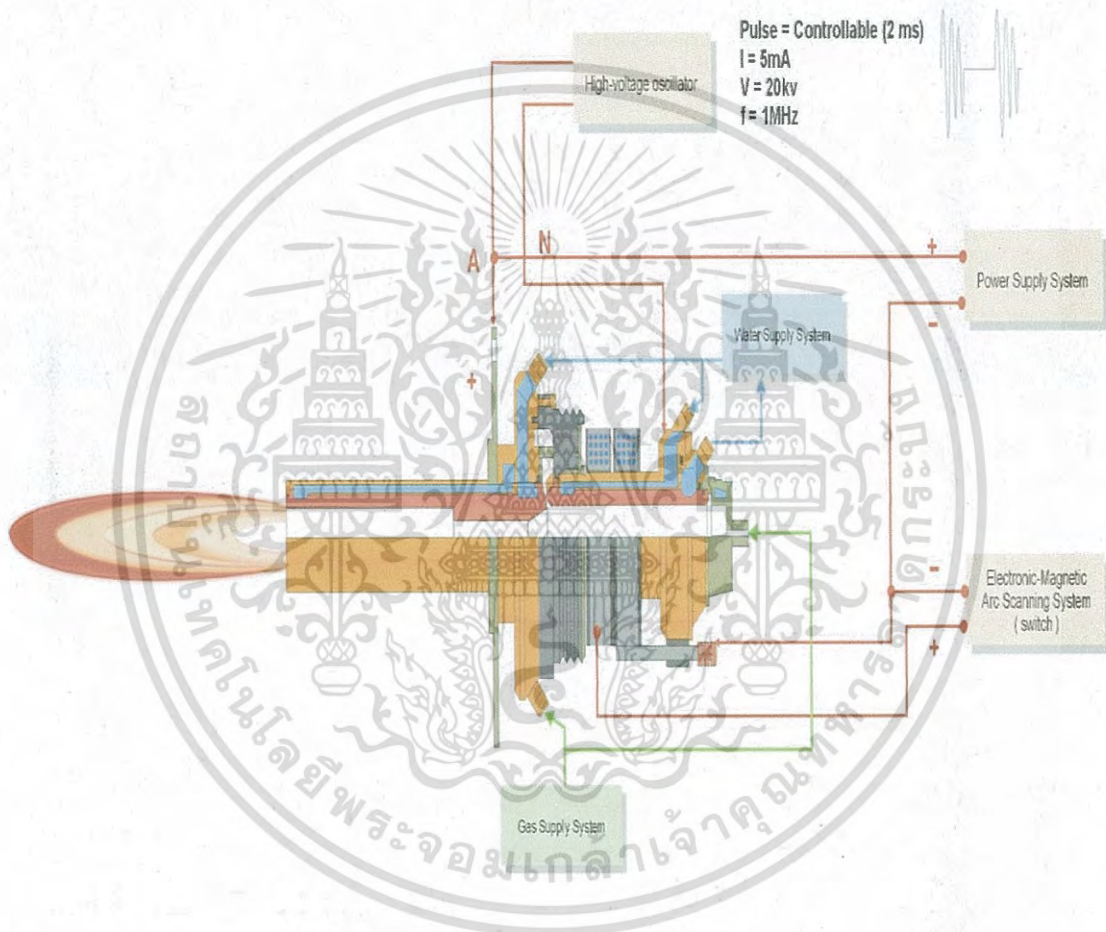


รูปที่ 7 แสดงไดอะแกรมของระบบ ECR

1.3.4 การสร้างด้วยวิธี Plasma torch[4]

Kurihara ได้แนะนำวิธีการของ dc plasma jet ที่มีลักษณะดังรูปที่ 8 เรียกว่า DIA-JET ลักษณะคล้ายวิธีการ RF plasma torch โดย thermal plasma จะขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิของก๊าซ มีค่ามากกว่า 400 องศาเซลเซียส ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากการ arc charge ระหว่างอิเล็กโทรดทรงกระบอกคู่หนึ่ง ทำให้เกิดการกระจายออกอย่างรวดเร็วไปยังฐานรอง ผ่านหัวฉีดที่มีความยาวประมาณ 5-10 เซนติเมตร ซึ่งขึ้นกับความดัน ฐานรองวางในหัวฉีดห่างจากอานอดประมาณ 1-2 เซนติเมตร และต้องหล่อเย็นเสมอ วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า RF plasma เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

torch โดยจะได้ฟิล์มที่มีคุณภาพ และมีอัตราการเกิดสูงประมาณ 80 ไมครอน / ชั่วโมง ได้มีการรายงานที่สามารถสร้างฟิล์มได้ถึง 930 ไมครอน/ชั่วโมง โดยใช้วิธี atmosphere dc arc discharge plasma jet ซึ่งสามารถสร้างฟิล์มให้มีความหนาถึง 10 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของวิธีการนี้ที่มีอัตราการเคลือบฟิล์มสูง แต่ก็ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความไม่สมบูรณ์ของฟิล์ม พื้นที่ในการสร้างน้อย (เส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 10 มิลลิเมตร) และเนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิสูง จึงมีปัญหาในการควบคุมอุณหภูมิ สำหรับการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการสร้างฟิล์มเพชรที่ได้พื้นที่น้อย สามารถปรับปรุงโดยการเลื่อนฐานรองผ่าน plasma jet

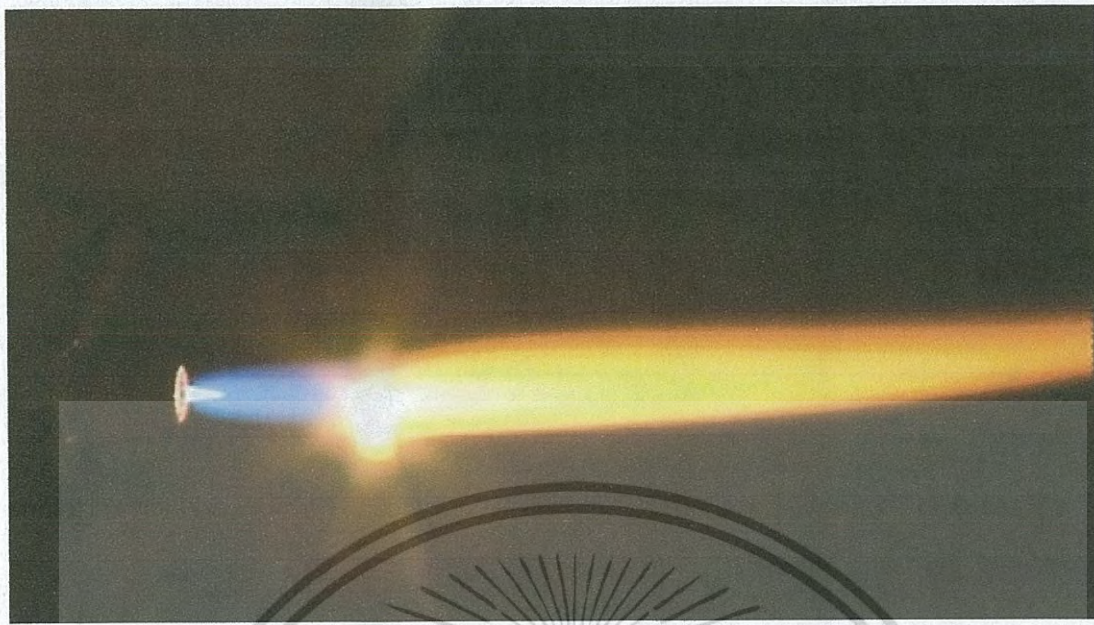


รูปที่ 8 แสดงไดอะแกรมการสร้างวิธี DC arc jet

1.3.5 การสร้างด้วยวิธี combustion activation[4]

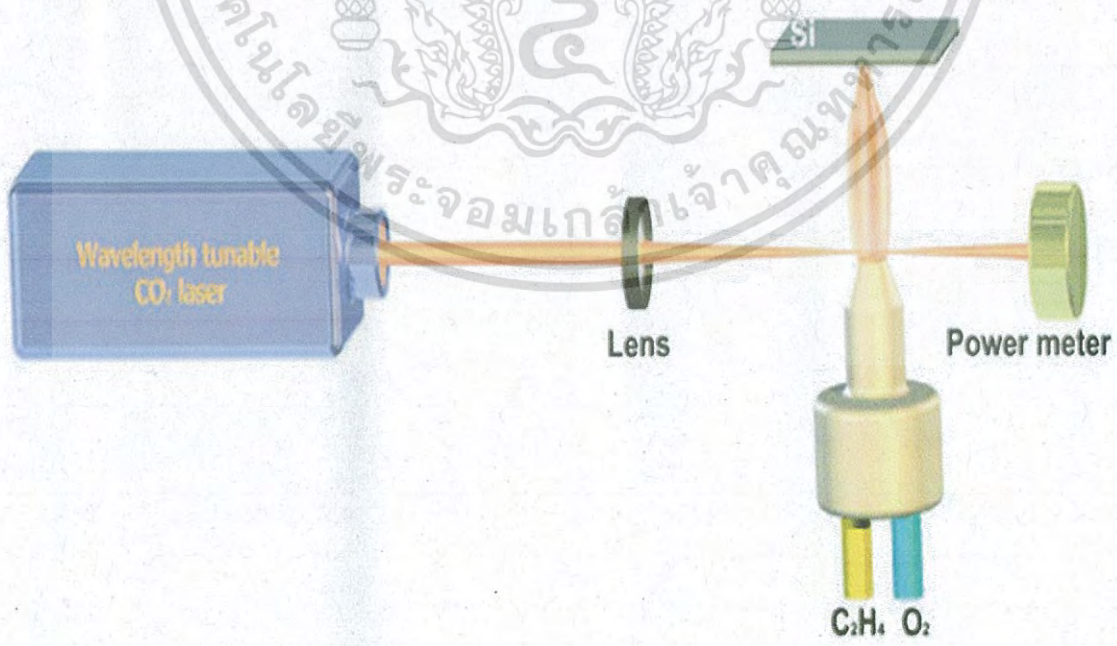
วิธีการสร้างแบบนี้จะให้เพชรที่มีคุณภาพที่ดีที่สุดและมีอัตราการเกิดสูง (มากกว่า 100 ไมโครเมตร/ชั่วโมง ขึ้นไป) ซึ่ง Prof. Hirose เป็นคนแรกที่ได้เสนอการสร้างด้วยวิธีนี้ การสร้างจะใช้ก๊าซทำปฏิกิริยา ระหว่าง อะเซทิลีน และออกซิเจน จุดเด่นของระบบนี้ คือสามารถสร้างเพชรได้โดยไม่ต้องกระทำการในแชมเบอร์ และสร้างเพชรลงบนฐานรองได้บริเวณที่ต้องการสร้างโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงไดอะแกรมบริเวณที่เกิดฟิล์มเพชรจากเปลวไฟของระบบ Combustion activation CVD

ข้อดีส่วนอื่นของระบบนี้ก็มี เช่น เป็นระบบที่ใช้ค่าใช้จ่ายไม่แพงมากนัก ก๊าซที่ใช้หาง่าย ผลึกเพชรที่ได้จะมีขนาดใหญ่ เป็นต้น ส่วนข้อเสียของระบบนี้ คือ การเกิดฟิล์มเพชร จะเกิดในบริเวณที่แคบ ไม่กว้าง (ดังรูปที่ 9) เกิดเป็นเฉพาะจุด ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้วิธีนี้สร้างฟิล์มเพชรที่มีขนาดบริเวณกว้าง แต่จะเหมาะสำหรับสร้างผลึกเพชรมากกว่า



รูปที่ 10 แสดงไดอะแกรมการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายเราจะเห็นว่ามีหลายวิธีด้วยกันที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำ ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อข้อเสียแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นกับจุดประสงค์ของการใช้งาน นั้นๆ เช่น ถ้าต้องการสร้างฟิล์มหนา วิธี plasma torch จะเหมาะสมที่สุด หรือถ้าต้องการสร้างฟิล์มบริเวณกว้าง วิธี Hot filament จะเป็นที่นิยมมากที่สุด

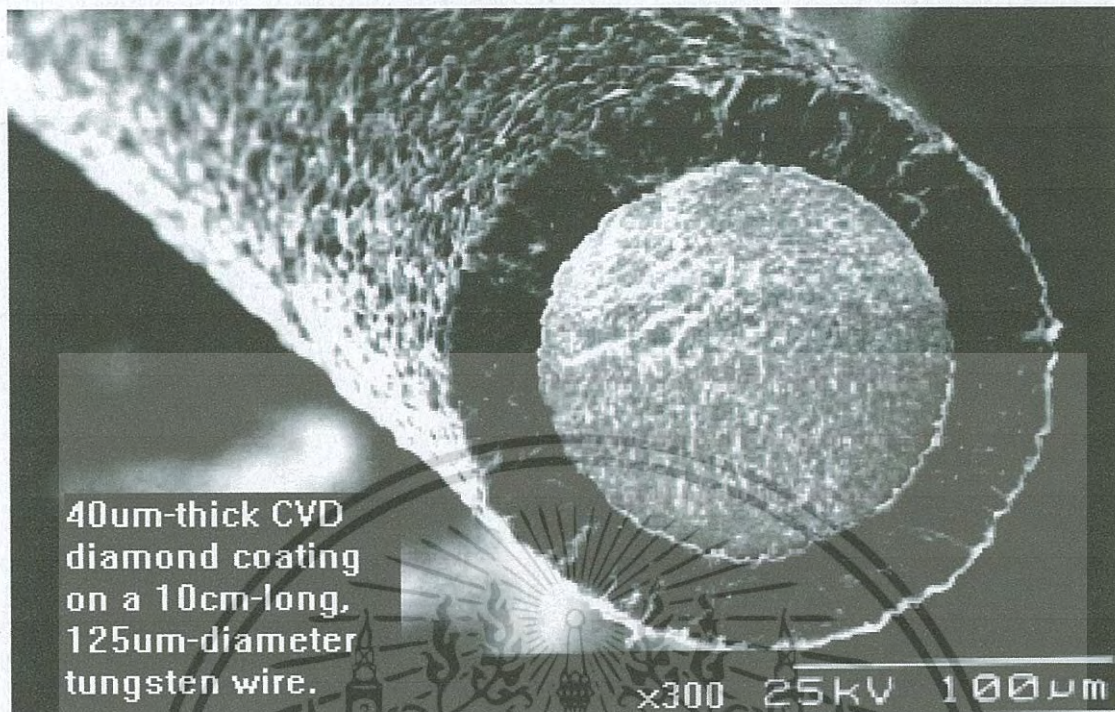
1.4 การประยุกต์ใช้งาน[5]

สำหรับการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ที่ได้ไปใช้งาน นอกเหนือจากการสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดต่างๆแล้ว ยังสามารถนำฟิล์มเพชรไปใช้งานด้านอื่นๆอีกหลายด้าน โดยจะพิจารณาถึงคุณสมบัติของเพชร เช่น รายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างการนำคุณสมบัติของเพชร ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆในปัจจุบัน[5]

การประยุกต์ใช้งาน	คุณสมบัติของเพชร
อุปกรณ์ที่ใช้ในการขัด (Abrasive) การเคลือบเครื่องมือและชิ้นป้องกันการสึกกร่อน	ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานต่อสารเคมี
ไดอะแฟรมลำโพงคุณภาพสูง	โมดูลัสความยืดหยุ่นสูง การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
เกี่ยวกับร่างกายมนุษย์ เช่น ทางวัสดุข้อต่อ ฟัน และไปโอเซนเซอร์	ความเข้ากันได้ทางชีวภาพของคาร์บอน
วัสดุกระจายความร้อนในอุดมคติสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ภายในห้องเครื่องยนต์	ความเฉื่อยต่อสารเคมี ความต้านทานต่อสารเคมี
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังสูง เป็นผลให้มีขนาดการรวมของวงจรที่สูง การบรรจุอุปกรณ์ที่แน่นขึ้นโดยปราศจากปัญหาที่เกิดจากความร้อน	ความคล่องตัวของโฮลที่สูง ช่องว่างแถบพลังงานมาก แรงดันพัวหลายสูง
โทรทัศน์สีจอแบน	กำเนิดแสงสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นแม่สีทางแสง ที่ใช้ในการผลิตโทรทัศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 แสดงการประยุกต์นำฟิล์มเพชรไปใช้งาน เช่น เคลือบเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ เพื่อป้องกันการสึกกร่อน



รูปที่ 12 แสดงการนำฟิล์มเพชรไปใช้งานโดยการเคลือบกับไบเมทัลสำหรับตัดวัสดุที่มีความแข็ง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เพชรธรรมชาติ[5],[6]

ตามธรรมชาติแล้วเพชรจะแบ่งตามชนิดและระดับสารเจือที่พบในตัวมัน โดยสามารถแบ่งเพชรออกเป็น 2 ชนิด คือ I และ ชนิด II หลังจากนั้นมีการเพิ่มอักษร a หรือ b ต่อท้าย ซึ่งสามารถสรุปชนิดต่างๆ ของเพชรได้ดังนี้

เพชรชนิด Ia เพชรในธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นชนิดนี้ ประกอบด้วยไนโตรเจนมากกว่า 0.3%

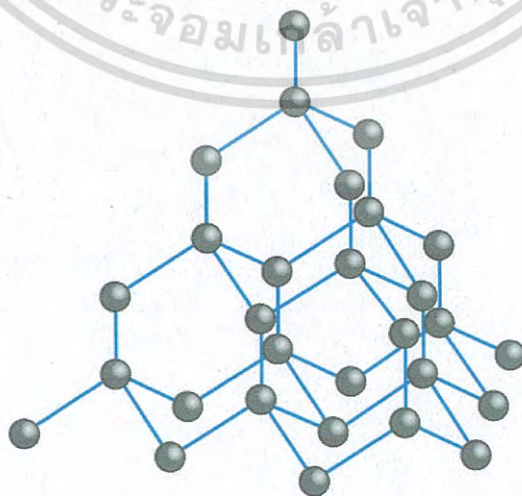
เพชรชนิด Ib จะพบเพชรชนิดนี้ยากมากในธรรมชาติ (ประมาณ 0.1%) แต่เพชรที่สังเคราะห์ขึ้น (ในทางอุตสาหกรรม) จะเป็นเพชรชนิดนี้ ประกอบด้วยความเข้มข้นไนโตรเจนสูงถึง 500 ppm

เพชรชนิด IIa หายากมากในธรรมชาติ เพชรชนิดนี้จะมีไนโตรเจนน้อยมากมีคุณสมบัติเป็นฉนวนและไม่พบโบรอน ซึ่งเพชรชนิดนี้จะไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีการวัด การดูดกลืนของแสงอินฟราเรดหรืออัลตราไวโอเล็ต

เพชรชนิด IIb หายากที่สุดในธรรมชาติ มีความเข้มข้นของไนโตรเจนน้อยมาก (น้อยกว่าชนิด IIa) จะมีจำนวนโบรอนมากกว่าไนโตรเจนและเป็นเพชรชนิดที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

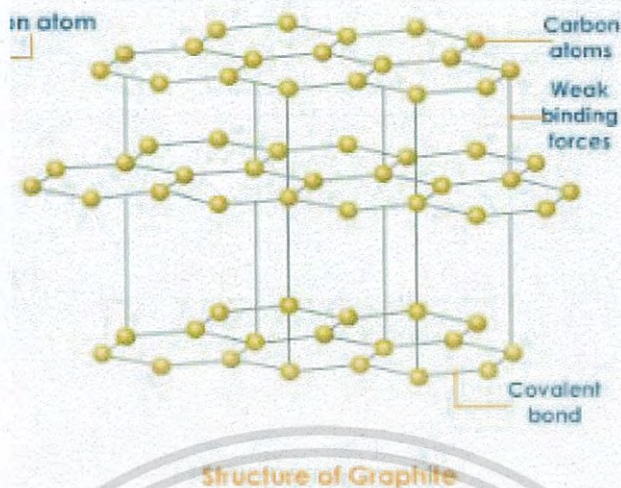
2.2 สมดุลยภาพของคาร์บอน[6]

เพชรและกราไฟท์ต่างเป็นโครงสร้างหนึ่งของธาตุคาร์บอน ซึ่งความแตกต่างในโครงสร้างระหว่างกราไฟท์และเพชร สามารถแสดงได้ในรูปที่ 13 และ รูปที่ 14

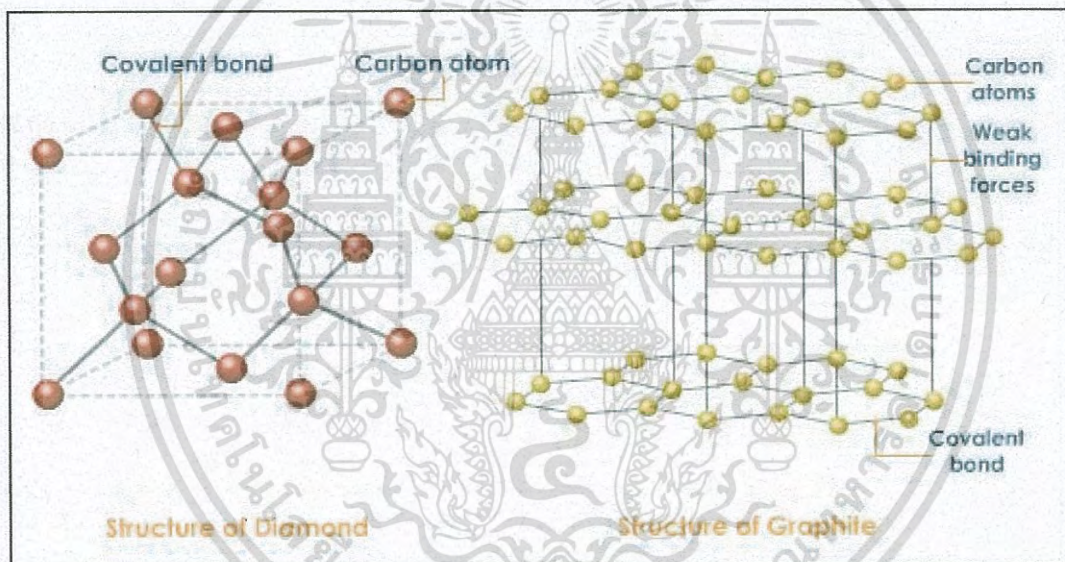


รูปที่ 13 แสดงโครงสร้างของเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างของกราไฟท์



รูปที่ 15 เปรียบเทียบโครงสร้างของเพชร (111) และกราไฟท์ (0001)

เพชร โครงสร้างจะเป็นโครงสร้างสี่เหลี่ยมอะตอม โดยแต่ละอะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวกับอะตอมคาร์บอนรูป เตตราฮีดรอน (Tetrahedron) อีกอีกรูปที่อยู่รอบๆ ดังรูปที่ 13 ในระหว่างอะตอมจะมีโควาเลนซ์คอมบินเนชันที่บริสุทธิ์ เหนียวแน่น ซึ่งทำให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีมาก เช่น มีจุดหลอมเหลวสูง ทนทานต่อสารเคมีได้สูง และมีความแข็งแรงมาก เป็นต้น

กราไฟท์ ตกผลึกในรูปชั้นโครงสร้างหกเหลี่ยม (Hexagonal) ดังรูปที่ 14 ภายในระนาบพื้นอะตอมคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันดี ส่วนระหว่างชั้นต่างๆ กลับมีการยึดเหนี่ยวไม่ดี เนื่องจาก แนวนวเลนซีและแนวการนำไฟฟ้าเอียงกันเล็กน้อย จึงทำให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ (เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ) ในชั้นโครงสร้างจะมีลักษณะเป็น แอนไอโซทรอปิก กราไฟท์จึงเป็นผลึกเดี่ยว

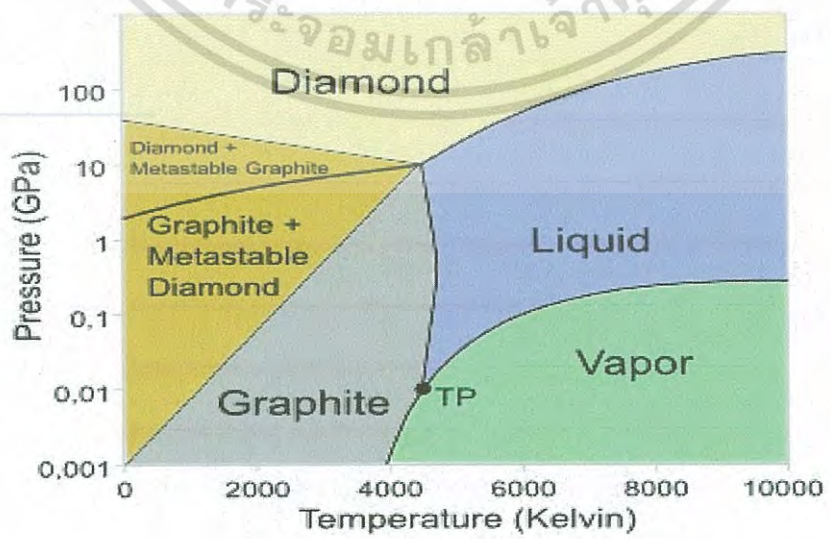
ตัวอย่างเช่น เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีความสามารถนำกระแสไฟฟ้าขนานกับชั้นโครงสร้างอะตอม โดยมีค่าแฟกเตอร์ประมาณ 5 x 103 มากกว่าในแนวตั้ง

- มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามความร้อนขนานกับแนวชั้นโครงสร้างอะตอม เป็นลบ (มีการหดตัวน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น)

ส่วนในแนวตั้งฉากกับชั้นโครงสร้างอะตอมของแกรไฟท์ จะมีอะตอมคาร์บอนไม่หนาแน่น เหมือนกับเพชร ค่าความเค้น ความแข็ง โมดูลัสความยืดหยุ่นก็น้อยกว่าเพชรมาก การยึดเหนี่ยวของโครงสร้างอะตอมแกรไฟท์จะมีชั้นที่อุณหภูมิประมาณ 4000 องศาเซลเซียส และภาคของเหลวจะเกิดขึ้นที่ ความดันสูง (มากกว่า 102 bar ขึ้นไป) รูปร่างที่ 16 ที่ความดันต่ำกราไฟท์แยกตัวออกจากกัน หรือเกิดเป็นเขม่า ชั้นโครงสร้างอะตอมของกราไฟท์ สามารถเลื่อนไหลในขณะรับภาระเฉือนได้ง่าย กราไฟท์จึงเป็นสารหล่อลื่นแข็ง ในการสัมผัสลื่นคู่ของวัสดุได้ดี และเนื่องจากทนความร้อนและ สารเคมีได้ดี จึงมีการนำกราไฟท์มาทำพื้นเข้าหลอมโลหะ

พิจารณารูปที่ 16 ที่ความดันปกติ จนถึงแนวเส้นโค้งของบริเวณ Liquid carbon (melt) ใกล้กับ 4000 องศาเซลเซียส คาร์บอนจะอยู่ในรูปของกราไฟท์ (บริเวณสีแดง) และสาเหตุที่เพชรสามารถพบที่พื้นผิวโลก เพราะว่าอุณหภูมิต่ำเกินไปที่จะทำลายพันธะ และเปลี่ยนรูปร่างกราไฟท์ ถึงอย่างไรก็ตาม ถ้าเพชรถูกทำให้ร้อนเกิน 1500 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศในสภาวะที่เพชรจะเปลี่ยนเป็นกราไฟท์ ในส่วนบริเวณสีเขียวคาร์บอนจะอยู่ในรูปของเพชร ทั้งนี้สามารถพบกราไฟท์ที่ บริเวณสีขาวได้เช่นเดียวกัน ถ้าหากว่าสภาวะไม่เหมาะสมที่จะทำให้กราไฟท์เปลี่ยนไปเป็นเพชร ใน บริเวณสีเขียว แสดงสภาวะที่เกิดเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นโดย กระบวนการของ General Electric ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้โลหะหลอมละลาย เช่น นิเกิล มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกการสังเคราะห์ชนิดนี้ ว่า Catalytic HPHT synthesis



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 16 แสดงแผนภาพสมดุลยภาพของคาร์บอนให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่บริเวณอุณหภูมิและความดันสูง เช่น บริเวณสี่สั้ม เพชรสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีปราศจาก โลหะหลอม เป็นวิธีที่เสนอโดย นาย Bundy เรียกว่าวิธีนี้ว่า HPHT synthesis โดยตรง ในส่วนสี่เหลี่ยมอ่อนเป็นวิธีที่ใช้ความดันสูงแต่ใช้อุณหภูมิต่ำ ที่รู้จักกันวิธีสังเคราะห์เพชรที่ชื่อ Shock wave technique ส่วนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในห้องวิจัย ที่ใช้ความดันต่ำหรือวิธี CVD จะอยู่ในบริเวณสี่เหลี่ยม ด้านล่างสุดของไดอะแกรม

2.3 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชรเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น[6]

จากโครงสร้างของเพชรที่ประกอบด้วย พันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรง เป็นผลให้เพชรมีคุณสมบัติทางกล และทางไฟฟ้าที่พิเศษหลายอย่าง โดยเพชรจะมีความแข็งแรง, molar density และ การนำความร้อน สูงกว่าวัสดุชนิดอื่น ในขณะที่เดียวกันเพชรก็มีความยืดหยุ่นและค่า bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น อีกทั้งยังมีสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนที่ต่ำมากๆ ซึ่งสามารถพิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญของเพชรเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่ใช้ในปัจจุบัน ได้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของเพชร เปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน[7]

คุณสมบัติ	เพชร	ซิลิกอน	GaAs	SiC
Thermal conductivity (W/cm-k)	20	1.41	0.455	4
Specific heat (J/g-k)	0.52	0.7	0.35	0.65
Optical phonon energy (meV)	163	63	35	100
Longitudinal phonon velocity (cm/s)	1.8×10^6	9×10^5	5.2×10^5	1.3×10^6
Coefficient of thermal expansion	0.8×10^{-6}	2.5×10^{-6}	5.9×10^{-6}	2.9×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 (ต่อ)

คุณสมบัติ	เพชร	ซิลิกอน	GaAs	SiC
Electron saturated velocity (cm/s)	1.5×10^7 1.05×10^7	1×10^7 9×10^7	1.2×10^7 1×10^7	2×10^7 1×10^7
Hole saturated velocity (cm/s)				
Electron mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	2150±200	1420	8800	600
Hole mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	1700±280	470	400	650
Density of states effective mass Electron	0.57	1.1	0.068	0.45
Hole	1.2	0.8	0.5	1
Dielectric constant	5.7	11.9	12.5	10
Intrinsic resistivity	$>10^{15}$	10^{15}	10^8	$>10^{15}$
Conductivity effective mass Electron	0.48			
Hole	0.83			
Breakdown field (V/cm)	$1-20 \times 10^6$	2×10^5	3.5×10^5	$1-5 \times 10^6$
Bandgap (eV)	5.5	1.12	1.42	2.2
Effective density of states Conduction band (cm^{-3})	1.1×10^{19}	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}	7×10^{18}
Valence band (cm^{-3})	3×10^{19}	1.04×10^{19}	7×10^{18}	2.5×10^{19}
Debye temperature-sensitive (K)	1860	645	344	1200

2.4 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน[7]

ในทางปฏิบัติ เงื่อนไขทั่วไปในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน จะประกอบด้วยหลักการที่สำคัญ 5 ประการ คือ

- 1) ในก๊าซ ต้องประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน เช่น จำพวก ไฮโดรคาร์บอน หรือ แอลกอฮอล์ จากวิธี CVD ยังพบว่า สามารถที่ใช้แหล่งจ่ายก๊าซที่เป็นไฮโดรคาร์บอนได้หลายชนิด สำหรับแหล่งจ่ายที่ได้รับความนิยมสำเร็จจากการนำมาทดลองสร้าง คือ มีเทน โพรเพน อีเทน รวมทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนประกอบอยู่ เช่น อะซิโตน และ เอทานอล การเจืออะตอมสารเจือของฟิล์มเพชร ทำการสร้างโดยใช้ ไตโบเรนและโบรอนคาร์โบไฮดรอกไซด์ เป็นแหล่งจ่าย

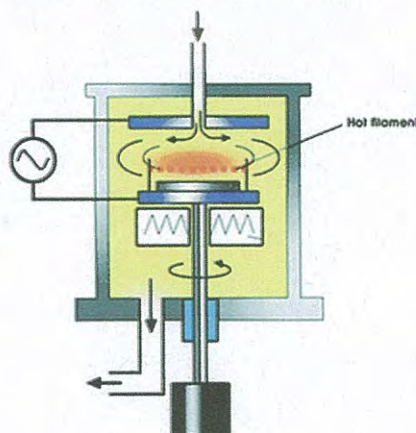
2) ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง หรือ กระตุ้นด้วยพลาสมา โดยบางครั้งอาจมีการใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน ในวิธี Hot filament พบว่าการแยกอะตอมไฮโดรเจน (H) ออกจากก๊าซไฮโดรเจน (H₂) สามารถเกิดขึ้นได้ง่าย โดยการผ่านก๊าซไฮโดรเจน ไปยังไส้หลอด เช่น ทังสเตน ที่ถูกจ่ายกระแสไฟให้ความร้อน ระหว่าง 1800 ถึง 2300 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดอะตอมไฮโดรเจนในบรรยากาศของไฮโดรคาร์บอน พบว่า สามารถเคลือบเพชรลงบนฐานรองได้ ในขณะเดียวกัน การก่อตัวของกราไฟท์มีค่าลดลง

3) ในระบบที่ใช้การสังเคราะห์ ต้องมีความเข้มข้นของอะตอมที่เป็นตัวป้องกันการเกิดกราไฟท์มากเพียงพอ หรือ การลดความเข้มข้นของภาวะก๊าซที่ทำให้เกิดกราไฟท์ขึ้น ซึ่งปกติจะใช้ไฮโดรเจน นอกจากนี้อะตอมที่เป็นตัวป้องกัน อาจได้จาก O₂, F₂ หรือ OH

4) วัสดุที่นำมาใช้เป็นฐานรอง มีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของฟิล์ม ต้องทำการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง เพื่อรองรับการเกิดนิวเคลียส และ การปลูกผลึกของเพชรจากไอเฟส ในทางปฏิบัติแล้วจะรวมถึงพื้นผิวที่ไม่มีตัวเร่งต่างๆ ที่ทำให้เกิดการก่อตัวของกราไฟท์ นอกจากนี้ พื้นผิวของฐานรอง ต้องรองรับการก่อตัวของเพชรเฉพาะบนพื้นผิว โดยฐานรองต้องมีข้อจำกัดของการแพร่ของอะตอมคาร์บอน ลงไปในเนื้อวัสดุของฐานรอง

5) กระบวนการสร้าง ต้องมีแรงที่สามารถขับอะตอมคาร์บอนจากก๊าซเฟสไปยังบริเวณพื้นผิวของฐานรอง ในกระบวนการสร้างด้วยวิธีการ CVD ส่วนใหญ่ แรงที่ใช้ขับอะตอมคาร์บอนจะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ เนื่องจากบริเวณที่ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นจะมีอุณหภูมิจะมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิวของฐานรอง อย่างไรก็ตามอาจใช้วิธีต่างๆโดยการเป่าก๊าซเฟสไปยังพื้นผิวของฐานรอง

ซึ่งถ้าหลักการใดหลักการหนึ่ง ใน 5 ข้อนี้ขาดไป เป็นผลให้สิ่งที่เกิดขึ้นจะไม่ใช่เพชร อาจเป็นกราไฟท์, diamond - like hydrocarbon หรือ diamond - like carbon



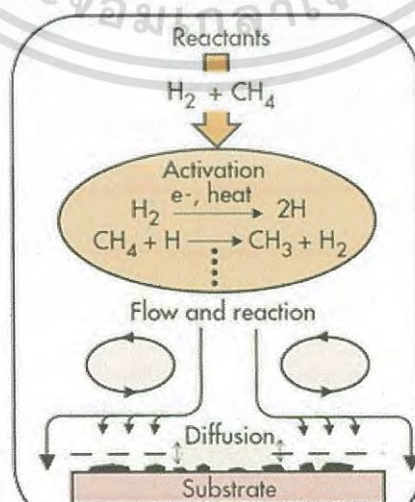
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 17 แสดงระบบ CVD แบบความร้อน ญาติให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 กระบวนการของแก๊สเฟส[7]

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐาน คือต้องมีการกระตุ้นแก๊สเฟสด้วยพลังงานสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่าง คือ ทำให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิว และแยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นสูงของแก๊สเฟสของอะตอมไฮโดรเจน

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

จากแผนภาพในรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ CVD สารเข้าทำปฏิกิริยาหรือแก๊สที่ใส่เข้าไปคือแก๊สผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ Hot filament และ Plasma สารเข้าทำปฏิกิริยาที่เข้าไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงหรือพลังงานสูงจะถูกกระตุ้นภายในบริเวณนั้น ปฏิกิริยาเคมีเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10^{-9} วินาที และเกิดการชนกันของแก๊สในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้เวลาดั้งแต่ 10^{-4} ถึง 10 วินาที จากนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่างๆจะถูกส่งผ่านโดยการไหล การแพร่ และการพาจากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังฐานรอง ที่บริเวณใกล้ฐานรองการแพร่จะเข้าสู่บริเวณที่การไหลหยุดนิ่งซึ่งเรียกว่าชั้นขอบเขต(Boundary layer) พื้นผิวฐานรองเกิดการดูดกลืน การคาย การแพร่ที่พื้นผิวหรือเข้าไปในเนื้อสารและเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นประโยชน์ต่อการเกิดเพชรและมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆเป็นฟังก์ชันซับซ้อนกับอุณหภูมิ โครงสร้างและองค์ประกอบของพื้นผิว นอกจากนี้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD คาร์บอนที่เกิดขึ้นสามารถจับตัวเป็นพันธะเคมีได้หลายสถานะพลังงานทั้งแบบ sp^1 , sp^2 , หรือ sp^3 หากแต่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง เช่น อุณหภูมิความดัน โหมดการกระตุ้น ความเข้มข้นของแก๊สที่ใช้ หรือแม้แต่ว่ารูปทรงของเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 18 แสดงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ CVD ของเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ปฏิริยาที่ไร้หลอด

Langmuri เป็นคนแรกที่ค้นพบการแตกตัวของไฮโดรเจนบนไร้หลอดทั้งสแตนท์ที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งทำให้เกิดอะตอมไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพ ต่อมาจึงได้มีการนำมาใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรโดยทำเป็นเครื่องปฏิกรณ์ ชนิด Hot filament ขึ้น Jansen et al. [3] ได้ศึกษาถึงการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนที่บริเวณไร้หลอด โดยอาศัยความแตกต่างของกำลังงานที่ใช้ไปโดยไร้หลอดในสภาวะสุญญากาศ และในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน วัดค่าของอัตราการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนพบว่า อัตราการแตกตัวขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของไร้หลอดและจากการวิเคราะห์อัตราของอะตอมไฮโดรเจนที่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่นๆอีก ตัวอย่างเช่น สัมประสิทธิ์ การแพร่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดและค่าคงที่อัตราการแตกตัว

2.4.3 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 โดยอัตราการเกิดเพชรจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่า 1,000 องศาเซลเซียส

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

2.4.4 บทบาทของแก๊สไฮโดรเจน

การเกิดเพชรจากอนุมูลของคาร์บอนมักจะพบแกรไฟต์ซึ่งเป็นพันธะ sp^2 อยู่เสมอ อะตอมไฮโดรเจนจะช่วยให้เกิดความเสถียรในสภาวะของเพชรมากกว่าแกรไฟต์ เนื่องจากสมดุลงานหนาแน่นสูงของอะตอมไฮโดรเจนที่บริเวณพื้นผิวการเกิดมีคุณสมบัติในการกักและกำจัดแกรไฟต์ อะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชรซึ่งมี Dangling bond จะถูกจับโดยอะตอมไฮโดรเจน ป้องกันการเปลี่ยนพันธะจาก sp^3 ไปเป็น sp^2 หรือ sp^1 ซึ่งพันธะ sp^3 แม้ว่าจะต้องใช้พลังงานสูงกว่าในการทำไฮบริไดเซชัน (Hybridization) แต่เมื่อสร้างพันธะแล้วจะคายพลังงานออกมามากกว่าที่ใช้ไปทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมอยู่ในแนวมุมของทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) แต่ละไฮบริดออร์บิทัล (Hybrid orbital) จะทำมุม 109.5° ซึ่งกันและกันดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมีการเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Promotion)

อะตอมไฮโดรเจนยังมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดเพชรโดยจะเป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนที่จับตัวเป็นพันธะ C-H กับอะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชรให้พร้อมที่จะรับอะตอมคาร์บอนตัวใหม่เพิ่มเข้าไป โดยอะตอมคาร์บอนในพันธะระหว่าง C-H เมื่อสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนออกไปจะเป็น C_2^* ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



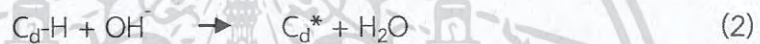
เมื่อ C_d คือ อะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของผลึกเพชร

C_d^* คือ อะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าของผลึกเพชรที่ถูกกระตุ้น

2.4.5 บทบาทของแก๊สออกซิเจน

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

บทบาทหลักๆ ของออกซิเจนคือช่วยทำให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมามีคุณภาพดี เป็นที่เชื่อกันว่าหากเราผ่านอนุมูลของแก๊สออกซิเจน เช่น O^{2-} , O_2 หรือ OH เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนโครงสร้างอื่น และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น อนุมูล OH สามารถกระตุ้นอะตอมคาร์บอนบริเวณผิวดังสมการ

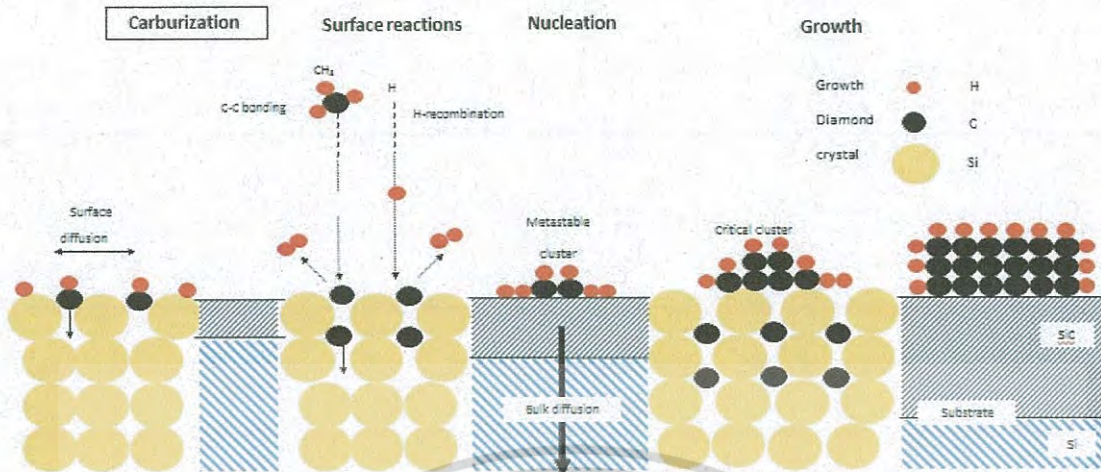


อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาจากสมการ (2) ยังไม่มีความสำคัญเท่ากับสมการ (1) ส่วนหน้าอื่นๆของออกซิเจนที่มีผู้ศึกษาไว้ได้แก่ Kawato et al. เสนอว่าออกซิเจนมีคุณสมบัติที่จะลดความหนาแน่นของอะเซทิลีน ซึ่งถูกสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดแกรไฟต์และอสัณฐานคาร์บอน

2.5 ปฏิกิริยาการนิวเคลียชัน[8]

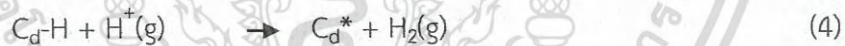
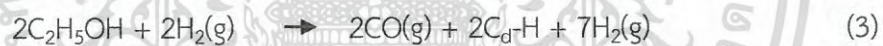
ปรากฏการณ์การนิวเคลียชันของเพชร CVD เป็นปรากฏการณ์การก่อตัวเริ่มต้นของแก๊สเฟสเป็นผลึกเพชร ตามด้วยการเกิดไฮโมอิตีแทกเซียล การเกาะตัวของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวเพื่อเพิ่มขนาดของก้อนเนื้อสาร เป็นปรากฏการณ์การสร้างนิวเคลียสเริ่มต้นโดยขนาดของนิวเคลียสต้องมีขนาดมากกว่าขนาดวิกฤต สามารถคงอยู่และเสถียรได้นานพอที่จะทำให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของอนุภาคที่ประกอบกันขึ้นจนมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของระบบเป็นลบเพื่อให้สามารถเกิดกระบวนการขึ้นได้ ซึ่งระบบนี้หมายถึงฐานรองอนุภาคที่เกิดขึ้นและแก๊สเฟส

เมื่ออนุภาคอิสระของแก๊สเฟสแพร่เข้าไปบนพื้นผิวฐานรองจะก่อตัวกันด้วยพันธะ sp^2 เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบวงแหวน(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons ; PAHs) อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่ฐานรองจนถึงค่าหนึ่งซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบางๆที่เรียกว่า Intermediate layer เมื่ออะตอมคาร์บอนเกาะตัวกันมากพอ จะเกิดขึ้นตอนการเกิดเพชรพันธะ sp^2 เปลี่ยนรูปเป็นพันธะ sp^3 โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวช่วย กลไกการนิวเคลียชันและการเกิดชั้น Intermediate layer เป็นดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 กลไกการนิวเคลียสไอออนและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง

ระหว่างการนิวเคลียสไอออนของเพชรซึ่งเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของนิวเคลียสของแกรไฟต์ ความเสถียรของนิวเคลียสไอออนของเพชรเป็นการกำจัดคาร์บอนพันธะ sp^2 ออก จะต้องมิโมเลกุลไฮโดรเจนจำนวนมากซึ่งมีความอึดตัวอย่างยิ่งยวดและความอึดตัวอย่างยิ่งยวดของไฮโดรเจนอะตอมจากการกระตุ้นของแก๊สเฟสด้วยสัฟฟลอนไดรอน โมเลกุลของไฮโดรเจนจะไปช่วยลดความดันย่อยของแก๊สเฟสที่จะเกิดการนิวเคลียสไอออนแกรไฟต์และอะตอมไฮโดรเจนอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮโดรเจนที่ล้อมรอบโมเลกุลของแก๊สและพื้นผิวของแข็ง เพื่อจัดตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรเจน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



หลังจากที่เกิดผลึกเพชรแล้วพื้นผิวฐานรองจะถูกปกคลุมด้วยผลึกและพอร์มตัวเป็นฟิล์มหลายรูปต่อไป ขนาดของผลึกและรูปร่างของผลึกถูกจำกัดด้วยผลึกซึ่งกันและกันเองฟิล์มหลายรูปที่ต่อเนื่องจะมีขนาดผลึกที่เล็กแต่มีความหนาแน่นสูง ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอ การนิวเคลียสไอออนจะหยุดลงขณะที่เกิดผลึกโดยการแพร่คาร์บอนบนฐานรองหรือบนพื้นผิวของผลึกและมีการเพิ่ม Active Sites บนผลึกที่เกิดขึ้นแล้ว ผลึกบนฐานรองจากความหนาแน่นการนิวเคลียสไอออนที่ต่ำจะอยู่โดดเดี่ยวและมีแนวโน้มใหญ่กว่าด้วยการกระจายขนาดที่กว้างกว่า

จากที่กล่าวมาข้างต้นชนิดฐานรองและการเตรียมฐานรองเบื้องต้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อการนิวเคลียสไอออนและการก่อตัวของผลึกในขั้นแรก ทั้งฐานรองที่เป็นเพชรธรรมชาติและวัสดุที่ไม่ใช่เพชร การนิวเคลียสไอออนบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรส่วนใหญ่ถูกเหนี่ยวนำโดยการสร้างรอยขีดข่วนด้วยผงเพชร (หรือ SiC, Cubic Boron Nitride [c-BN] แต่มีประสิทธิภาพด้อยกว่า) และบนฐานรองที่มีการพอร์มตัวของคาร์ไบด์ทำให้เกิดความหนาแน่นของการนิวเคลียสไอออนสูงสุดและอัตราการก่อตัวมากที่สุดและใช้เวลาน้อย ขณะที่อัตราการนิวเคลียสไอออนบนฐานรองผลึกเดี่ยวต่ำกว่าฐานรองหลายรูปของ Cu, Ag, Au, Cu/Ni alloys จะเท่ากับบนออกไซด์ SiO₂ และ Al₂O₃ โดยในการเกิดนิวเคลียสไอออนบนพื้นผิวฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันและรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน จะเกิดการฟอร์มตัวที่พื้นผิวฐานรองได้หลายรูปแบบ ตามตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของฐานรองออกเป็น 3 ประเภท คือประเภทแรกที่เกิดปฏิกิริยากับฐานรองน้อย ประเภทที่สองอะตอมคาร์บอนสามารถแทรกเข้าไปยังเนื้อฐานรองได้ และประเภทสุดท้ายเกิดการฟอร์มตัวระหว่างอะตอมคาร์บอนและฐานรอง

ตารางที่ 3 ชนิดของฐานรองเมื่อแบ่งตามการฟอร์มตัวของชั้นอินเตอร์มีเดียท [8]

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	
- Metallic	Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Fe, Co, Ni (metastable)
- Covalent	B, Si, etc.
- Ionic	Al, Y, rare earth metals, etc.

2.6 กระบวนการโต[9]

หลังจากเกิดการนิวเคลียสชั้นบนฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชร ปฏิกิริยาการโตที่ตามมาคือการโต (Growth) ซึ่งการเกิดและการโตขึ้นของผลึกเพชรอย่างต่อเนื่องจนทำให้ได้ชั้น โยโมอิพิแทกเซียล เกิดขึ้น โดยมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางไดนามิกส์ของพื้นผิวเพชรในสิ่งแวดล้อมของการโตนั้น เป็นกุญแจสำคัญในการสร้างความเข้าใจกระบวนการ 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 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

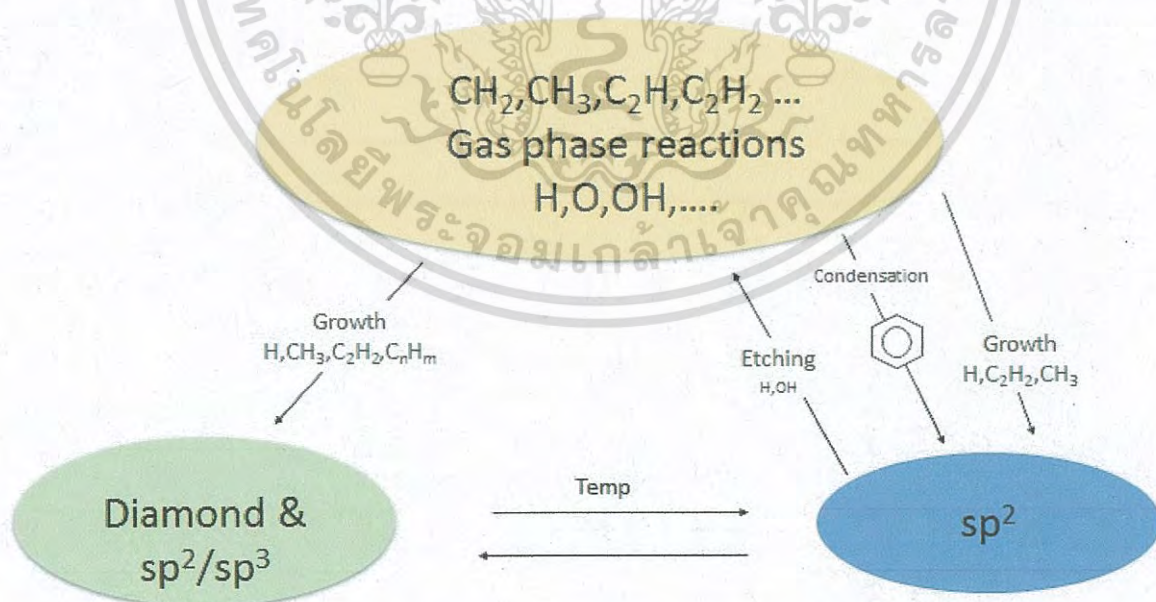
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ex situ ใช้ Mass spectroscopy กับวิธี HFCVD ซึ่งเป็นการศึกษาการเปลี่ยนกลับไปมาของ CH_4 หรือ C_2H_2 ไปสู่ CH_4 และ C_2H_2 สิ่งสำคัญคืออัตราส่วน CH_4 ต่อ C_2H_2 ในแก๊สที่ปล่อยทิ้งจากเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิให้ตลอด ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบที่พื้นผิวให้ตลอด

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 โดยสมมติให้แกรไฟต์หรือคาร์บอนรูปอื่นๆขึ้นอยู่กับ การก่อตัวจากสารละลายของแก๊สที่อิ่มไปด้วยคาร์บอนและอะตอมไฮโดรเจนที่อุณหภูมิการเกิดของฐานรอง การก่อตัวและการกัดของคาร์บอนสำหรับแต่ละรูปแบบของคาร์บอนที่เป็นของแข็งจะอยู่ในสมดุลไดนามิกส์ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 แบบจำลองการก่อตัวของไอเคมีของเพชรซึ่งจะก่อตัวเป็นคาร์บอน sp^2 หรือ sp^3 เอกสารนี้เผยแพร่โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อประโยชน์สาธารณะ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอิมิตัวของคาร์บอนจะเป็นแรงขับเคลื่อนสำหรับการควบแน่นของคาร์บอนในหลายรูปแบบรวมทั้งเพชรด้วย ขณะที่อะตอมไฮโดรเจนในบรรยากาศจะช่วยเปลี่ยนคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชรโดยการกัด และ/หรือเปลี่ยนรูปพื้นผิวพันธะ sp^2 ไปสู่ sp^3 อัตราการก่อตัว ความเข้มข้นของส่วนที่ไม่ใช่เพชร และจุดบกพร่องของผลึกจะสูงเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น แบบจำลองนี้เสนอแนะว่า OH หรือ ฮาโลเจนที่เติมเข้าไปจะทำให้เพชรมีคุณภาพสูงขึ้น

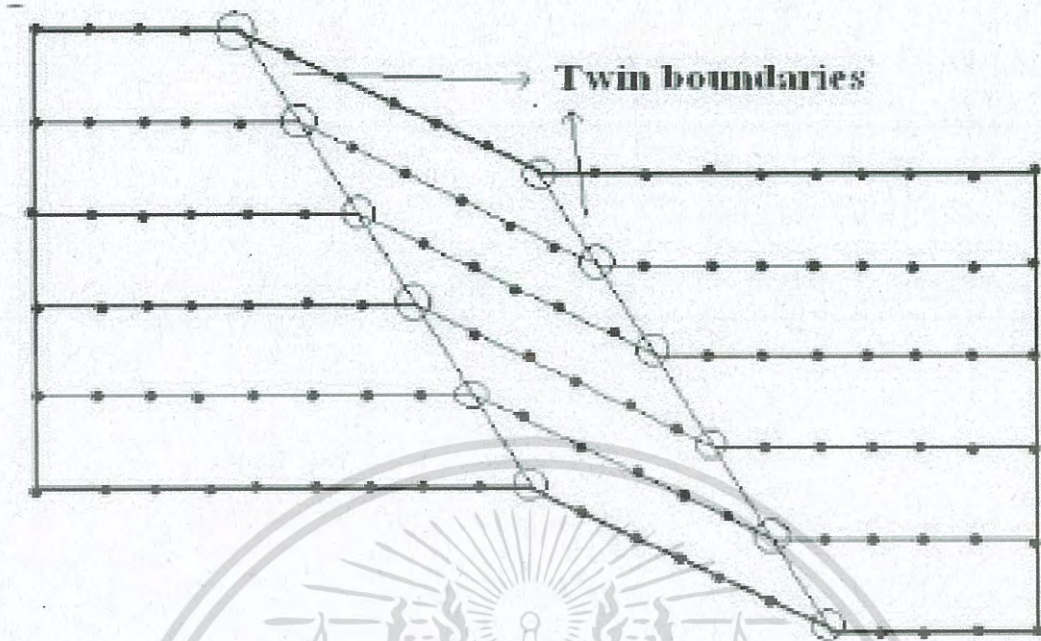
นอกจากนี้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ยังช่วยอธิบายเกี่ยวกับสมดุลสำหรับพื้นที่ผิวคาร์บอนของแข็ง และสปีชีส์ที่เป็นไอ ทำให้ทราบว่าเกิดการกระตุ้นอะตอมของแก๊สไฮโดรเจนที่บริเวณใกล้กับไส้หลอดของ HFCVD พื้นผิวเพชรที่มีปลายพันธะเป็นไฮโดรเจนจะมีพลังงานต่ำกว่าพื้นผิวที่เป็นแกรไฟต์ ดังนั้นการเกิดเพชรจึงประกอบด้วยเทอร์โมไดนามิกส์ที่ไม่สมดุล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

2.7 ความบกพร่องของผลึก [9]

โครงสร้างของผลึกที่เป็นแลตทิซ แบบเป็นระเบียบนั้น บางครั้งก็เกิดการเบี่ยงเบนไปเรียกว่าความบกพร่อง(Defect) ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารเหล่านั้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของประจุ ความนำความร้อน ความบกพร่องอาจเกิดได้ในหลายรูปแบบคือ

2.7.1 ทวิน

ทวิน เป็นความบกพร่องของผลึกที่มี 2 ส่วนที่สมมาตรกัน จากการหมุนของแกนทวินหรือการสะท้อนกันของระนาบประกอบในลักษณะเป็นภาพเสมือนในกระจกจากสมมุติฐานของแรงเฉือนตามขอบของทวิน เป็นเหตุให้อะตอมถูกเลื่อนตำแหน่งออกไป ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 แสดงลักษณะความบกพร่องแบบทวิน

Stacking faults เกิดเนื่องจากแลตทิซของฐานรองและของการก่อตัวเป็นผลึกไม่พอดีกัน เกิดจากการเกิดช่องว่าง (Vacancy) และเกิดจากบริเวณที่เกิดความเค้น (Stress)

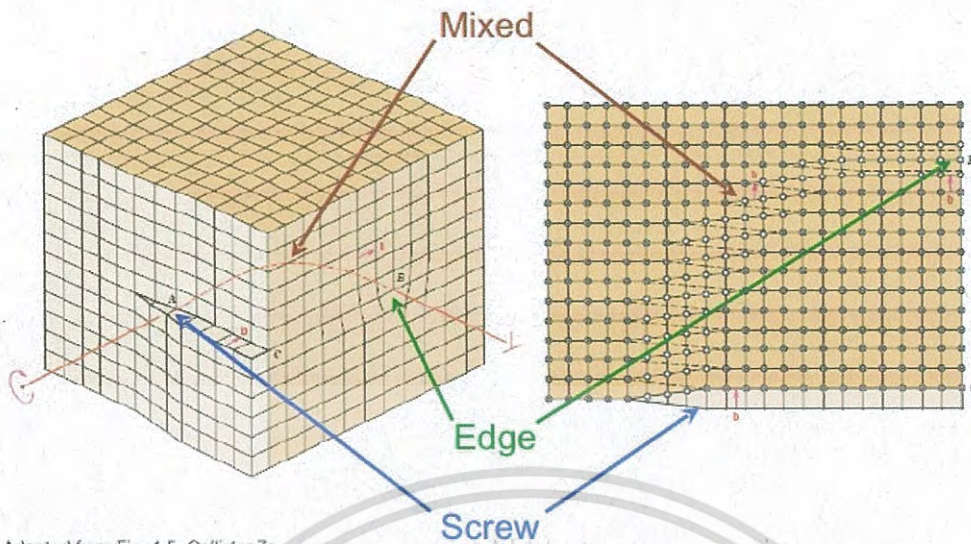
จากรูปที่ 21 แสดงลักษณะของ Stacking fault เมื่อมี Stacking fault 1 คู่ ($n=0$) จะเป็น Stacking fault แบบอินทรินซิก และถ้ามีชั้นปกติแทรกอยู่ด้วย 1 ชั้น ($n=1$) จะเป็นแบบเอ็กทรินซิก ซึ่งถ้า n มีค่ามากกว่า 1 จะเป็นโมโครทวิน และเมื่อ n มีค่ามากๆจะเป็นแถบของทวิน

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

1. Screw dislocation เกิดในผลึกที่สมบูรณ์ที่มีความเครียดเฉือนสวนทางกันในทิศทางตรงกันข้ามทำให้ส่วนของโครงร่างผลึกที่เกิดมีการหดตัวโดยมีลักษณะเป็นรูปทางลาดแบบเกลียวของสกรูดิสโลเคชัน ส่วนที่หดตัวของผลึกยังไม่มีการศึกษาอย่างละเอียด เพียงแต่ทราบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางยาวประมาณสองถึงสามอะตอม ส่วนของความเครียดเฉือนจะเกิดอยู่รอบๆสกรูดิสโลเคชันซึ่งมีพลังงานสะสมอยู่

2. Edge dislocation เกิดในผลึกโดยการแทรกกระนาบส่วนเกินเข้าไปในโครงสร้างใช้เครื่องหมาย T ดังแสดงในรูปที่ 2.15(b) แสดงถึงเอ็ดจ์ดิสโลเคชันที่เป็นค่าลบ ตัวที่หัวกลับ แสดงถึงเอ็ดจ์ดิสโลเคชันค่าบวก โดยมีความเค้นของแรงอัดในบริเวณที่มีอะตอมเกินเข้ามาและมีส่วนที่เป็นความเค้นของแรงดึงในบริเวณกระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Adapted from Fig. 4.5, Callister 7e.

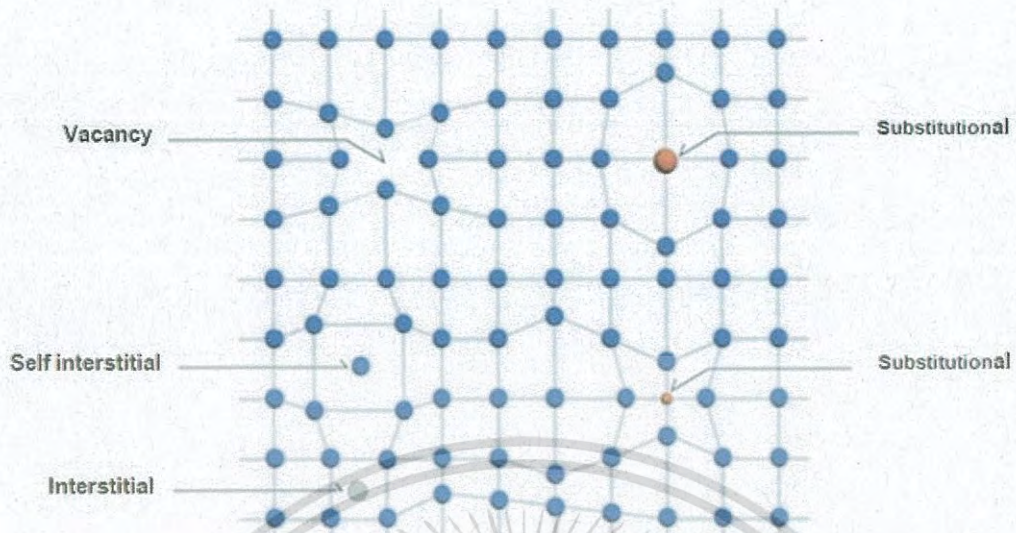
รูปที่ 22 แสดงลักษณะของ Dislocation (a) Screw dislocation (b) Edge dislocation (c) Mixed dislocation

สไลด์เคชันของผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบผสม มีส่วนประกอบที่เป็นทั้งแบบเอ็ดจ์และแบบสกรู ในเส้นโค้งดิสโลเคชัน AB รูปที่ 22 (c) เป็นแบบสกรูที่ด้านซ้าย ส่วนที่เป็นเส้นโค้งชี้เข้าไปในผลึกและเป็นแบบเอ็ดจ์บนด้านขวาเมื่อส่วนที่ทะลุออกจากผลึก จะเห็นว่าในผลึกจะเป็นดิสโลเคชันแบบผสม

2.7.2 ความบกพร่องแบบจุด (Point defect)

ความบกพร่องแบบจุดเป็นความบกพร่องที่สมดุลตรงข้ามกับความบกพร่องแบบระนาบและแบบดิสโลเคชัน เกิดขึ้นได้หลายแบบทั้งการที่อะตอมหายไปจากตำแหน่งในแลตทิซแล้วเกิดเป็นจุดว่าง (Vacancy) ขึ้น ซึ่งจุดว่างเหล่านี้จะเกิดขึ้นจากการรบกวนเฉพาะที่ระหว่างที่ผลึกโตขึ้นหรือเกิดจากการจัดตัวของอะตอมเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอะตอมเอง และนอกจากนี้ความบกพร่องแบบจุดยังเกิดได้จากการเกิดเป็น Interstitial ของสารเอง หรือเกิดจากอะตอมของสารอื่นๆ ที่เจือเข้าไปแทนที่ (เช่น โบรอน หรือไนโตรเจน) หรือเจือเข้าไปเพื่อทำให้เกิดเป็น Interstitial lattice site (เช่น ไฮโดรเจน หรือลิเทียม) คุณสมบัติที่สำคัญของเพชรที่ขึ้นอยู่กับความบกพร่องแบบจุดคือพิภัก ความต้านทาน ความนำความร้อน ความนำไฟฟ้า ความคล่องตัวประจุพาหะ สี และการส่องสว่าง แสดงดังรูปที่ 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 23 ลักษณะความบกพร่องแบบจุดชนิดต่างๆ [12]

2.7.3 Non-diamond carbon phases

เนื่องจาก CVD คือกระบวนการสังเคราะห์ที่มีการแข่งขันกันเกิดคาร์บอนในหลายรูปแบบ รวมกันทั้งเพชรซึ่งมีพันธะแบบ sp^3 tetrahedral อสังฐาน หรือ DLC และแกรไฟต์ซึ่งเป็นโครงสร้าง ข่ายพันธะ sp^2 จึงเกิดความบกพร่องขึ้นในผลึกเพชรได้จากแทรกตัวของคาร์บอนรูปอื่น เป็นเหตุให้ เกิดการเลื่อนของตำแหน่งของอะตอมคาร์บอนรอบๆ และเกิดความเครียดขึ้น ความบกพร่องชนิดนี้ ตรวจพบได้โดยใช้เทคนิค Raman spectroscopy ซึ่งจะให้ตำแหน่งของยอดต่างกันไปตามชนิดของ คาร์บอน

2.7.4 ความบกพร่องอื่นๆ

2.7.4.1 ขอบของเกรน (Grain boundaries)

ขอบเกรนเป็นความไม่สมบูรณ์ของพื้นผิวในวัสดุแบบหลายผลึก ขอบเกรน จะแบ่งเขตระหว่างเกรน(ผลึก) ซึ่งจะมีการจัดตัวที่แตกต่างกัน และเนื่องจากแนวโน้มที่จะเกิดนิวคลีเอชันท์และโตขึ้นในสามมิติเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากมีพลังงานพื้นผิวที่สูง (อยู่ในช่วง $5.3-9.2 \text{ J.m}^{-2}$) เมื่อ กลุ่มก้อนเกาะกันรูปแบบของขอบเขตระหว่างกลุ่มก้อนเหล่านี้หรือจากเกรนเหล่านี้จะเป็นผลให้เกิดฟิล์มหลายรูปขึ้น ระหว่างสภาวะการนิวคลีเอชันท์และการโตขึ้นของผลึกจะมีโครงสร้างขนาดเล็กของฟิล์มเพชรที่โตขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดสภาวะที่มีพลังงานเกินเนื่องจากรูปแบบของขอบเขตเกรนซึ่งต้องมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่มีความคล่องตัวของอะตอมจะเป็นไปได้ ผลจากวิวัฒนาการเหล่านี้คือ เกรนของเพชรจะแข่งขันกันเรียงตัวจากพลังงานต่ำออกไปด้านนอกขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของกระบวนการทั้ง การจัดเรียงตัวแบบสุ่มและจัดเรียงตัวแบบฟิล์ม

2.7.4.2 พื้นผิวและรอยต่อ (Surface and interface)

สำหรับรอยต่อหรือพื้นผิวด้านที่ติดกับฐานรอง โครงสร้างต่างๆจะขึ้นอยู่กับ พารามิเตอร์ของกระบวนการสร้างเช่น ความเข้มข้นของมีเทน การไบอัส และชนิดฐานรองที่ใช้

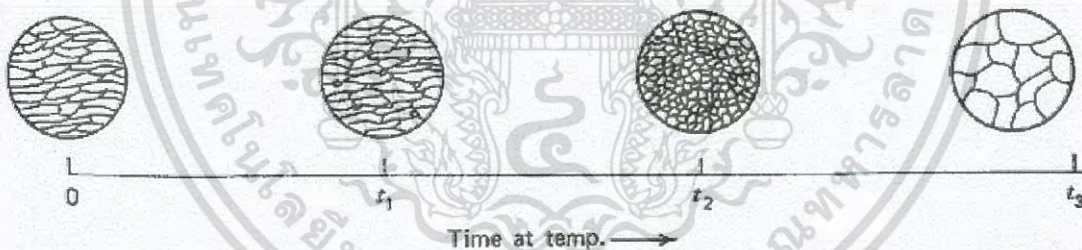
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วพื้นผิวด้านที่ติดกับฐานรองจะมรขนาดเกรนละเอียดกว่าพื้นผิวด้านที่เกิดการโตขึ้นของฟิล์มเพชรซึ่งจะมีความหนาแน่นของความบกพร่องสูงกว่า การยึดเหนี่ยวกันทางเคมีกับฐานรองขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีระหว่างฟิล์มและฐานรองระหว่างสภาวะการโตของผลึกในช่วงแรก รอยต่อที่ต่างชนิดกันจะทำให้เกิดความไม่พอดีเป็นแถวของ Dislocation ขึ้น ส่วนใหญ่ในกรณีของระบบเพชร/ซิลิกอนและ เพชร/โมลิบดีนัม จะเกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากโครงสร้างของเพชรและซิลิกอนหรือโมลิบดีนัมนั้นต่างกัน ทำให้กระทบต่อโครงสร้างและทำให้เกิดความเค้นในฟิล์มเพชรขึ้น

2.8 การแอนนیل (Annealing)[10]

การแอนนیلเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับวัสดุเพื่อจุดประสงค์ในการลดความเค้นหลังจากที่วัสดุสารผ่านการทำงานในภาวะที่มีอุณหภูมิเย็นหรือร้อน เพื่อปรับปรุงให้วัสดุสารเกิดความผิดเพี้ยนจากดิสโลเคชันหรือความบกพร่องแบบจุดลดลง และเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติอื่นๆ เช่น คุณสมบัติเชิงกล เป็นต้น โดยกระบวนการนี้จะประกอบด้วย 3 สภาวะ คือ Recovery, Recrystallization และ Grain growth

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



รูปที่ 24 สภาวะ Recovery (a) การจัดเรียงตัวของเกรนเริ่มต้น (b) ระหว่าง Recovery

Recrystallization stage เกิดขึ้นเมื่อ Recovery สิ้นสุดลง มีการจัดเรียงตัวของนิวเคลียสไอด์ของเกรนใหม่เริ่มขึ้นที่ขอบเกรนเดิม เป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงการเริ่มต้นของสภาวะการเกิดผลึกใหม่ โดยขนาดเกรนของผลึกที่จัดเรียงตัวใหม่จะขึ้นอยู่กับจำนวนเกรนที่ผิดเพี้ยนไป อุณหภูมิการแอนนิลเวลาในการแอนนิล และส่วนประกอบภายในเนื้อสารเอง โดยปกติแล้วอุณหภูมิที่ทำให้ความคล่องตัวของอะตอมเพียงพอที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลได้จะมีค่าประมาณหนึ่งในสามถึงครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลวสัมบูรณ์ (Absolute melting point) โครงสร้างในระดับจุลภาคของสภาวะนี้แสดงได้ดังรูป 24 (a)-(d) ในช่วงแรกเกรนที่ไม่มีความเค้นจะเกิดขึ้นที่ขอบเขตของเกรนเดิม และจะโตขึ้นจนระบบเสถียร ความเข้มข้นของเกรนใหม่จะเพิ่มขึ้น

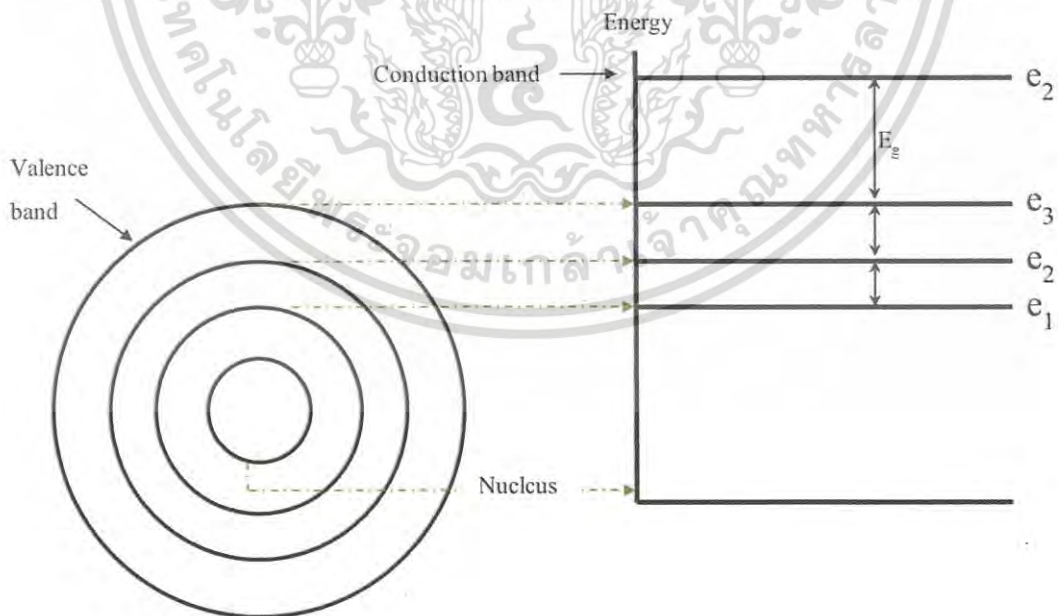
Grain growth เริ่มขึ้นเมื่อการจัดเรียงผลึกชั้นต้นสมบูรณ์ พลังงานที่ร่อยต่อระหว่างเกรนจะน้อยที่สุด ทำให้เป็นสภาวะที่ระบบมีความเสถียรมากที่สุด ซึ่งสภาวะนี้ดูคล้ายกับว่าเป็นสภาวะที่พยายามลดพื้นที่ผิวของเกรนรวมลงอีกด้วย

2.9 ระดับพลังงาน[11],[12]

อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสในแต่ละชั้นของวงโคจร จะมีพลังงานแยกออกจากกันเป็นอิสระ อิเล็กตรอนยิ่งอยู่ห่างจากนิวเคลียสมากเท่าใด ระดับพลังงานก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น อิเล็กตรอนใดที่แยกออกจากอะตอมเดิมของมันจะมีระดับพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนที่ยังคงหมุนอยู่รอบนิวเคลียส

พลังงานของวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ใช้ในการยึดเกาะติดกันไว้ระหว่างอะตอม เรียกว่า พลังงานวาเลนซ์ (Valence energy) ส่วนพลังงานที่จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนหลุดออกนอกวงโคจรได้ เรียกว่า พลังนำกระแส (Conduction energy) ดังนั้น ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานนำกระแส มากกว่าพลังงานวาเลนซ์ อิเล็กตรอนก็จะหลุดจากวงโคจร กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) และเกิดการไหลของอิเล็กตรอน

การพิจารณาระดับพลังงานของอิเล็กตรอนขณะเคลื่อนตัวอยู่ภายใต้อะตอมและการหลุดวงโคจรจากอะตอมจะง่ายมากขึ้น ถ้าพิจารณาในรูปของ แถบพลังงาน (energy band)



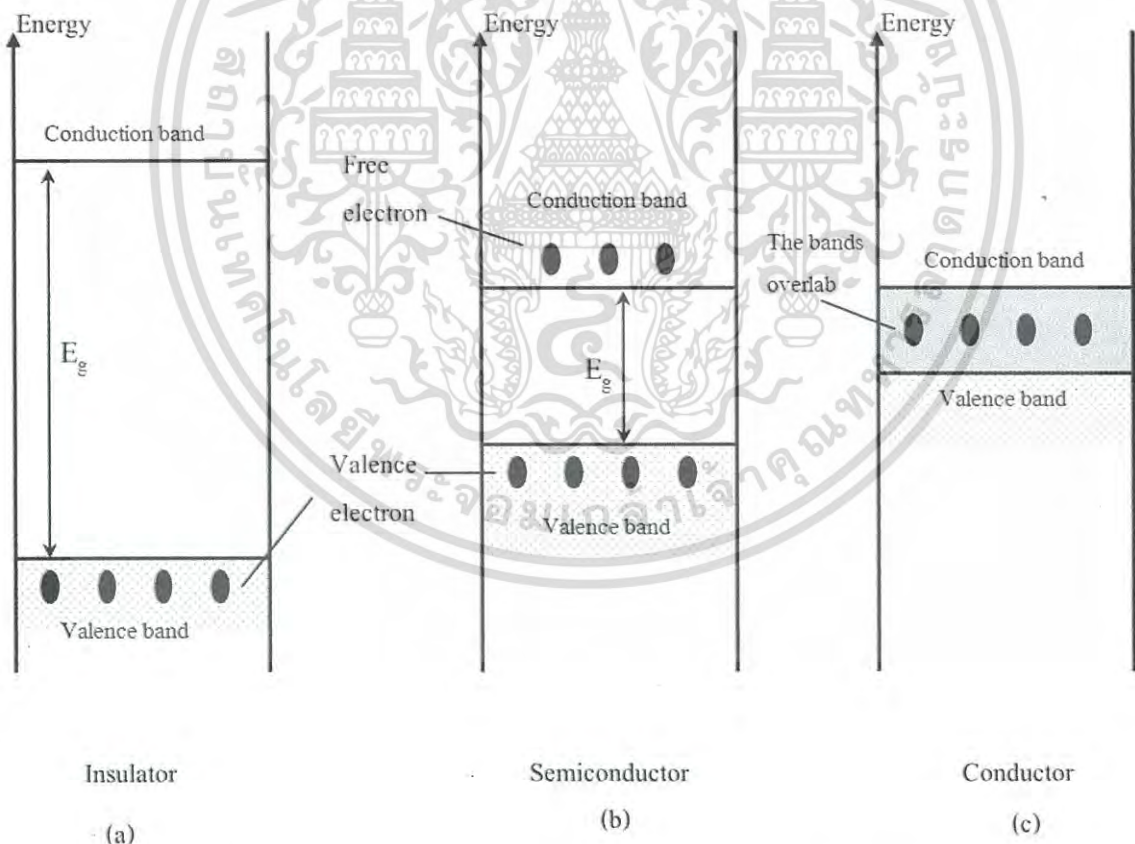
รูปที่ 25 แสดงวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ละชั้น และ แถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 25 จะเห็นวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ละชั้นมีระดับพลังงานแตกต่างกัน จึงแทนได้ด้วยแถบพลังงานที่แตกต่างกัน

ในสภาพปกติ วาเลนซ์อิเล็กตรอนยังหมุนรอบอะตอม ระดับพลังงานวาเลนซ์ ต้องอยู่ในแถบพลังงานที่เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band)

ฉนวนมีพลังงานในแถบวาเลนซ์ต่ำกว่าพลังงานใน แถบนำกระแส (conduction band) อย่างมากหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ฉนวนมีค่าพลังงานในแถบวาเลนซ์กับแถบนำกระแสแตกต่างกันมาก พลังงานที่แตกต่างกันระหว่างพลังงานในแถบวาเลนซ์กับแถบนำกระแส เรียกว่า พลังงานช่องว่าง (energy gap ; E_g) วัสดุที่เป็นฉนวน จึงมีค่าพลังงานช่องว่าง (E_g) สูงกว่าวัสดุ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งมีค่าพลังงานช่องว่าง (E_g) สูงกว่าวัสดุตัวนำ (conductor) ที่มีแถบวาเลนซ์และแถบนำกระแสเหลื่อมซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 26 ดังนั้น เมื่อจ่ายพลังงานจากภายนอกเพียงเล็กน้อยให้แก่วัสดุตัวนำก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในวัสดุ ส่วนวัสดุสารกึ่งตัวนำจะต้องจ่ายพลังงานจากภายนอกมากกว่าตัวนำจึงจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในวัสดุได้



รูปที่ 26 แสดงแถบพลังงานของ a) ฉนวน b) สารกึ่งตัวนำ c) ตัวนำ

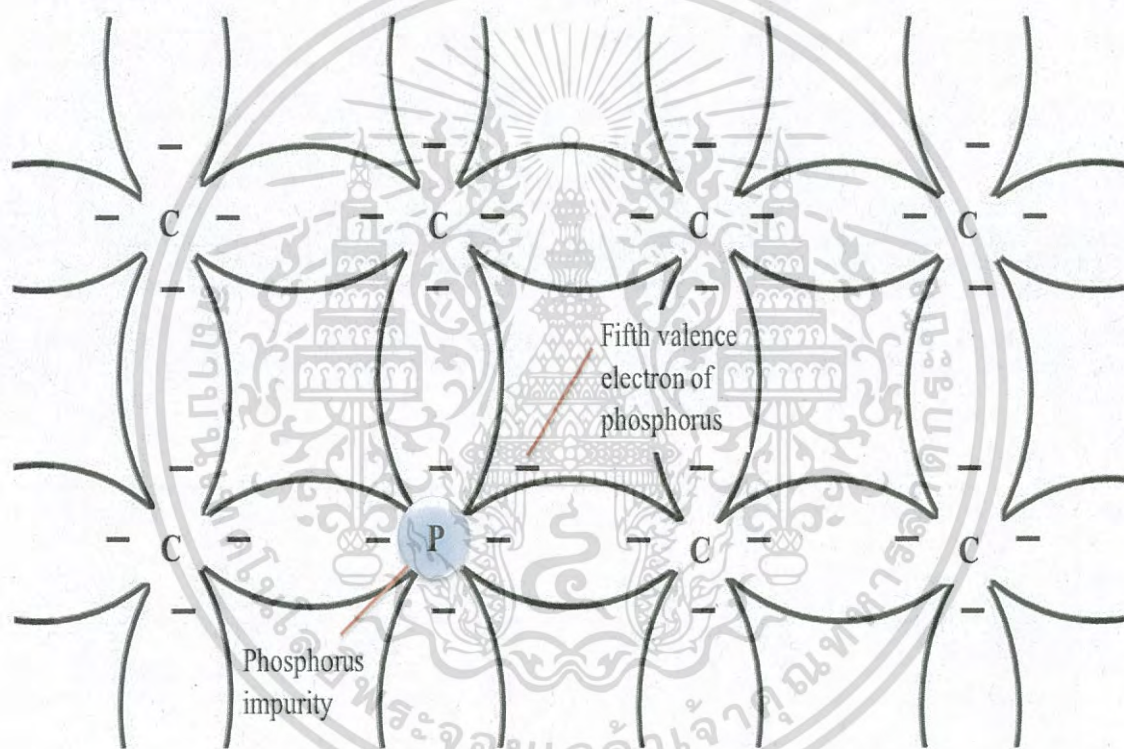
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และ พี[13]

คุณลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการเติมอะตอมสารเจือปน (impurity atoms) เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กระบวนการเติมสารเจือปน (doping process) ถึงแม้ว่าจะเติมอะตอมสารเจือปนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำเพียงเล็กน้อย ก็สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของแถบพลังงานและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้

2.10.1 สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น เกิดจากการอะตอมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น ฟอสฟอรัส แอนติโมนี อาร์ซานิก เป็นต้น ลงใน ซิลิกอน หรือ เพชร บริสุทธิ์

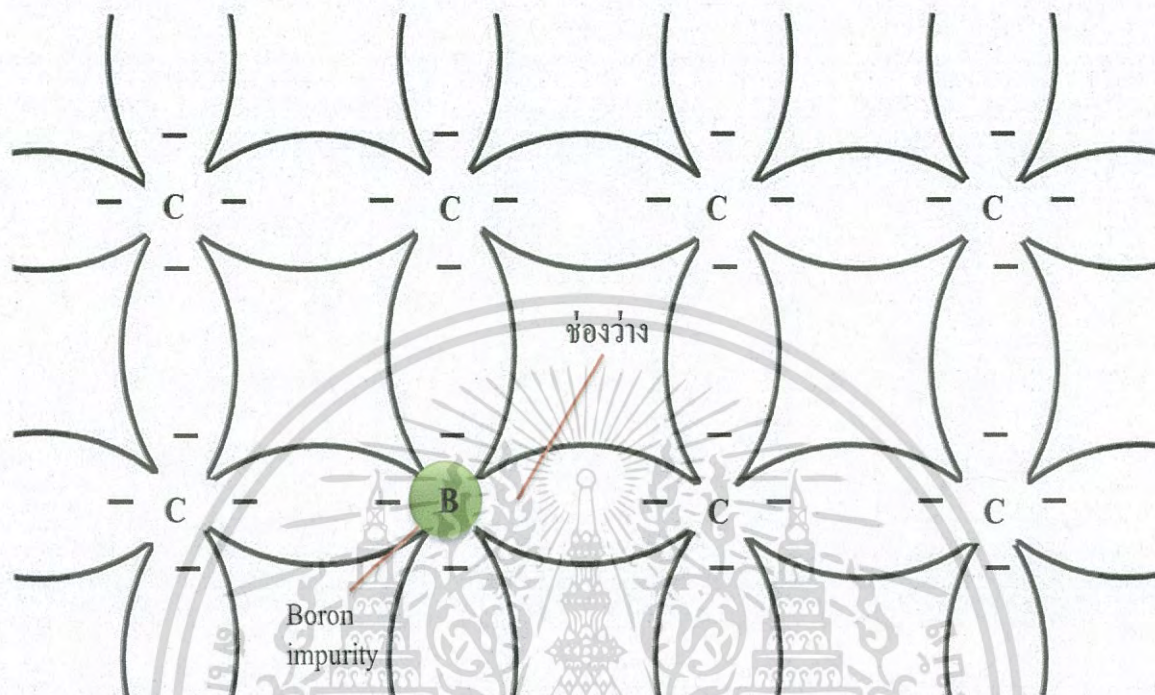


รูปที่ 27 แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่าง อะตอมสารเจือปนชนิด เอ็น และอะตอมสารกึ่งตัวนำ

จากรูป 27 แสดงตัวอย่างการเติมสารเจือปนฟอสฟอรัส (phosphorus impurity ; P) ลงในคาร์บอน วาเลนซ์อิเล็กตรอนของ P จะรวมตัวแบบโคเวเลนซ์บอนด์กับวาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 4 ตัวของ คาร์บอน ส่วนอิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของ P (fifth valence electron of phosphorus) จะไม่มีคู่ ดังนั้น ถ้าจ่ายพลังงานเพียงเล็กน้อย อิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของ P จะหลุดออกจากอะตอม และกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ

2.10.2 สารกึ่งตัวนำชนิด พี[13]

สารกึ่งตัวนำชนิด พี เกิดจากการเติมอะตอมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน (boron) แกลเลียม (gallium) และ อินเดียม (Indium) ลงใน ซิลิกอน หรือ เพชรที่บริสุทธิ์



รูปที่ 28 แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่าง อะตอมสารเจือชนิด พี และอะตอมสารกึ่งตัวนำ

จากรูปที่ 28 เป็นตัวอย่างการเติมอะตอมสารเจือปนโบรอน (boron impurity ; B) ลงใน คาร์บอนวาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 3 ตัวของ โบรอน จะรวมตัวแบบโควาเลนซ์กับวาเลนซ์อิเล็กตรอนของ คาร์บอน การรวมตัวกันระหว่างวาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้งสอง ขาดไป 1 ตัว ทำให้เกิดที่ว่าง หรือ โฮล (hole) และสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก ที่บริเวณดังกล่าว จะเห็นได้ว่าโฮลจะแสดงอำนาจของไฟฟ้าเป็น ประจุบวก

บทที่ 3

กระบวนการสร้างและวิธีการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการสร้างผลึกเพชรชนิด P ขนาดใหญ่ด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบ HFCVD บนฐานรองซิลิกอน จะเป็นการสังเคราะห์ลงบนฐานรองซิลิกอน เริ่มจากการสังเคราะห์เพื่อให้เกิดผลึกเพชรบนฐานรองซิลิกอนที่มีการเตรียมผิวหน้าด้วยการกรัดในรูปของตาราง ก่อนที่จะนำไปสังเคราะห์ต่อเพื่อขยายขนาดและปรับปรุงคุณภาพของผลึก บนฐานรองซิลิกอนที่ไม่ได้ทำการเตรียมผิวหน้า(ขัดมัน) และเมื่อได้ขนาดของผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่แล้วจึงนำผลึกเพชรไปทำการวิเคราะห์ต่อ เช่น วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า อีกทั้งยังมีการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรและชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรอีกด้วย

3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

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

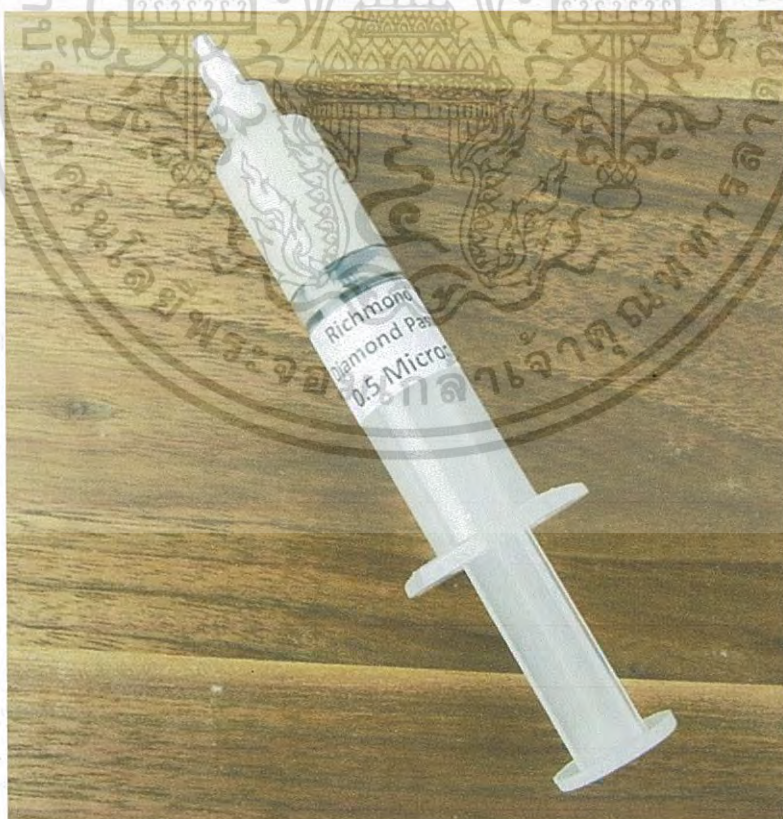
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรและกรีดผิวหน้าให้เป็นตารางด้วยเพชรตัดกระจก กับฐานรองซิลิกอนชนิดมันธรรมดา

หลังจากทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน SiO_2 เป็นที่เรียบร้อยแล้วตามหัวข้อ 3.1.1 แล้ว นำวัสดุฐานรองที่เตรียมไว้มาตัดให้ได้ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยวิธี HFCVD ในชุดทดลองที่วิทยาลัยนานาชาติได้นำเสนอ

จากนั้นทำการแยกฐานรองซิลิกอนออกเป็น 2 ส่วน คือ ชนิดชนิดมันธรรมดา กับขัดหน้าผิวด้วยครีมเพชรและกรีดให้เป็นตารางด้วยเพชรตัดกระจก ส่วนซิลิกอนที่มีการเตรียมพื้นที่ผิว จะนำไปทำการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดผิวหน้าของฐานรองซิลิกอนด้วยครีมเพชรขนาด $0.25 \mu\text{m}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดรอยขีดข่วนสม่ำเสมอทั่วตลอดทั้งผิวหน้าของซิลิกอน จากนั้นนำเพชรตัดกระจกมากรีดให้เป็นตาราง โดยมีระยะห่างประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นทำความสะอาดตามกระบวนการดังต่อไปนี้

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



รูปที่ 29 รูปครีมเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 30 รูปตัวตัดกระจก

3.2 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร

3.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด อินทรีนซิค

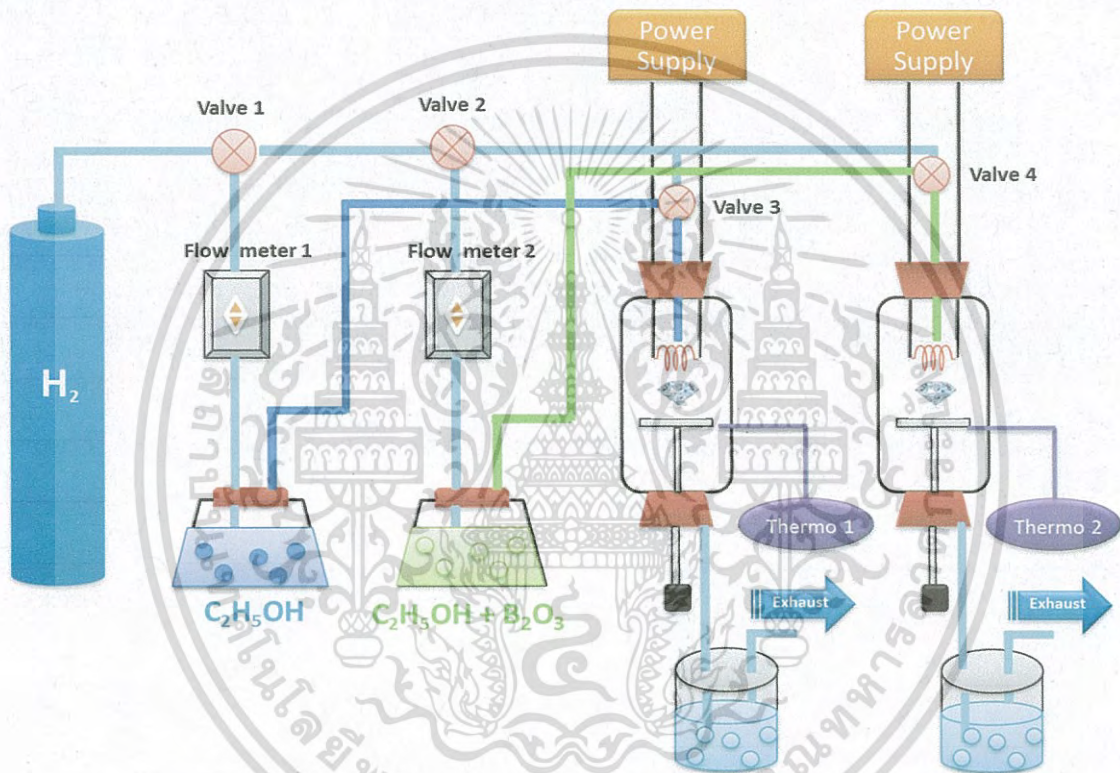
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการสังเคราะห์บนฐานรอง 2 แบบด้วยกัน คือ แบบที่หนึ่งการเตรียมพื้นผิวหน้าของซิลิกอนด้วยการขัดด้วยครีมเพชรและกรีดผิวหน้าของซิลิกอนให้เป็นตาราง ทั้งนี้ต้องการที่จะให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรที่รวดเร็ว เนื่องจากการกระตุ้นให้ฐานรองมีความหนาแน่นของการนิวเคลียสเพิ่มขึ้น การกรีดผิวหน้าให้เป็นตารางนั้นเพื่อที่จะต้องการให้ได้ผลึกเพชรที่สมบูรณ์ตรงบริเวณรอยตัดของตาราง จากนั้นจึงเลือกผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ที่สุดไปทำการสังเคราะห์ต่อเพื่อการขยายขนาดบนฐานรองแบบที่สองคือฐานรองซิลิกอนแบบขัดมันธรรมดา

ซึ่งจากรูปชุดการทดลองที่กล่าวไว้จะมีองค์ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังต่อไปนี้

1. ถังแก๊สไฮโดรเจน
2. Regulator ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของแก๊สไฮโดรเจน
3. Anti flat back ทำหน้าที่ป้องกันการไหลย้อนกลับของแก๊สไฮโดรเจน
4. Flow meter ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ผ่านเข้าไปในแหล่งจ่ายเอทิลแอลกอฮอล์ 2 ชุด
5. แหล่งจ่ายเอทิลแอลกอฮอล์ 2 ชุด
6. Chamber ที่ออกแบบให้ลดการสะท้อนของอุณหภูมิความร้อนที่จากท่อควอทซ์ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร จำนวน 2 ชุด
7. จุกยางขนาด Extra และขนาด No.8 เป็นยางธรรมชาติทนความร้อนสูง ยี่ห้อ As one
8. Power supply 2 ชุด

เอกสารนี้เป็น 9. ท่อที่ปล่อน(ทั้งระบบ) ป้องกันการกักความร้อนของเอทิลแอลกอฮอล์ เพื่อยืดอายุการใช้งาน การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. นาฬิกาจับเวลา
11. พัดลมระบายความร้อน
12. DC-Amp Meter
13. สวิตช์ Power
14. ทังสเตน (ขดลวด) เพื่อใช้ทำ Filament 2 ชุด
15. ขวดใส่น้ำ เพื่อตรวจการไหลออกของแก๊สไฮโดรเจน 2 ชุด
16. Thermocouple วัดอุณหภูมิ 2 ชุด



รูปที่ 31 ระบบ HFCVD อย่างง่าย

จากชุดการทดลองระบบอย่างง่ายดังรูปที่ 31 สามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรได้ โดยใช้กระบวนการดังต่อไปนี้

1. ทำการตรวจสอบระบบต่างๆก่อนทำการทดลอง ดังต่อไปนี้
 - 1.1 ทำการตรวจรอยรั่วในจุดต่างๆของระบบด้วยน้ำสบู่ จากนั้นทดลองปล่อยแก๊สไฮโดรเจน สังเกตฟองอากาศ และเช็ดทำความสะอาดก่อนการทดลอง
 - 1.2 ทำการตรวจแหล่งจ่ายกระแสและมิเตอร์ต่างๆ
2. ทำการเตรียมไส้หลอด โดยทำการสร้างชุดพันไส้หลอด ดังรูป โดยมีแกนกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พันไส้หลอดโดยใช้ลวดทั้งสแตนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร พันให้ได้จำนวนรอบทั้งหมด 30 รอบ
4. จากนั้นยึดออกให้ไส้หลอดนั้นมีความยาว 1.5 เซนติเมตร
5. นำลวดทั้งสแตน 2 เส้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร และยาว 25 เซนติเมตร มางอตรงส่วนของปลายด้านใดด้านหนึ่ง ให้มีลักษณะเป็นรูปตัว L โดยทิ้งมีความยาว 0.5 เซนติเมตร
6. ตัดแผ่นทองแดงหนา 2 มิลลิเมตร ให้มีขนาด 2 ตารางเซนติเมตรและเจาะรูระบายความร้อนทั่วทั้งแผ่น
7. ทำแผ่นโมลิบดินัมตัดขนาด 2 ตารางเซนติเมตร เพื่อที่จะเป็นฐานรองชั้นที่สอง เพื่อรองซิลิกอน
8. ทำเขี้ยวจับ 4 มุม ด้วยโมลิบดินัม เพื่อที่จะยึดซิลิกอนให้ติดกับฐานรองโมลิบดินัมกับทองแดง
9. ทำการประกอบชุดการทดลอง โดยปรับระยะห่างของซิลิกอนกับไส้หลอดให้มีระยะห่าง 2 มิลลิเมตร
10. เปิดวาล์วถังแก๊สไฮโดรเจนปรับ Regulator เพื่อควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ 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°C / 3 นาที
16. ปรับจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ
17. สร้างเพชรตามระยะเวลาที่กำหนด
18. เมื่อครบระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่กำหนดแล้ว ค่อยๆทำการปรับลดกระแสเพื่อให้อุณหภูมิค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ
19. ปิดถังแก๊สและปิดสวิตช์ Power
20. ยังคงเปิดพัดลมระบายความร้อนไว้จนกว่าหลอดทดลองจะเย็นตัวลงอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันการแตกร้าวของทดลองจากการปรับตัวให้เข้ากับอุณหภูมิ
21. รอจนกระทั่งแก๊สในระบบหมด สังเกตจากฟองอากาศในขวดรูปชมพู่
22. เปิดวาล์ว 2 รอจนกระทั่งระบบเย็น ปิดสวิตช์พัดลมระบายความร้อน เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 กระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด P

การสร้างผลึกเพชรชนิด P นั้นมีการสร้างเช่นเดียวกับ กระบวนการสร้างผลึกเพชรชนิด อินทรีนซิค จะแตกต่างกันตรงที่แหล่งจ่ายที่ใช้จะเป็น โบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) ดังรูปที่ 32 สำหรับวิธีเตรียมสารละลายของโบรอนไตรออกไซด์ เจือในเอทิลแอลกอฮอล์นั้น จะต้องมีการคำนวณ ปริมาณโบรอนไตรออกไซด์ และ เอทิลแอลกอฮอล์ ที่ใช้ในรูปแบบของอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ที่มีหน่วยเป็น ppm (part per million) ซึ่งแสดงการคำนวณหาปริมาณโบรอนไตรออกไซด์ ที่ค่า B/C ต่างๆ ในภาคผนวก ข จากนั้นผสมโบรอนไตรออกไซด์ เจือในเอทิลแอลกอฮอล์ ตาม อัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้ เช่น ต้องการความเข้มข้นที่ B/C 50,000 ppm ต้องใช้โบรอนน้ำหนัก 10.0011 กรัม ดังรูปที่ 33 ผสมลงในเอทิลแอลกอฮอล์ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 34 เป็นต้น จากนั้นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารเคมี แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic stirring) ดังรูปที่ 35 จนกระทั่งโบรอนไตรออกไซด์ ละลายหมดที่อุณหภูมิห้อง

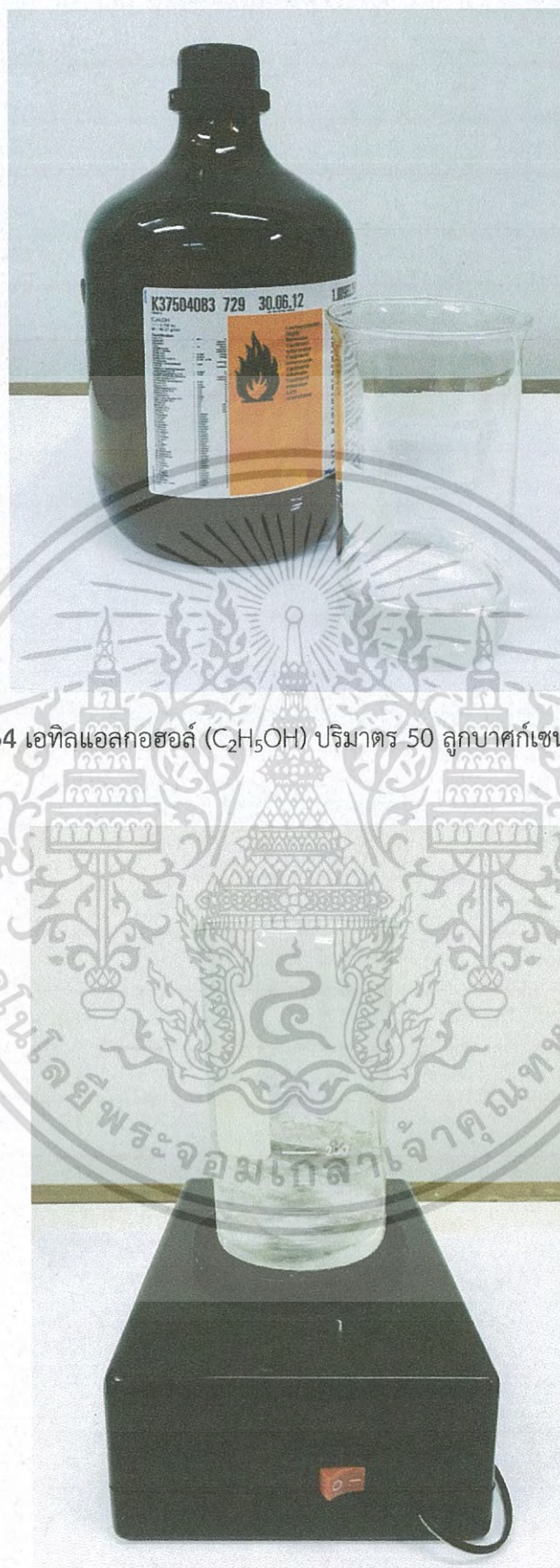


รูปที่ 32 สารเจือโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3)



รูปที่ 33 เครื่องชั่งสารแสดงน้ำหนักของโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 34 เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 35 เครื่องกวนสารเคมีแท่งกวนแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลองสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดอินทรีนซิค และผลึกเพชรชนิด P

3.3.1 การสังเคราะห์เพื่อให้เกิดผลึกเพชรด้วยระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์ผลึกเพชรแบบวิธี HFCVD โดยจะทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิดอินทรีนซิค และผลึกเพชรชนิด P ในการทดลองเดียวกัน ในส่วนของการสังเคราะห์ ผลึกเพชรชนิดอินทรีนซิคนั้นจะไม่ทำการเติมอะตอมสารเจือใดๆเลยลงในเอทิลแอลกอฮอล์ แต่ในส่วนของ การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิด P นั้น จะทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) ในความเข้มข้นรูปแบบของอัตราส่วน B/C 50,000 ppm โดยต้องใช้โบรอนน้ำหนัก 10.0011 กรัม ผสมลงในเอทิลแอลกอฮอล์ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร กวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแบบแท่งกวนแม่เหล็ก ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อสารละลายโบรอนไตรออกไซด์กับเอทิลแอลกอฮอล์ผสมเข้ากันเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำไปทำการสังเคราะห์ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิของฐานรองที่ 900 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองนี้จะทำการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิกอนแบบทำการเตรียมผิวหน้าด้วยการกรีดในรูปแบบของตาราง และมีอัตราการไหลของไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ที่เจือด้วยโบรอนไตรออกไซด์ ที่ 16 ml/min แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ยังได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของผลึก ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนเป็นระยะเวลา 9 นาที 900 องศาเซลเซียส ทุกๆ 12 ชั่วโมงระหว่างการสังเคราะห์ อีกด้วย

เมื่อได้ผลึกเพชรที่มีขนาดตามที่ต้องการเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำผลึกเพชรที่ได้นั้นมาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และยืนยันความเป็นเพชรด้วย Raman Spectroscopy จากนั้นจึงนำผลึกเพชรไปทำการสังเคราะห์ต่อเพื่อทำการเพิ่มขนาดต่อไป

3.3.2 การทดลองเพื่อการปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพชรด้วยวิธีแอนนัล

ในการสังเคราะห์ผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ นั้น จะต้องสังเคราะห์ด้วยระยะเวลาที่นาน สิ่งก็ตามมาก็คือแก๊สและพลังงานที่สูญเสียไปเป็นจำนวนมาก แต่ยังมีอีก 1 ผลกระทบที่มีผลต่ออัตราการเกิดผลึกเพชรใหม่อีกทั้งยังมีส่วนที่ทำให้อัตราการโตของผลึกเพชรน้อยลง นั่นก็คือ แกรไฟท์ จากการทดลองที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพชรระหว่างการสังเคราะห์อยู่แล้ว ทำการแอนนัลที่ 9 นาที ในบรรยากาศของ ไฮโดรเจน (H_2) แต่พบว่า ยังมีแกรไฟท์ที่เกาะอยู่บนผิวของผลึกซึ่งยืนยันด้วย Raman Spectroscopy ซึ่งแสดงใน Raman Spectrum ที่ 1580 cm^{-1}

ในการทดลองนี้จึงได้มีการ ปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพชรก่อนที่จะนำผลึกเพชรนั้นไปทำการสังเคราะห์เพิ่มขนาดต่อ ทั้งนี้ก็เพื่อกำจัดแกรไฟท์ให้หมดไปที่ ด้วยระยะเวลาในการแอนนัลที่นานขึ้นที่เวลา 12 นาที

3.3.3 การทดลองเพื่อเพิ่มขนาดของผลึก

เมื่อได้ผลึกเพชรที่สมบูรณ์แล้ว ทำการคัดเลือกผลึกเพชรชนิดอินทรีนซิค และผลึกเพชรชนิด P ที่มีขนาดใหญ่ มาอย่างละ 1 เม็ด เพื่อมาทำการสังเคราะห์ต่อบนฐานรองซิลิกอนแบบขัดมัน เป็นฐานรองที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ผลึกเพชรในขั้นตอนการเพิ่มขนาดของผลึก ทำการทดลองต่อ

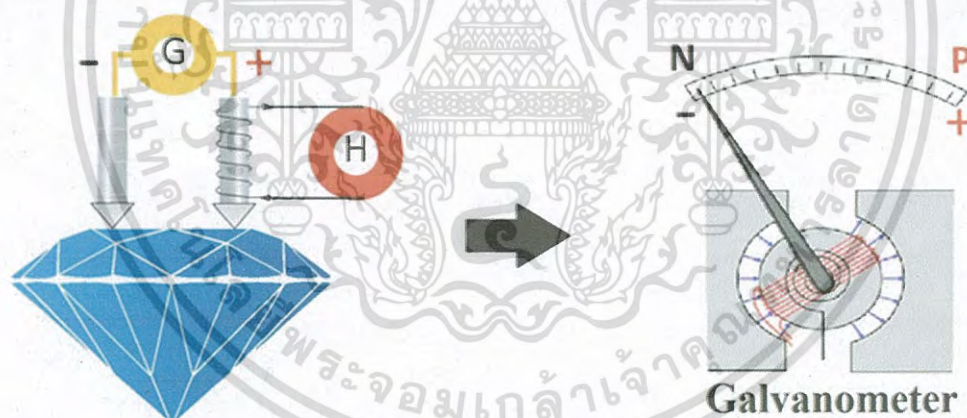
อีก 60 ชั่วโมง พร้อมกับทำการปรับปรุงคุณภาพของผลึก ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนเป็นระยะเวลา 12 นาที 900 องศาเซลเซียส ทุกๆ 12 ชั่วโมงระหว่างการสังเคราะห์

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และยืนยันความเป็นเพชรด้วย Raman Spectroscopy และนำผลึกเพชรไปทำการสังเคราะห์ต่อเพื่อทำการเพิ่มขนาดต่อไปอีกที่ 60 ชั่วโมง รวมเป็นระยะเวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ ที่ 180 ชั่วโมง พร้อมกับทำการปรับปรุงคุณภาพของผลึก ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนเป็นระยะเวลา 12 นาที 900 องศาเซลเซียส ทุกๆ 12 ชั่วโมงระหว่างการสังเคราะห์

และเมื่อทำการสังเคราะห์เสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว นำผลึกเพชรชนิดอินทรินซิก และผลึกเพชรชนิด P ที่สังเคราะห์ มาทำการวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณ ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray (EDX) และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) อีกทั้งยังยืนยันความเป็นเพชรด้วย Raman Spectroscopy

3.4 การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชร ด้วยวิธี Hot Probe

จากการทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอน (B_2O_3) ในอัตราส่วน (B/C) 50,000 ppm. ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) แล้วนำไปทำการสังเคราะห์ที่ได้ผลึกเพชร จึงได้ทำการทดลองชนิดของการไฟฟ้าของผลึกเพชรด้วยวิธี Hot Probe ดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 แสดงอุปกรณ์การหาชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชร

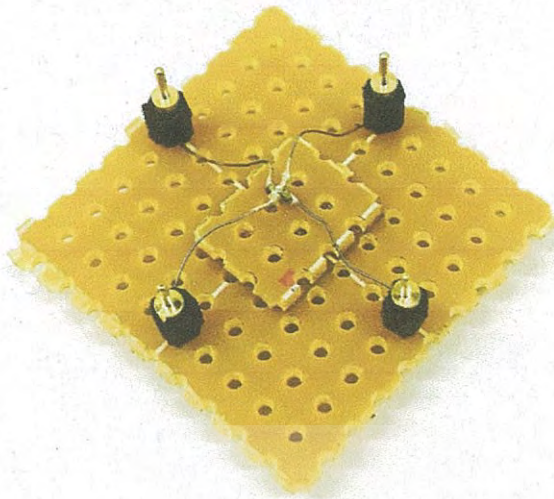
3.5 การทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน

จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิด P ให้มีขนาดใหญ่ เพื่อที่จะให้ได้ผลึกเพชรที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่า ผลึกเพชรชนิดอินทรินซิก ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ดีในอนาคต

และเมื่อทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิด P ที่มีขนาดใหญ่แล้ว จึงนำผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้นั้นมาทำการต่อขั้วโลหะไฟฟ้า โดยใช้กาวเงิน (Silver Paste) จำนวนทั้งหมด 4 ขั้ว แต่อย่างไรก็ตาม

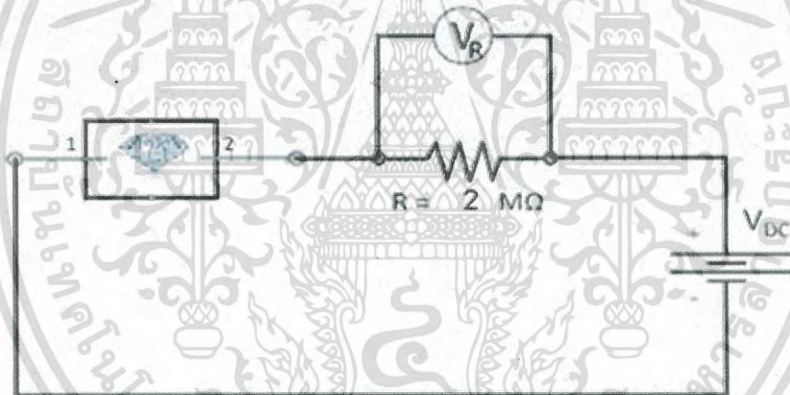
ในการทดลองนี้จะใช้ขั้วไฟฟ้าเพียงแค่ 2 ขั้วเท่านั้นในการทดลอง ตามรูปที่ 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 37 ผลึกเพชรที่ทำการต่อขั้วไฟฟ้า

เมื่อทำการต่อขั้วโลหะไฟฟ้าเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำชุดทดลองนี้มาต่อกับวงจรที่ใช้ในการวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 38



รูปที่ 38 วงจรการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

จากนั้นไบอัสแรงดันไฟฟ้าที่ -20 โวลต์ ถึง 20 โวลต์ บันทึกค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม ตัวต้านทานที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นนำค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่บันทึกได้มาคำนวณหาค่า V_{Diamond} และ I_{Diamond} ดังสมการที่ 5 และ สมการที่ 6 อีกทั้งยังนำค่า V_{Diamond} และ I_{Diamond} มาหาค่าความต้านทานของผลึกเพชรชนิด P ที่ได้จากส่วนกลับของความชัน จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิด P

$$V_{(\text{Diamond})} = V_{\text{DC}} - V_R \quad (5)$$

$$I_{(\text{Diamond})} = V_R / R \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลึกเพชรชนิด P

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิด P นั้นใช้กรรมวิธีเดียวกันกับการสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิด อินทรินซิก แต่จะแตกต่างกันตรงที่ได้ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนไตรออกไซด์ (B₂O₃) ยัง เอทิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วน (B/C) ที่เหมาะสม ซึ่งการสังเคราะห์นี้จะใช้วิธี CVD แบบความร้อน ผลึกเพชรที่ได้จากการทดลอง นั้นได้ถูกนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค EDX , Raman Spectroscopy , SEM , คุณสมบัติทางไฟฟ้า และ ชนิดของการนำกระแส ตามความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

4.1 ฐานรองซิลิกอน

4.1.1 ฐานรองซิลิกอนแบบเตรียมผิวหน้า

การสังเคราะห์ที่เกิดผลึกเพชรนั้น จะต้องเริ่มจากการสังเคราะห์ที่ฐานรอง ที่มีปฏิกิริยานิวเคลียสที่สูงมาก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกใช้ “ฐานรองซิลิกอนแบบเตรียมผิวหน้า” โดยจะใช้ครีมเพชรทำการขัดที่บริเวณผิวหน้าของซิลิกอน ให้เกิดร่องรอยทั่วบริเวณทั้งพื้นผิว ต่อมาจึงนำเพชรตัดกระจุ๊กมารีดที่บริเวณผิวหน้าในลักษณะตารางระยะห่างประมาณ 2 มิลลิเมตรให้ทั่วทั้งแผ่น ดังรูปที่ 39 และจึงทำความสะอาดให้เศษผงซิลิกอนที่เกาะอยู่หลุดออกให้หมด จากนั้นจึงจะนำไปทำการสังเคราะห์



รูปที่ 39 แผ่นซิลิกอนแบบเตรียมผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ฐานรองซิลิโคนแบบขั้วดมัน

ฐานรองซิลิกอนแบบขั้วดมันจะถูกนำมาใช้งานในการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาด เนื่องจากมีปฏิกิริยานิวเคลียสเริ่มต้นต่ำ คาร์บอนจะก่อตัวรวมกับคาร์บอนได้ง่ายกว่า ซึ่งจะง่ายต่อการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชร แสดงดังรูปที่ 40



รูปที่ 40 แผ่นซิลิกอนแบบขั้วดมัน

4.2 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพชรชนิดอินทรีนซิคและเพชรชนิด P

4.2.1 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพชรชนิด อินทรีนซิค

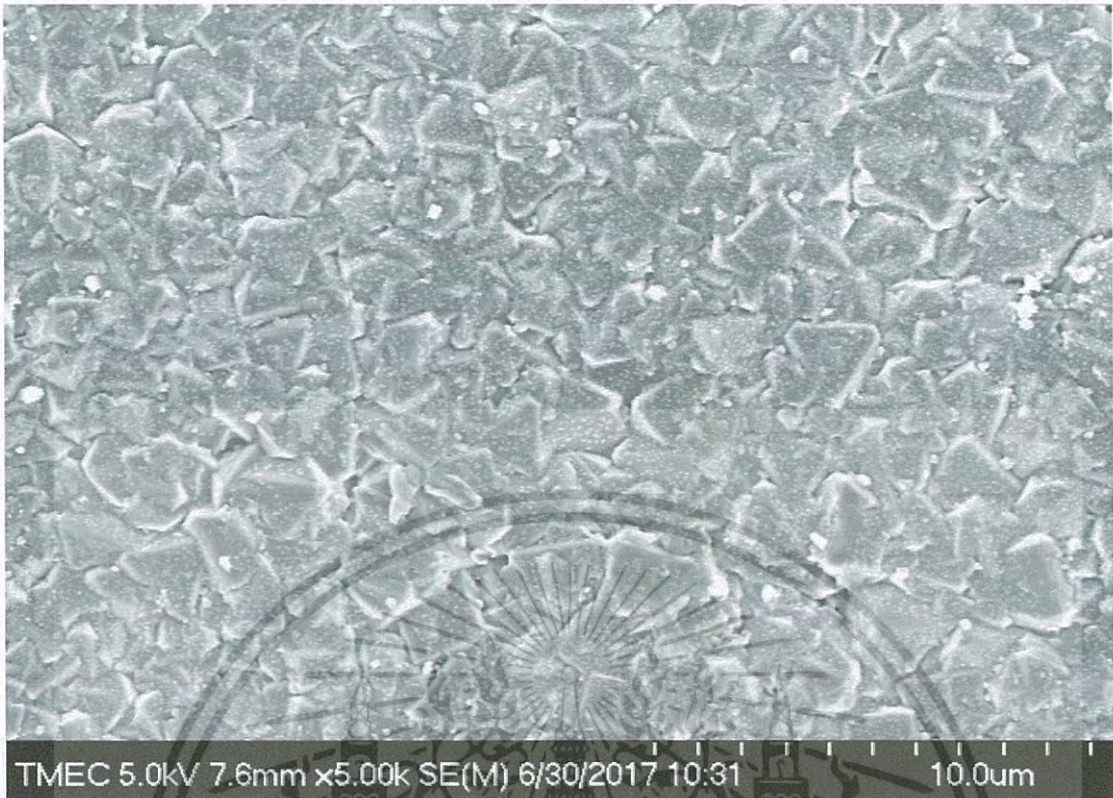
จากการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD นั้น พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองถือเป็นเรื่องที่สำคัญมาก เนื่องจากการสังเคราะห์ที่เกิดผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นจะต้องใช้เวลานานนับร้อยชั่วโมง ฉะนั้นก่อนการสังเคราะห์จริงเราจึงต้องทำการทดลองสังเคราะห์ก่อนสักช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้มั่นใจได้ว่า สิ่งที่ได้จากการทดลองนั้นใช่เพชรแน่นอน อีกทั้งยังสามารถมองเห็นข้อบกพร่องต่างๆเพื่อที่จะสามารถแก้ไขได้ทันการก่อนการสังเคราะห์จริงได้อีกด้วย

ในการสังเคราะห์เพชรชนิดอินทรีนซิคนั้น เราจะไม่ทำการเติมอะตอมสารเจือใดๆยังเอทิลแอลกอฮอล์ เราจะทำการสังเคราะห์ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว

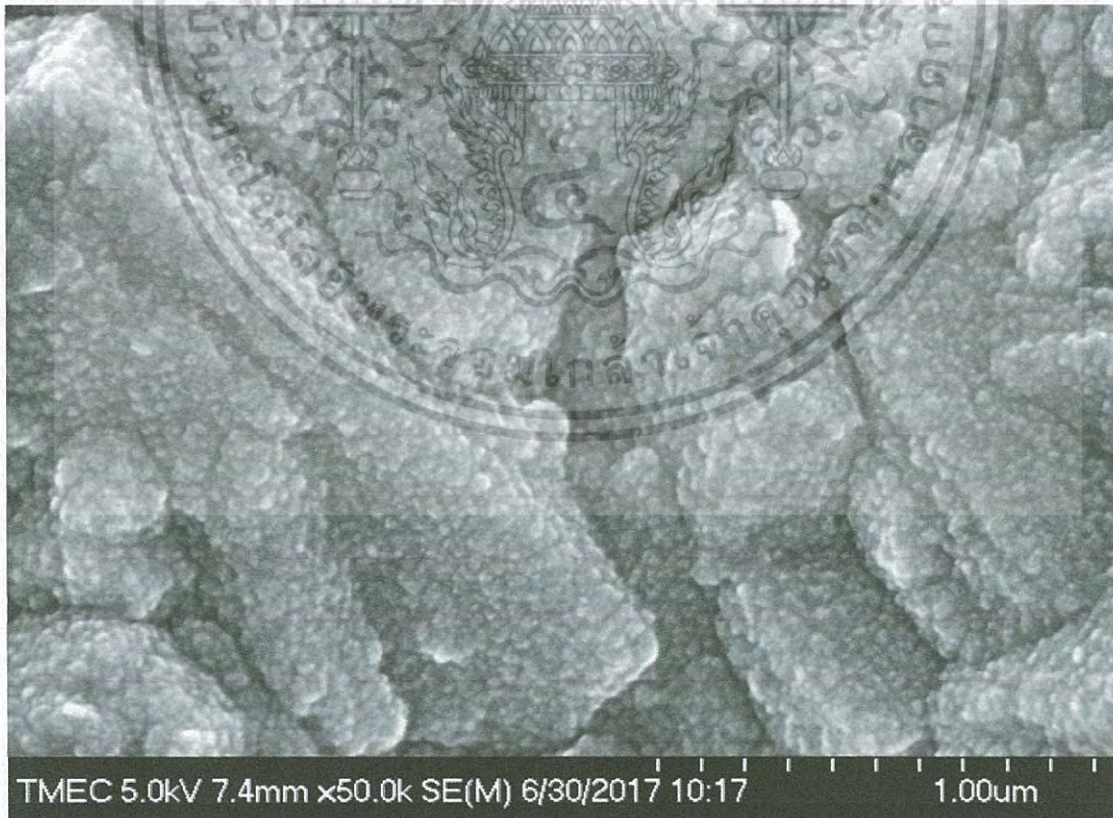
เมื่อทำการสังเคราะห์เป็นระยะเวลาครบ 12 ชั่วโมงแล้วนั้น จึงทำการปรับปรุงคุณภาพของเพชรเพื่อกำจัด แกรไฟท์ ในบรรยากาศของ ไฮโดรเจน (H_2) เป็นเวลา 9 นาที อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่สังเคราะห์เสร็จแล้วมาทำการวิเคราะห์ ลักษณะทางกายภาพด้วย SEM และยืนยันความเป็นเพชรด้วย Raman Spectroscopy

ซึ่งลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วย SEM มีลักษณะดังรูปที่ 41 และรูปที่ 42 ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

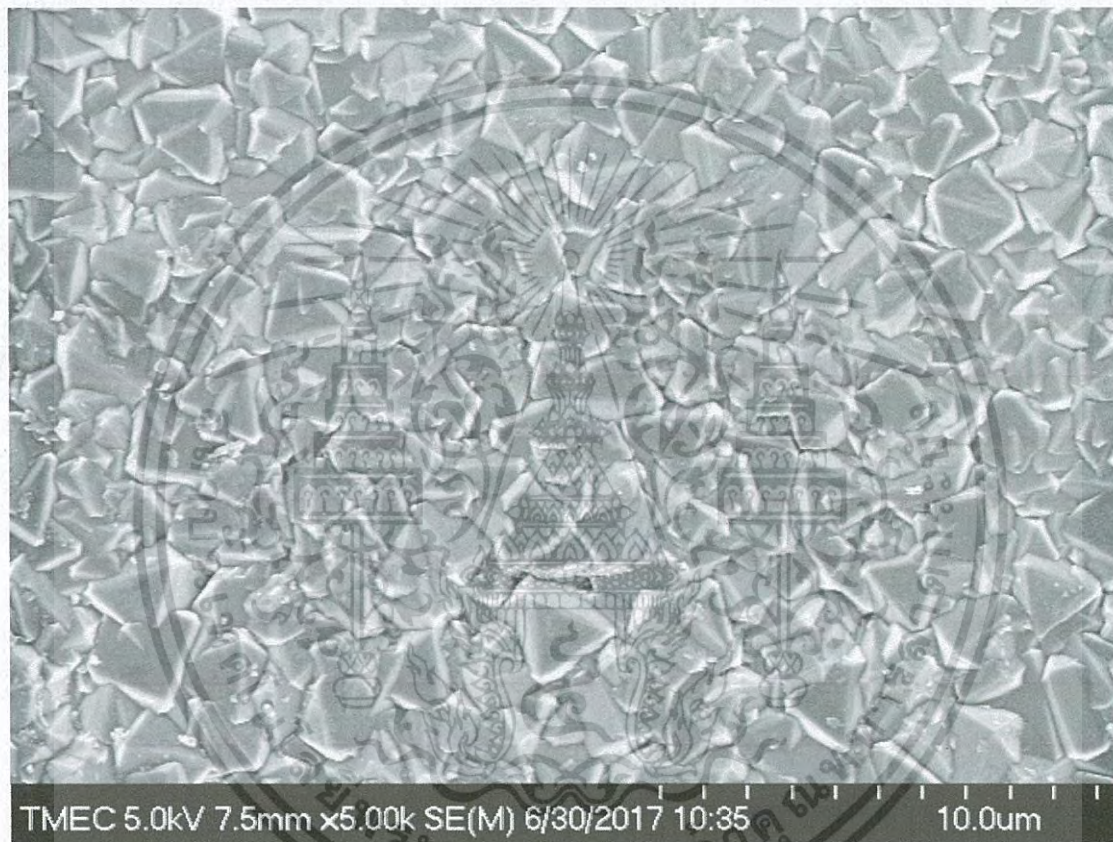


รูปที่ 41 फिल्मเพชรชนิดอินทรีนซิคจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีสล 9 นาที จากSEM



รูปที่ 42 फिल्मเพชรชนิดอินทรีนซิคจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีสล 9 นาที จากSEM เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วย SEM จะสังเกตเห็นได้ว่า คาร์บอนนั้นก่อตัวกันอยู่ในลักษณะของฟิล์มเพชร ระบายผสม ระหว่าง 100 และ 111 จะมีลักษณะในรูป สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม แต่อย่างไรก็ตามเราลักษณะของผลึกนั้นยังไม่คมชัด มีลักษณะเหมือนแกรไฟท์ปกคลุมอยู่ รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการเพิ่มระยะเวลาในการแอนนีสิล เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลึกให้ได้ดียิ่งขึ้น จึงได้ทำการแอนนีสิลเพิ่มอีก 3 นาที จากเดิม 9 นาที รวมเป็นระยะเวลาในการแอนนีสิลทั้งหมด 12 นาที ซึ่งจะแสดงผลของลักษณะทางกายภาพจากการวิเคราะห์ด้วย SEM ดังรูปที่ 43 และรูปที่ 44

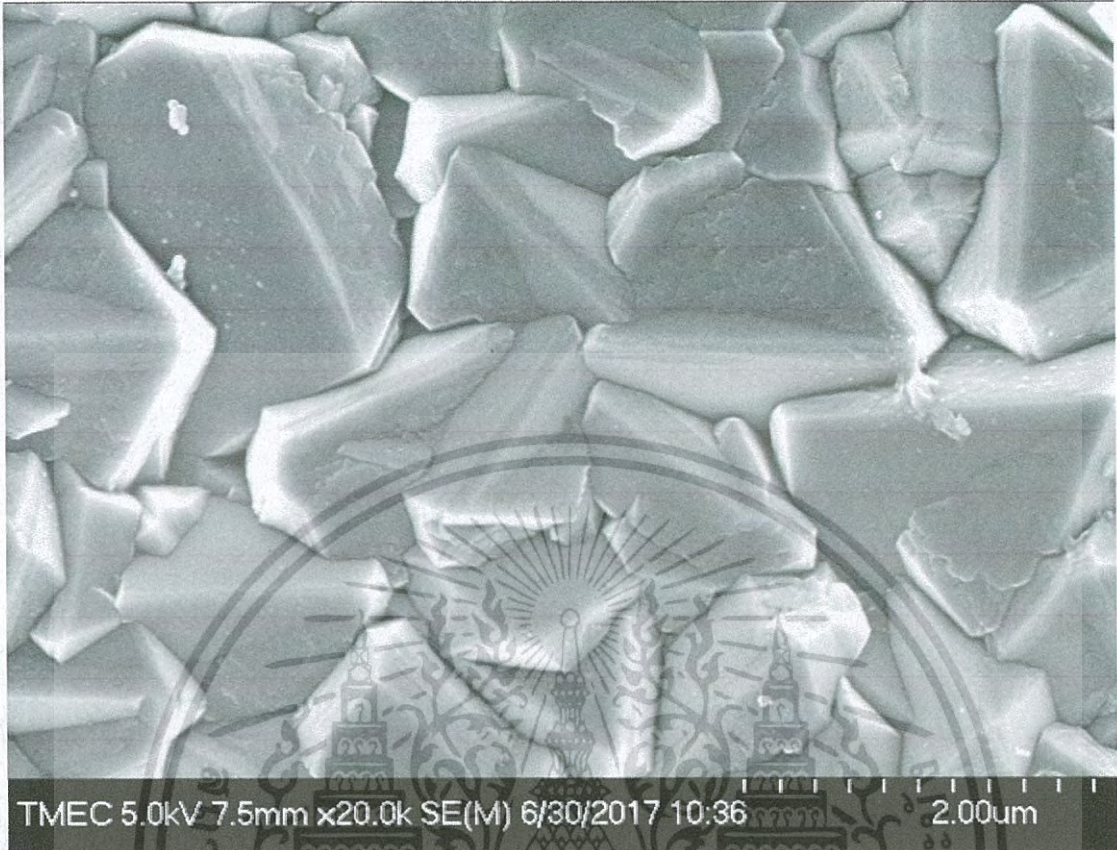


รูปที่ 43 ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีสิล 12 นาที จากSEM

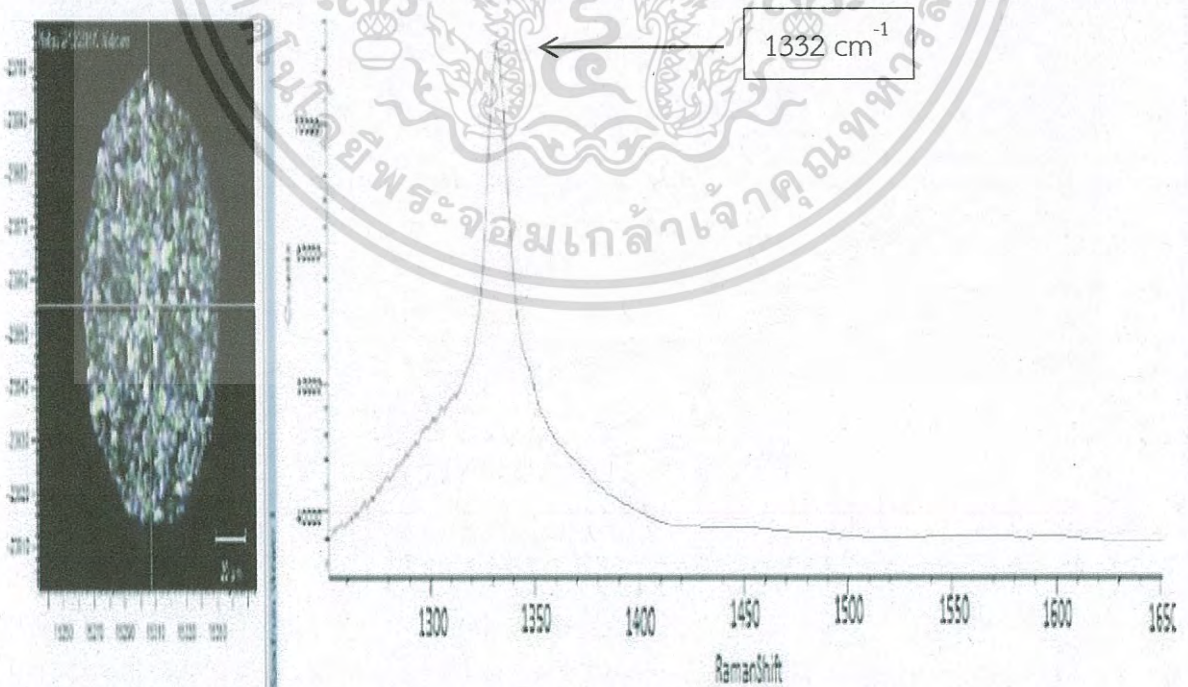
จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง รูปที่ 41 กับ รูปที่ 42 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ลักษณะของผลึกนั้นมีความคมชัดกว่าเป็นอย่างมาก แกรไฟท์ ที่เคยปกคลุมอยู่นั้นหายออกไปเกือบหมด ซึ่งการเพิ่มระยะเวลาในการแอนนีสิล จากเวลา 9 นาที เป็น 12 นาที นั้นได้ผลดีเป็นอย่างยิ่ง รายงานวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้จึงเลือกใช้ระยะเวลา 12 นาทีในการแอนนีสิลเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของผลึก

จากรูปที่ 4.4 กับ รูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วนั้น ยิ่งทำให้เห็นได้ชัดเจนว่าลักษณะของผลึกนั้นมีความคมชัดเป็นอย่างมาก และยิ่งไปกว่านั้นยังได้มีการยืนยันความเป็นเพชรด้วยวิธี Raman Spectroscopy ซึ่งจะแสดงในจุดยอดกราฟที่ 1332 cm^{-1} ดังแสดงในรูปกราฟที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 44 ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีกัล 12 นาที จากSEM



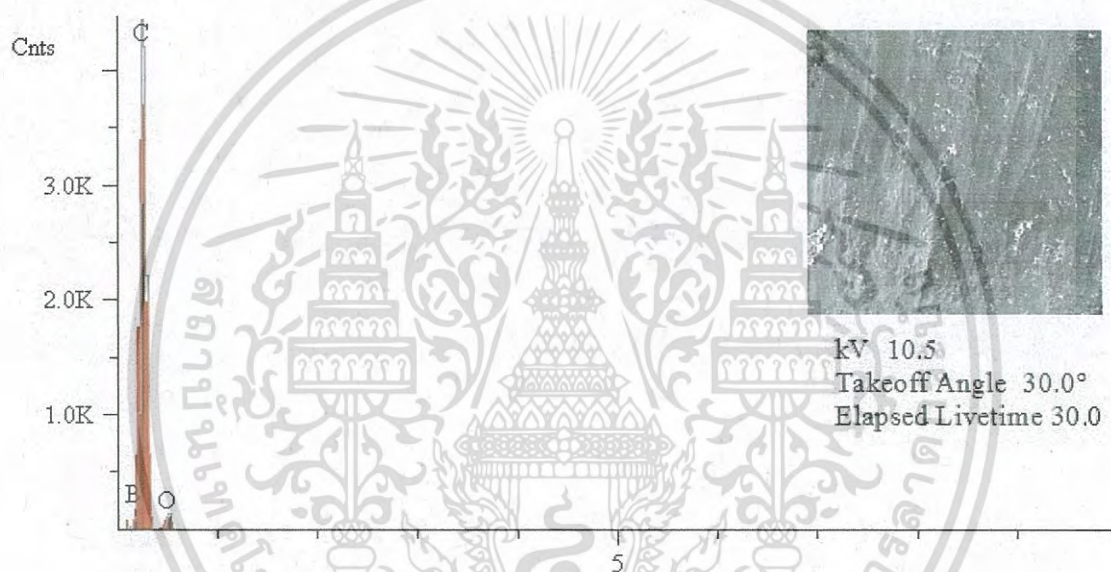
กราฟที่ 1 ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคจากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีกัล 12 นาที จาก

Raman เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพชรชนิด P

ในการสังเคราะห์เพชรชนิดพีนั้น จะทำการสังเคราะห์เหมือนกับการสังเคราะห์เพชรชนิดอินทรีชนิด แต่จะแตกต่างกันตรงที่ จะทำการเติมอะตอมสารเจือ โบรอนไดรอกไซด์ (B_2O_3) ยังเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ในอัตราส่วน B/C ที่ 50,000 ppm จากนั้นจึงทำการลองสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมง อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งทำการปรับปรุงคุณภาพของผลึก เป็นระยะเวลา 12 นาที ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ด้วยวิธีการแอนนีส

และเมื่อทำการสังเคราะห์ครบตามระยะเวลาเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงจำชิ้นงานที่ได้มาทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย EDX ดังกราฟที่ 2 กับตารางที่ 4 และทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วย SEM ดังรูปที่ 44 อีกทั้งยังทำการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นเพชรด้วย Raman Spectroscopy ดังกราฟที่ 2



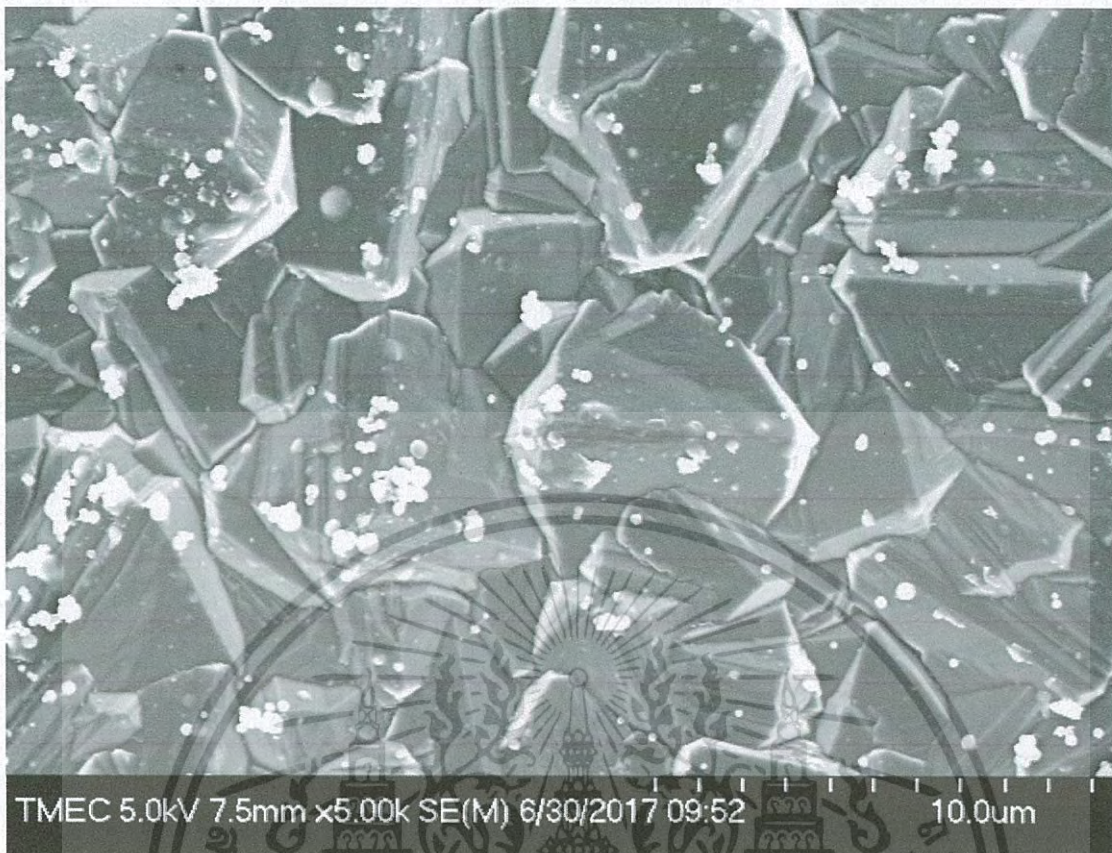
กราฟที่ 2 แสดงธาตุเชิงปริมาณของคาร์บอนและโบรอน จาก EDX

จากกราฟแสดงธาตุเชิงปริมาณ จะเห็นได้ว่าฟิล์มเพชรนั้นมืองค์ประกอบ ของคาร์บอนประกอบอยู่ 88.470 % และโบรอนประกอบอยู่ 5.196% ตามตารางที่ 4

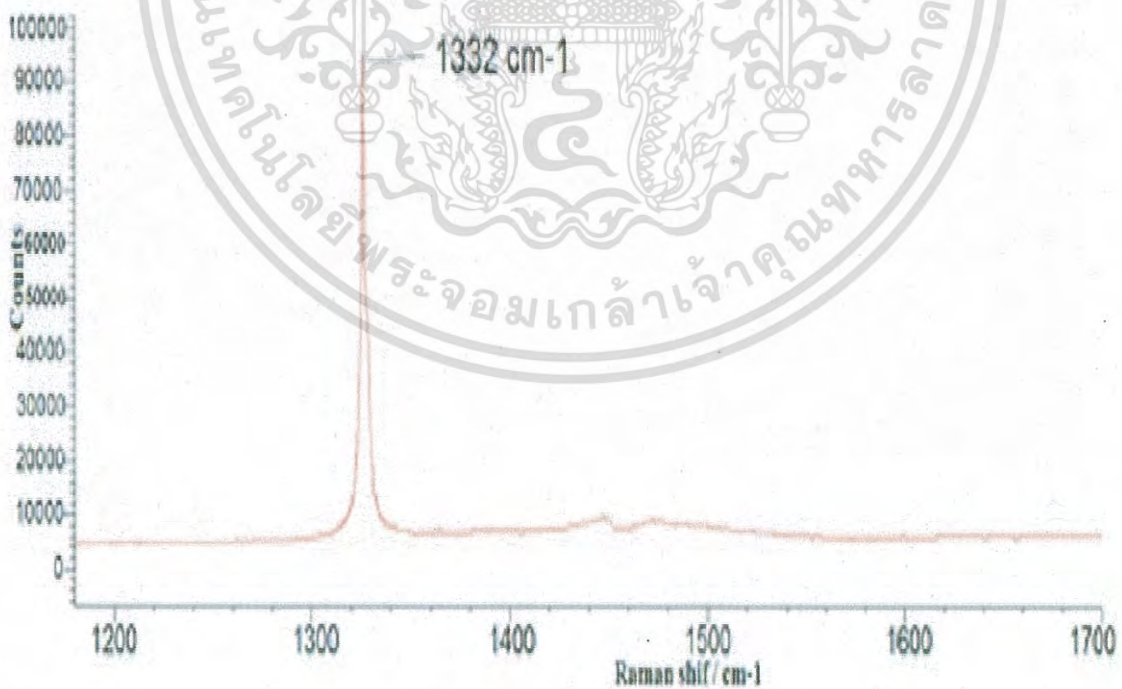
ตารางที่ 4 แสดงธาตุเชิงปริมาณ ระหว่าง คาร์บอนกับโบรอน จากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
B	Ka	20.62	1.658	5.196	wt. %
C	Ka	1,231.84	12.816	88.470	wt. %
O	Ka	28.17	1.938	6.334	wt. %
				100.000	wt. %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 45 फिल्मเพชรชนิด P จากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีกัล 12 นาที จาก SEM



กราฟที่ 3 फिल्मเพชรชนิด P จากการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และแอนนีกัล 12 นาที จาก Raman

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 45 นั้นเป็นรูปที่วิเคราะห์ด้วย SEM นั้นมีลักษณะอยู่ในรูปของผลึกและยังแทบจะไม่พบ แกรไฟท์ เกาะปกคลุมอยู่ ซึ่งเป็นฟิล์มเพชรที่มีความสมบูรณ์ อีกทั้งกราฟที่ 3 นั้นยังแสดงเพื่อยืนยันความเป็นเพชรด้วย Raman Spectroscopy แสดงให้เห็นจุดยอดกราฟที่ 1332 cm^{-1} เพียงจุดยอดกราฟเดียว

จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ได้พารามิเตอร์ใหม่ที่สำคัญต่างๆไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป คือการทดลองสังเคราะห์เพื่อให้เกิดผลึกเพชรชนิด P และการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชรชนิด P ต่อไป

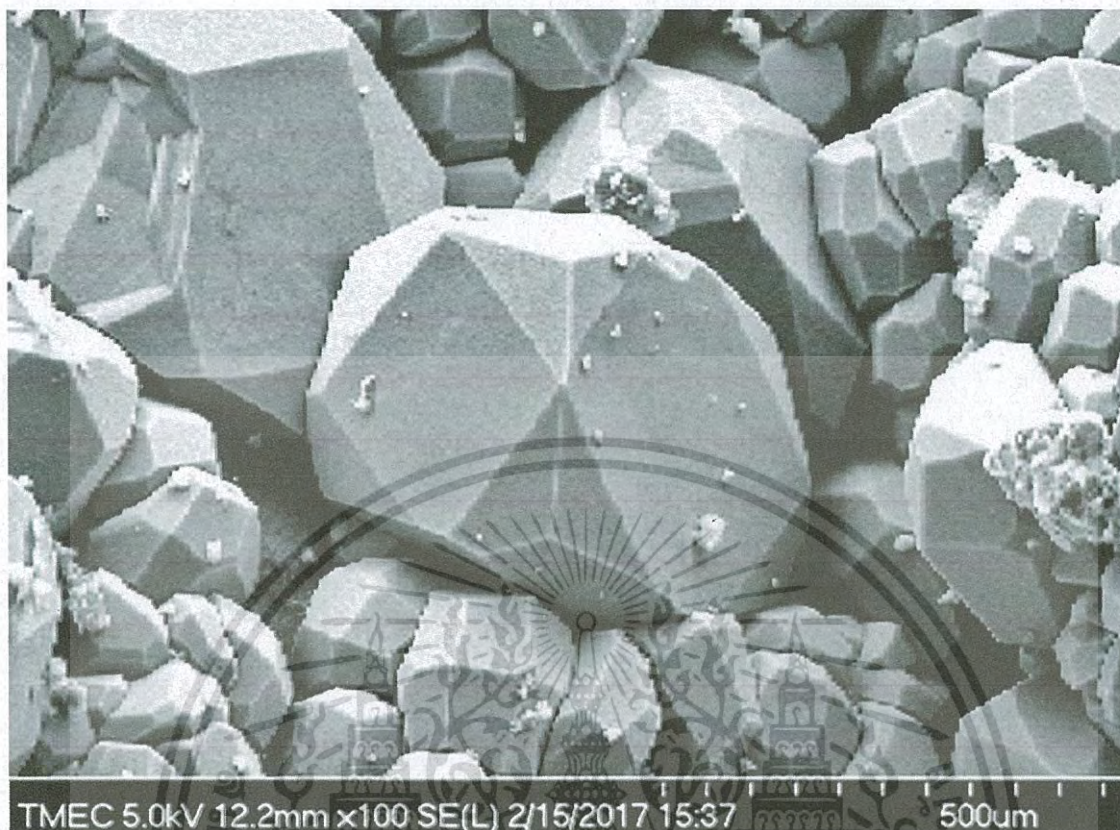
4.3 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพื่อให้เกิดผลึกเพชรอินทรินซิก และผลึกเพชรชนิด P ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง

4.3.1 วิเคราะห์ผลการสังเคราะห์เพื่อให้เกิดผลึกเพชรชนิด อินทรินซิก ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 60 ชั่วโมง

จากการสังเคราะห์ในการทดลองที่ผ่านมา นั้น เป็นเพียงการทดสอบว่าพารามิเตอร์ และกระบวนการสังเคราะห์นั้น มีประสิทธิภาพที่สมบูรณ์หรือไม่ อีกทั้งยังเป็นการยืนยันให้แน่ชัดว่าชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์นั้นเป็นผลึกเพชรที่มีความสมบูรณ์อย่างแท้จริงอีกด้วย ส่วนในการทดลองต่อไปนี้จะทำการสังเคราะห์ ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ แต่จะทำการทดลองบนแผ่นซิลิกอนที่ทำการเตรียมผิวหน้าแบบตาราง ทั้งนี้ก็เพื่อให้มีปฏิกิริยานิวเคลียสที่สูง เพื่อที่จะง่ายต่อการก่อตัวของอะตอมคาร์บอนและโบรอน ให้อยู่ในรูปของผลึก ดังรูปที่ 46 และ 47 ก่อนที่จะคัดผลึกเพชรชนิดอินทรินซิก และผลึกเพชรชนิด P ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด อีกทั้งยังสมบูรณ์ที่สุด ก่อนที่จะนำไปทำการสังเคราะห์เพื่อขยายขนาดในการทดลองต่อไป



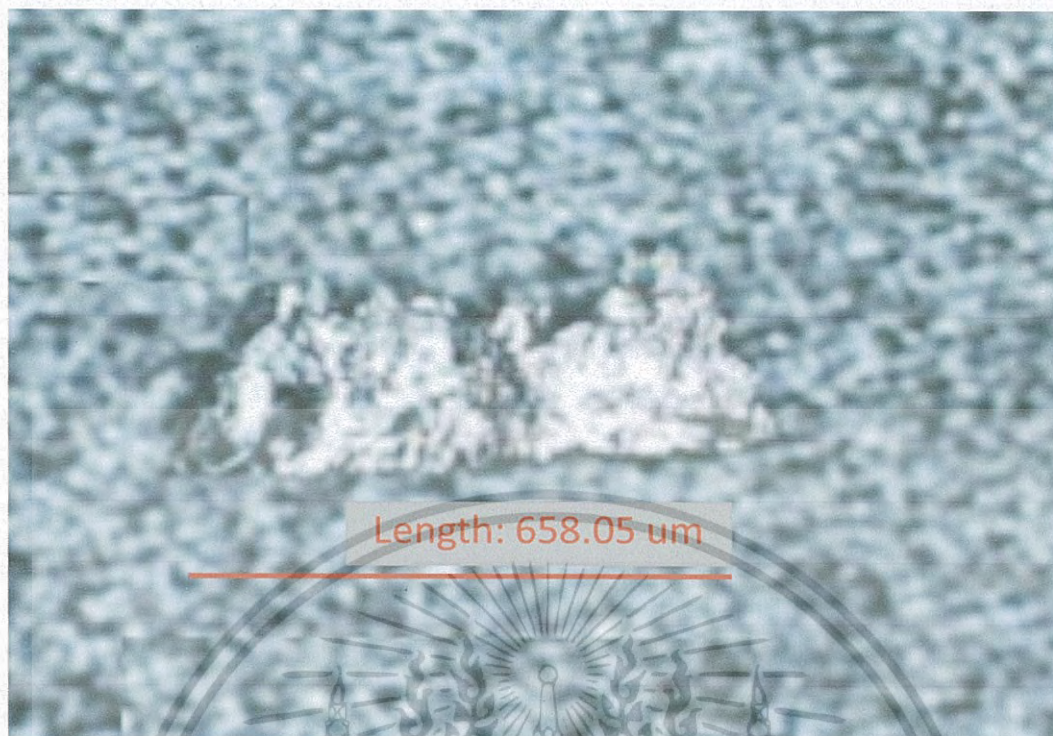
รูปที่ 46 การก่อตัวของอะตอมคาร์บอนในรูปของผลึกบนแผ่นซิลิกอนแบบเตรียมผิวหน้าแบบตาราง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเผยแพร่เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ของการนำ
 ไปว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



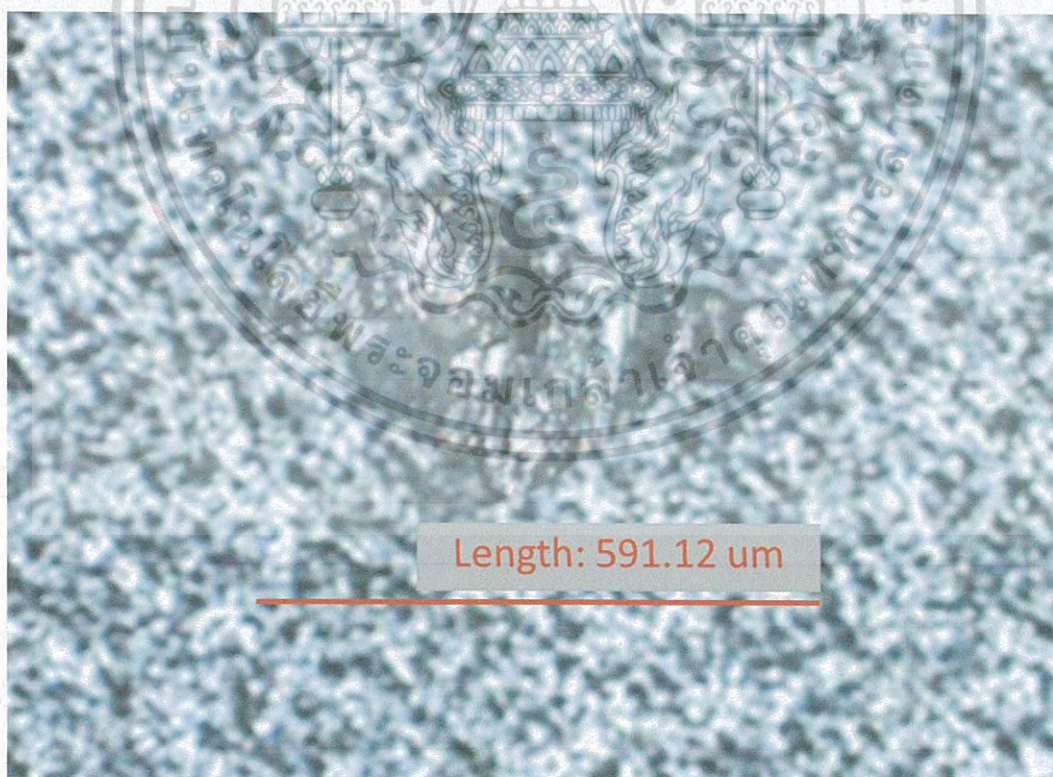
รูปที่ 47 การก่อตัวของอะตอมคาร์บอนและโบรอนในรูปของผลึกบนแผ่นซิลิกอนแบบเตรียมผิวหน้าแบบตาราง

จากรูปที่ 46 และรูปที่ 47 นั้นแสดงให้เห็นว่า อะตอมของคาร์บอนและอะตอมของโบรอนนั้นได้ก่อตัวอยู่ในลักษณะผลึกเป็นกลุ่มก้อนประมาณ 4-5 ผลึก ซึ่งอยู่บนพื้นผิวของซิลิกอนที่มีฟิล์มเพชรปกคลุมทั่วทั้งบริเวณ จึงได้คัดผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่และสมบูรณ์ที่สุด อย่างละ 1 ผลึก ระหว่างผลึกเพชรที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือใดๆในการทดลอง และผลึกเพชรที่มีการเติมอะตอมสารเจือโบรอนในการทดลอง

มาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วย SEM พร้อมกับทำการวัดขนาดดังรูปที่ 48 และรูปที่ 49



รูปที่ 48 ลักษณะของผลึกเพชรที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 60 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM



รูปที่ 49 ลักษณะของผลึกเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 60 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 48 นั้นเป็นลักษณะของผลึกเพชรที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) เพียงอย่างเดียว นั้นพบว่ามีลักษณะอยู่ในรูปผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.658 มิลลิเมตร และรูปที่ 49 นั้นเป็นลักษณะของผลึกเพชรที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน (B_2O_3) ยังเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) นั้นพบว่ามีลักษณะอยู่ในรูปผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.591 มิลลิเมตร

4.4 ผลการทดลองเพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชรชนิด อินทรีนซิก และผลึกเพชรชนิด P

เมื่อได้ผลึกเพชรชนิดอินทรีนซิกและผลึกเพชรชนิด P จากการสังเคราะห์ในการทดลองที่แล้ว นั้น นำผลึกเพชรทั้งสองชนิด มาทำการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มขนาดต่อ อีก 2 ครั้ง ซึ่งในครั้งแรกนั้นจำทำการสังเคราะห์เป็นระยะเวลา 60 ชั่วโมงพร้อมกับการแอนนีสเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลึกเป็นระยะเวลา 12 นาที จากนั้นจึงนำผลึกเพชรจากการทดลอง มาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพร้อมกับทำการวัดขนาดด้วย SEM ดังรูปที่ 50 และ รูปที่ 51



รูปที่ 50 ลักษณะของผลึกเพชรที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 120 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

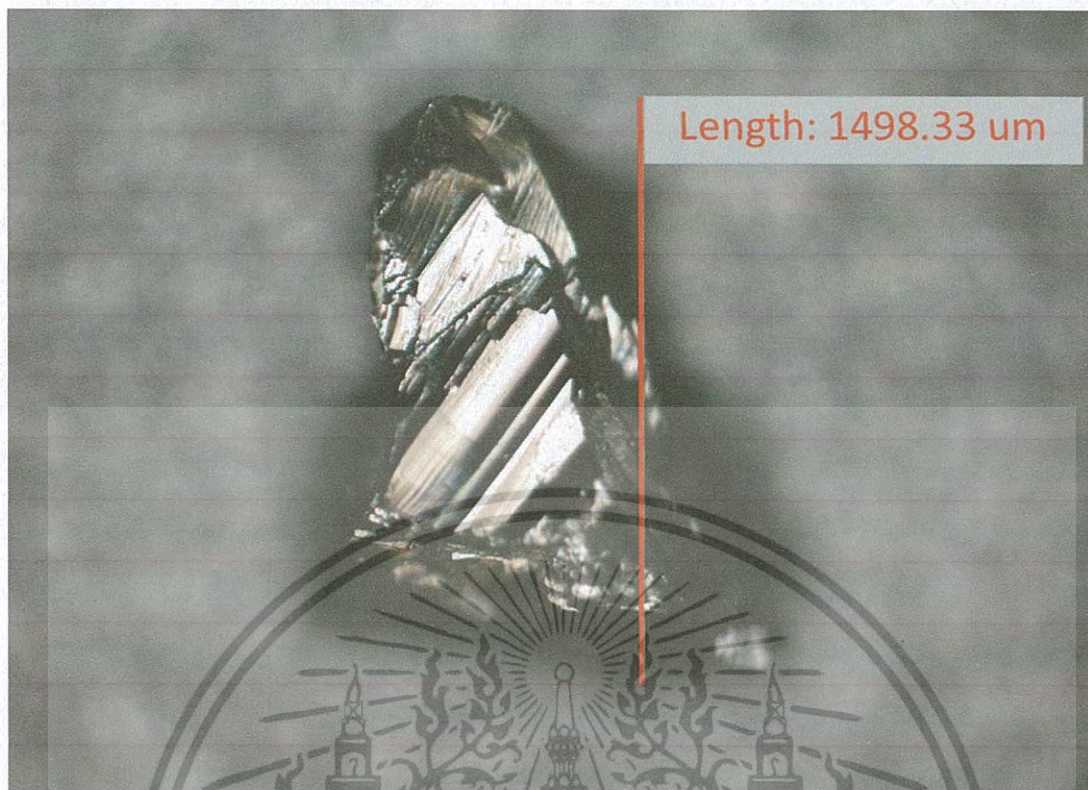


รูปที่ 51 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการเติมอะตอมสารเจือโบรอนที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 120 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM

จากรูปที่ 50 นั้นเป็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) เพียงอย่างเดียว นั้นพบว่ามีลักษณะอยู่ในรูปผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.295 มิลลิเมตร และรูปที่ 51 นั้นเป็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน (B_2O_3) ยังเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) นั้นพบว่ามีลักษณะอยู่ในรูปผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.269 มิลลิเมตร

เมื่อทำการวิเคราะห์เป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น จึงนำผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดไปทำการสังเคราะห์ต่ออีก 60 ชั่วโมง พร้อมกับทำการแอนนัลเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลึก รวมเป็นระยะเวลาทั้งสิ้นที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 180 ชั่วโมง

จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วย SEM ดังรูปที่ 52 และรูปที่ 53



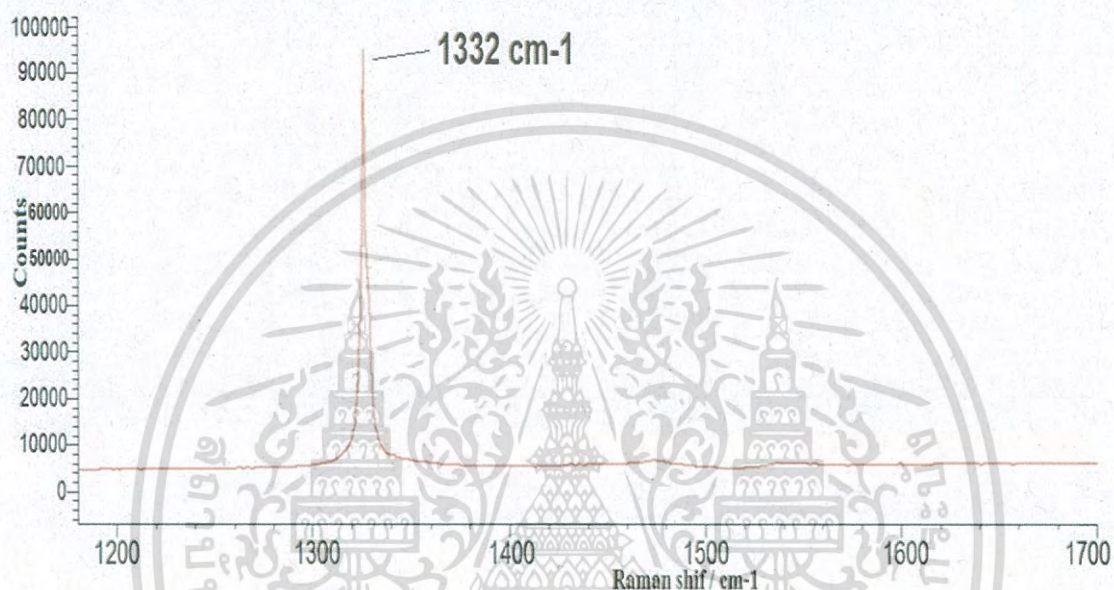
รูปที่ 52 ลักษณะของผลึกเพชรที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 180 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM



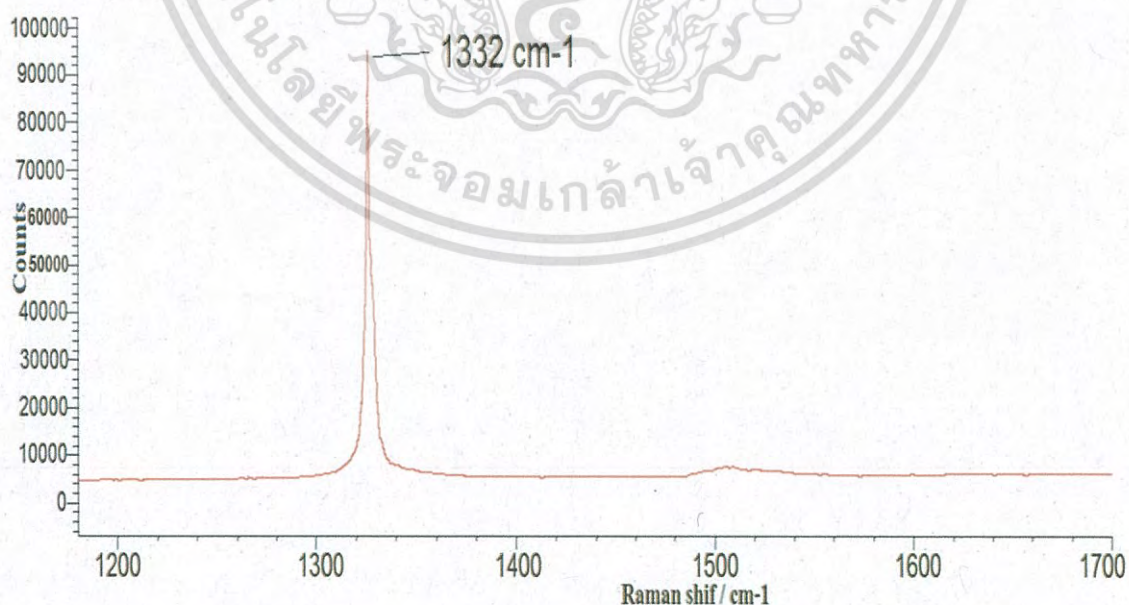
รูปที่ 53 ลักษณะของผลึกเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 180 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 52 นั้นเป็นลักษณะของผลึกเพชรที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) เพียงอย่างเดียว นั้นพบว่า มีลักษณะอยู่ในรูปผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.498 มิลลิเมตร และรูปที่ 53 นั้นเป็นลักษณะของผลึกเพชรที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน (B_2O_3) ยังเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) นั้นพบว่า มีลักษณะอยู่ในรูปผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.568 มิลลิเมตร

อีกทั้งยังได้มีการวิเคราะห์เพื่อยืนยันยืนยันความเป็นเพชรด้วย Raman Spectroscopy โดยเทียบกับ ตาราง Raman Spectrum ที่ 1332 cm^{-1} ซึ่งแสดงดังกราฟที่ 4 และกราฟที่ 5



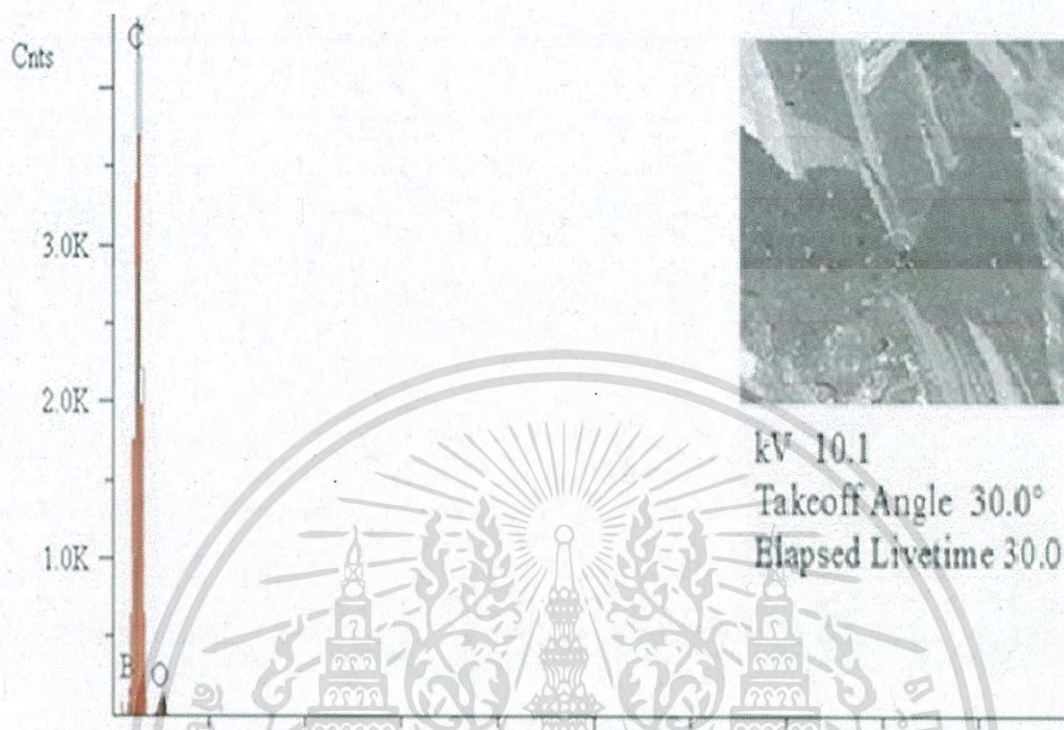
กราฟที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วย Raman ของผลึกเพชรที่ไม่ได้ทำการเติมอะตอมสารเจือ จากการสังเคราะห์ ที่ระยะเวลา 180 ชั่วโมง



กราฟที่ 5 ผลการวิเคราะห์ด้วย Raman ของผลึกเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอน จากการสังเคราะห์ ที่ระยะเวลา 180 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยิ่งไปกว่านั้น ยังได้ทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray (EDX) ดังกราฟที่ 6



กราฟที่ 6 แสดงธาตุเชิงปริมาณของผลึกเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอน จากการสังเคราะห์ ที่ระยะเวลา 180 ชั่วโมง

ตารางที่ 5 แสดงธาตุเชิงปริมาณ ระหว่าง คาร์บอนกับโบรอน จากการสังเคราะห์ 180 ชั่วโมง

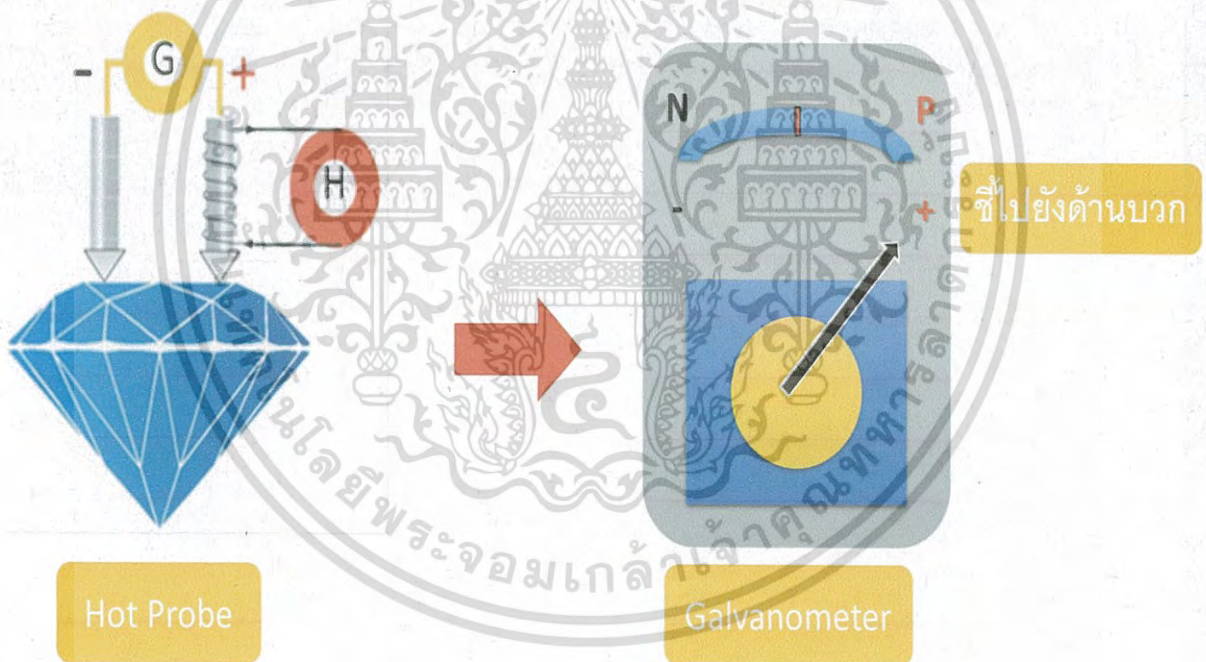
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
B	Ka	20.62	1.658	10.196	wt. %
C	Ka	1,231.84	12.816	86.470	wt. %
O	Ka	28.17	1.938	3.334	wt. %
				100.000	wt. %

ซึ่งจากกราฟแสดงธาตุเชิงปริมาณในกราฟที่ 6 จะเห็นได้ว่าพบธาตุของคาร์บอนเพียงชนิดเดียวซึ่งมีองค์ประกอบของคาร์บอน 86.470 % และในกราฟที่ 6 นั้นพบว่า มีโบรอนประกอบอยู่ 10.196% และออกซิเจนประกอบอยู่ 3.334% การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอน (B_2O_3) ด้วยวิธี Hot Probe

จากการทดลองสังเคราะห์ผลึกเพชร ด้วยวิธี HFCVD แบบเติมอะตอมสารเจือโบรอนยังเอทิลแอลกอฮอล์ และไม่เติมอะตอมสารเจือในเอทิลแอลกอฮอล์ นั้นเราจะได้ผลึกเพชรมาจากการทดลอง ซึ่งในทางทฤษฎีเราทราบกันดีอยู่แล้วว่า ในการสังเคราะห์แบบไม่เติมอะตอมสารเจือ นั้น จะได้ผลึกเพชรชนิดอินทรีนซิค มาซึ่งจะไม่มีสารประกอบ อื่นเลย จะมีอะตอมของคาร์บอนเพียงอย่างเดียว แต่ในส่วนของการสังเคราะห์แบบเติมอะตอมสารเจือนั้นเรายังไม่ทราบชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกว่าจะ เป็น ชนิด P หรือ ชนิด N

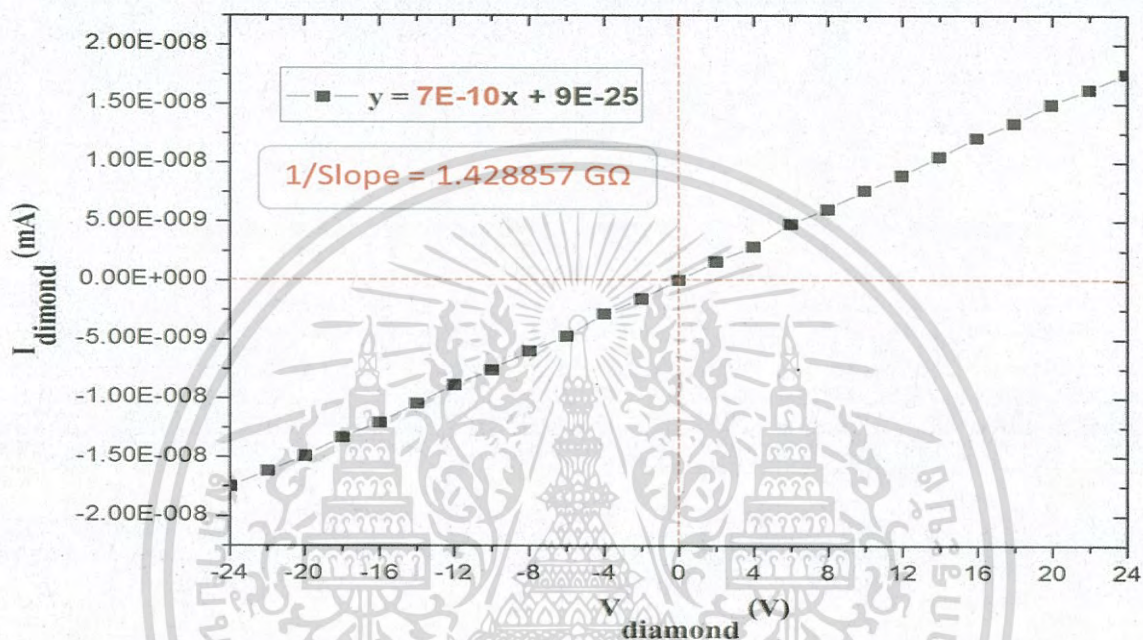
เราจึงต้องทำการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชร ด้วยวิธี Hot Probe ซึ่งเมื่อทำการทดลองนั้น พบว่าผลึกเพชรที่เกิดจากการเติมอะตอมสารเจือโบรอนไตรออกไซด์ นั้นปรากฏว่า เข็มของกัลวานอมิเตอร์ ชี้ไปยังด้านบวกดังรูปที่ 54 แสดงว่าพาหะหลักในการนำกระแสของผลึกเพชร ที่ทำการวัดคือ โฮล จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่า ผลึกเพชรที่ทำการสังเคราะห์นั้น เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P



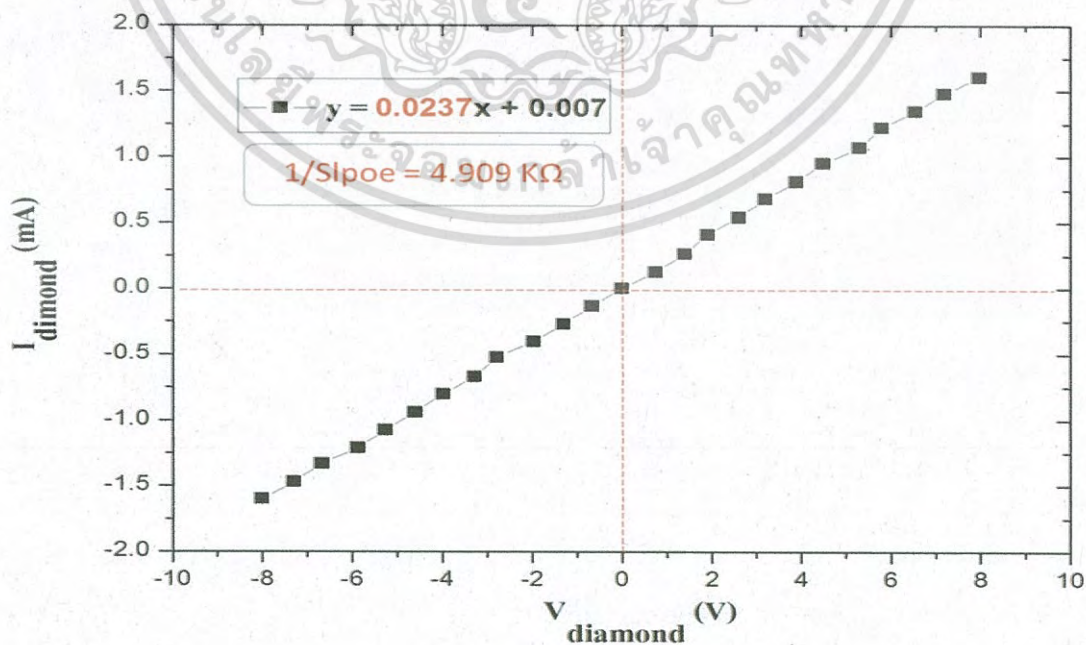
รูปที่ 54 เข็มของกัลวานอมิเตอร์ ชี้ไปยังด้านบวก

4.6 ผลการทดลองหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันของผลึกเพชรชนิด อินทรีชนิด กับผลึกเพชรชนิด P

จากการทดลอง ทำการหาค่ากระแสและแรงดัน ของผลึกเพชรผลึกเพชรชนิด อินทรีชนิด กับผลึกเพชรชนิด P แล้วนั้นจึงนำค่าระหว่างกระแสและแรงดันที่บันทึกค่าได้ มาแสดงอยู่ในรูปกราฟที่ 7 และกราฟที่ 8 ตามลำดับ



กราฟที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ ผลึกเพชรชนิดอินทรีชนิด



กราฟที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ ผลึกเพชรชนิด P

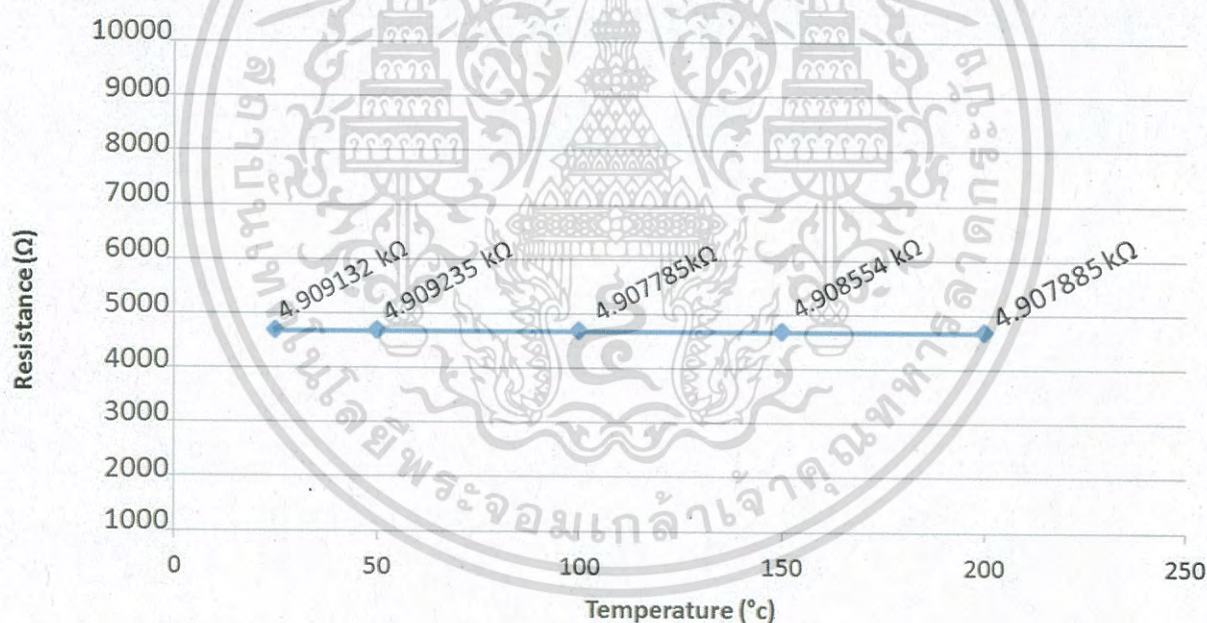
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่า กราฟที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของผลึกเพชรที่ชนิดอินทรีชนิด นั้น มีค่าความต้านทานเท่ากับ $1.428 \text{ G}\Omega$ ที่ได้จากส่วนกลับ ของ slope และจากกราฟที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของผลึกเพชรชนิด P นั้นมี ค่าความต้านทานเท่ากับ $4.909 \text{ k}\Omega$ ที่ได้จากส่วนกลับ ของ slope เช่นกัน

และเมื่อนำค่าความต้านทานของผลึกเพชรทั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบกับกันนั้น จะเห็นได้ชัดเจนว่า ผลึกเพชรชนิดอินทรีชนิดนี้มีค่าความต้านทานที่สูงมาก แต่ผลึกเพชรชนิด P นั้นมีค่าความต้านทานที่ต่ำกว่าหลายเท่าตัว ซึ่งบอกลึถึงได้ว่าผลึกเพชรชนิด P ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่าผลึกเพชรชนิดอินทรีชนิด

4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลึกเพชรชนิด P

เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานจากการให้ความร้อนกับผลึกเพชรชนิด P ด้วย Hot Plate ตั้งแต่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ไม่พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน แสดงว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากผลึกเพชรนั้น สามารถทำงานได้ดีในอุณหภูมิสูง ดังกราฟที่ 9

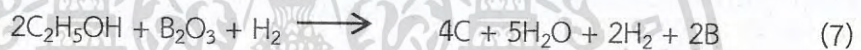


กราฟที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิของผลึกเพชรชนิด P

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยเพื่อนำเสนอการศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชร ชนิด P ขนาดใหญ่ ด้วยวิธี HFCVD (Hot Filament Chemical Vapor Deposition) โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนไนโตรออกไซด์ (B_2O_3) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมให้กับเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ ในงานเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆได้

การสังเคราะห์ผลึกเพชรชนิด P ที่มีขนาดใหญ่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ มีการเติมอะตอมสารเจือโบรอน ให้กับ เอทิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วน B/C ที่ 50,000 ppm จนเกิดเป็นผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่ ถึง 1.56 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เอทิลแอลกอฮอล์เป็นแหล่งจ่ายอนุภาคมูลฐานและโบรอนโดยมีแก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาไปทำปฏิกิริยาการแตกตัวทางเคมี ที่บริเวณไส้หลอดนำความร้อน ตามสมการที่ 7



ผลึกเพชรหรือโครงสร้างคาร์บอนจะตกลงบนฐานรองซิลิกอนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ 900 องศาเซลเซียส โดยลดอัตราการเกิดจากขอบเขตเกรนของผลึกข้างเคียงได้ โดยใช้ฐานรองซิลิกอนที่มีความหนาแน่นของการเกิดนิวเคลียสและอัตราการโตของผลึกที่แตกต่างกันได้ โดยใช้ฐานรองชนิดแรกที่ทำกรเตรียมพื้นผิวเพื่อสังเคราะห์ผลึกเพชรที่สมบูรณ์และโตพอ ที่จะนำไปคัดแยกเพื่อทำการเพิ่มขนาด และปรับปรุงคุณภาพของผลึกต่อไป จากนั้นทำการสังเคราะห์ต่อเพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเพชรบนฐานรองซิลิกอนขัดมันแบบธรรมดา ซึ่งฐานรองชนิดที่สองนี้มีการเกิดนิวเคลียสที่ต่ำมาก เพื่อป้องกันผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ไปรบกวนอัตราการโตของผลึกเพชรในสามมิติ จากผลการวิจัยพบว่าในช่วงเวลาการสังเคราะห์แรกถึงช่วงเวลาในการสังเคราะห์ที่ 60 ชั่วโมง มีอัตราการโตที่สูงมาก และช่วงเวลาในการสังเคราะห์ที่มีระยะเวลานานขึ้นจนถึงช่วงระยะเวลาในการสังเคราะห์สุดท้ายที่ 180 ชั่วโมงนั้น พบว่ามีอัตราการโตที่น้อยลงเป็นอย่างมากถึง 3 เท่า ซึ่งเป็นผลมาจากไฮโมอิตีแพกเซียลแต่ยังคงมีขนาดใหญ่เป็นอย่างมาก แม้ว่าผลึกเพชรที่สังเคราะห์จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น แต่คุณภาพของผลึกนั้นก็ยังมีคุณภาพต่ำลง เนื่องจากปริมาณแกรไฟต์ที่สะสมเพิ่มมากขึ้น จากระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่มีระยะเวลานาน จึงต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของผลึกด้วยการแอนนัลที่บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่นานขึ้นที่เวลา 12 นาที พบว่าผลึกเพชรนั้นมีคุณภาพที่สมบูรณ์ ปราศจากแกรไฟต์ ที่ปรกคลุมผิวอยู่ ซึ่งยืนยันด้วย Raman Spectrum ที่ 1332 cm^{-1} เพียงจุดยอดกราฟเดียวและเมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพนั้นพบว่า ผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นจนสูงสุดที่ 1.56 มิลลิเมตร จากระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่นานถึง 180 ชั่วโมง และยืนยันชนิดการนำไฟฟ้าของผลึกเพชร ด้วยวิธี Hot Probe ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้น ชี้ชัดว่าผลึกเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมอะตอมสารเจือโบรอน(B_2O_3)นี้ เป็นผลึกเพชรชนิด P และนอกจากนี้ผลึกเพชรที่ได้จากการวิจัยใน
ครั้งนี้ ยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ที่ดีกว่าเพชรธรรมชาติอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 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 จันทร์แดง , 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 , ขบา สุรียอมรานนท์ , วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร , วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง “การสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยวิธีHFCVD SYNTHETIC OF LARGE DIAMOND CRYSTALS BY HFCVD” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8
- [12] Piyachat Sodngam, Prapassorn Meekluab, Vilailuck Siriwongrunson, Surasak Neamchalern, Wisut Titiroongraung “Development of Large Diamond Synthesis by Double Test Tubes Hot Filament Chemical Vapor Deposition” IMECS 2017 Hongkong.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Piyachat Sodngam, Vilailuck Siriwongrungson, Surasak Neamchalern, Wisut Titiroongraung “The Study of P-Type and N-Type Diamond Crystals Synthesis by Hot Filament Chemical Vapor Deposition” ECTI 2017 Phuket, Thailand.

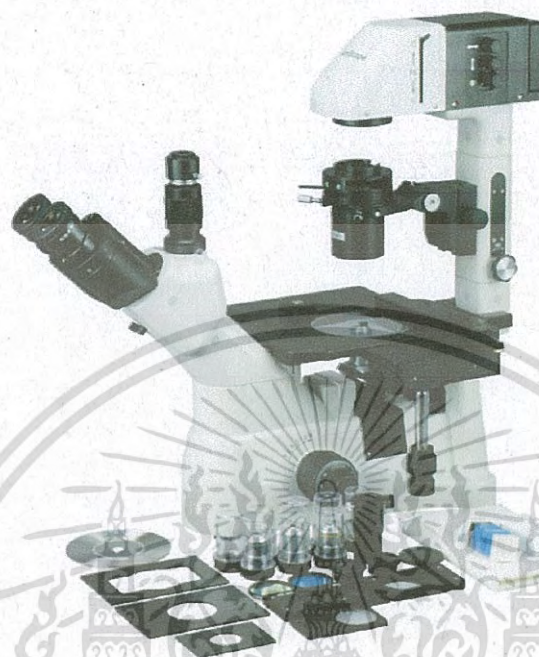


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

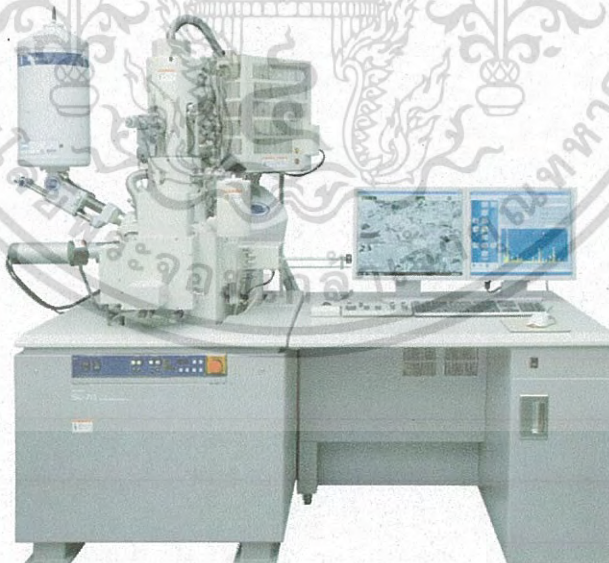


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.



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



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



รูปที่ ก-4 เครื่อง EDX ได้รับความอนุเคราะห์จาก TMEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่าโบรอนต่อคาร์บอน

สามารถคำนวณหาค่าโบรอนต่อคาร์บอน(B/C) ได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าน้ำหนักโมเลกุลของโบรอนไตรออกไซด์ (B₂O₃) ซึ่งประกอบด้วยโบรอนจำนวน 2 อะตอมและออกซิเจนจำนวน 3 อะตอม ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลมีค่า

$$\begin{aligned} &= (\text{น้ำหนักอะตอมโบรอน} \times 2) + (\text{น้ำหนักอะตอม ออกซิเจน} \times 3) \\ &= (10.811 \times 2) + (15.9994 \times 3) \\ &= 69.6202 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าน้ำหนักโมเลกุลของเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 2 อะตอม ไฮโดรเจนจำนวน 6 อะตอม และ ออกซิเจนจำนวน 1 อะตอม ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุล} &= (\text{น้ำหนักอะตอมของคาร์บอน} \times 2) + (\text{น้ำหนักอะตอมไฮโดรเจน} \times 6) + (\text{น้ำหนัก} \\ &\text{อะตอมออกซิเจน} \times 1) \\ &= (12.01115 \times 2) + (1.00797 \times 6) + (15.9994 \times 1) \\ &= 46.0693 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของโบรอนและคาร์บอนจาก

โบรอนไตรออกไซด์ หนัก 69.6202 กรัม เป็นน้ำหนักของโบรอน 21.622 กรัม

$$\text{ดังนั้น มีเปอร์เซ็นต์ของโบรอน} = \frac{21.622 \times 100}{69.6202} = 31.0571 \text{ กรัม}$$

เอทิลแอลกอฮอล์ หนัก 46.0223 กรัม เป็นน้ำหนักของคาร์บอน 24.0223 กรัม

$$\text{ดังนั้น มีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน} = \frac{24.0223 \times 100}{46.0223} = 52.1439 \text{ กรัม}$$

ขั้นตอนที่ 4 เนื่องจากสาร 1 โมลประกอบด้วยจำนวน 6.02×10^{23} อะตอม

ดังนั้นโบรอนออกไซด์ 1 โมล ประกอบด้วยโบรอนจำนวน $6.02 \times 10^{23} \times 31.0571$ อะตอม

ถ้า โบรอนออกไซด์ A โมล ประกอบด้วยโบรอนจำนวน $6.02 \times 10^{23} \times 31.0571 \times A$ อะตอม

ในกรณีของเอทิลแอลกอฮอล์

ถ้ามีเอทิลแอลกอฮอล์ B จะประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน $6.02 \times 10^{23} \times 52.1439 \times B$ อะตอม

โดยที่

$$A = \frac{\text{น้ำหนักโบรอนไตรออกไซด์ (กรัม)}}{69.6202} \quad \text{โมล} \quad (8)$$

$$B = \frac{\text{น้ำหนักเอทิลแอลกอฮอล์ (กรัม)}}{46.0695} \quad \text{โมล} \quad (9)$$

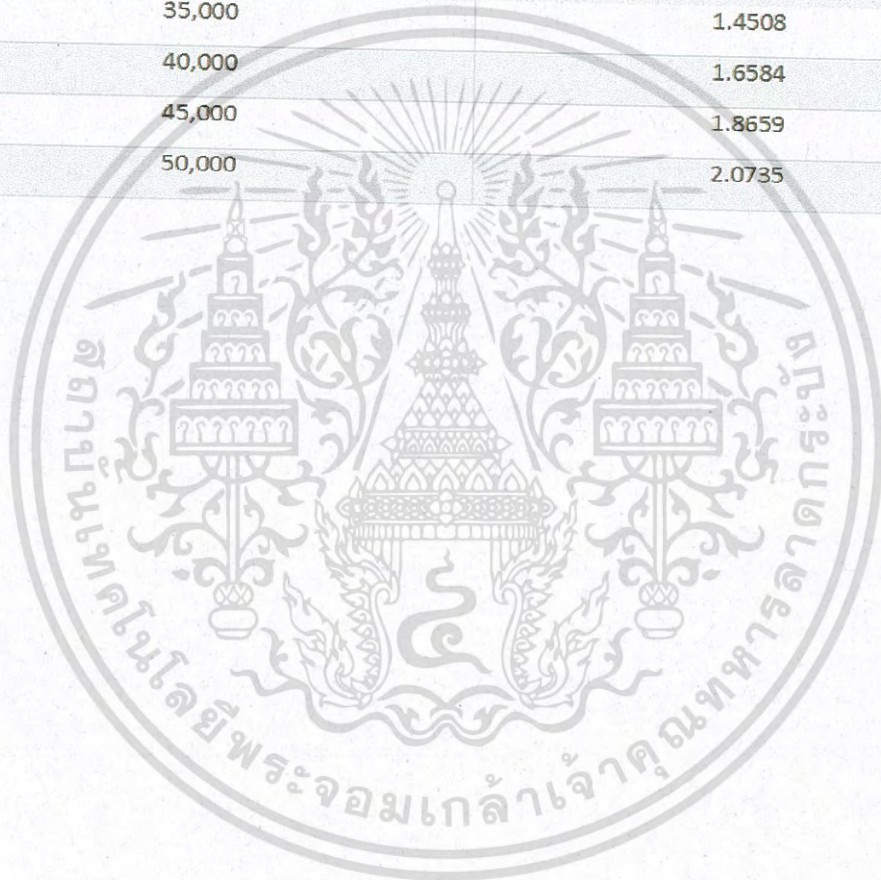
ดังนั้นอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} B/C &= \frac{6.02 \times 10^{23} \times 31.0571 \times A}{6.02 \times 10^{23} \times 52.1439 \times B} \\ &= \frac{31.0571 \times A}{52.1439 \times B} \end{aligned}$$

สำหรับน้ำหนักของโบรอนไตรออกไซด์ที่ค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน ที่เตรียมสารละลาย จำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงน้ำหนักโบรอนไตรออกไซด์ที่ค่า B/C ต่างๆ ที่เตรียมเอทิลแอลกอฮอล์จำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

B/C (ppm)	น้ำหนัก โบรอนไตรออกไซด์ (กรัม)
10,000	0.4151
15,000	0.6025
20,000	0.8281
25,000	1.0356
30,000	1.2432
35,000	1.4508
40,000	1.6584
45,000	1.8659
50,000	2.0735



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] นางสาวประภัสสร มีเคลือบ นายปิยชาติ สดงาม และวิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง “การสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยวิธี HFCVD “ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8



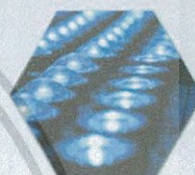
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



EENET2016

Innovation for Sustainability Entrepreneur

25-27 May 2016, Duangjitl Resort & Spa,
Patong Beach, Phuket



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

**The 8th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajamangala University of Technology**



Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

การสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยวิธี HFCVD

SYNTHETIC OF LARGE DIAMOND CRYSTALS BY HFCVD

ประภัสสร นิลเลื่อน ปิยะชาติ ศตวงษ์ วสันต์ ปัญญาเลิศ 'ชาภา สุริยาอมรานนท์' วิไลลักษณ์ ศิริวงษ์ศิริสรร และ 'วิศุทธิ์ รุจิรุ้งเรือง

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ถนนลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทรศัพท์: 023298344 E-mail: joejpeep3@hotmail.com, kmultec_hd@outlook.com, wasimerc@gmail.com, krwisut@kmitl.ac.th

EL12

บทคัดย่อ

ในรายงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอชุดสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD ชุดใหม่ที่สามารถสังเคราะห์ เป็นเวลาต่อเนื่องกันได้นานถึง 24 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเกิดภายใน 108 ชั่วโมงแรกเป็น 6.25 $\mu\text{m/hr}$ หลังจากนั้นอัตราการเกิดจะลดลงเหลือ 2.02 $\mu\text{m/hr}$ ซึ่งเมื่อขึ้นได้คือ ภาพถ่าย Scanning electron microscopy (SEM) ซึ่งในรายงานวิจัยนี้ได้ใช้ เวลาในการสังเคราะห์ทั้งสิ้น 192 ชั่วโมง ได้ผลึกเพชรขนาด 1.26 mm โดยมีค่าความต้านทานประมาณ 1.18 M Ω ซึ่งเท่ากับเพชรธรรมชาติ ยิ่งไปกว่านั้นยังได้ทดสอบเพื่อยืนยันความเป็น "เพชร" ด้วยวิธี Raman Spectroscopy แสดงให้เห็นค่าจุดยอดคลื่นที่ 1332 cm^{-1} อันเป็นค่าของ เพชรธรรมชาติอีกด้วย

คำสำคัญ: ผลึกเพชรขนาดใหญ่, วิธี HFCVD

Abstract

This research proposes a device to synthesis diamond by HFCVD. This diamond synthesis device can be operated up to 24 h continuously. The growth rate within the first 108 h is 6.25 $\mu\text{m/hr}$ and after that the growth rate decreased to 2.02 $\mu\text{m/hr}$ as illustrated by images of scanning electron microscopy (SEM). The synthesis time used in this research is totally 192 h. The synthetic diamond crystal of 1.26 mm was obtained with the resistance of 1.18 M Ω , which is equal to the natural diamond. 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 wavelength of 1332 cm^{-1} .

Keywords: Large Diamond Crystal, HFCVD

1. บทนำ

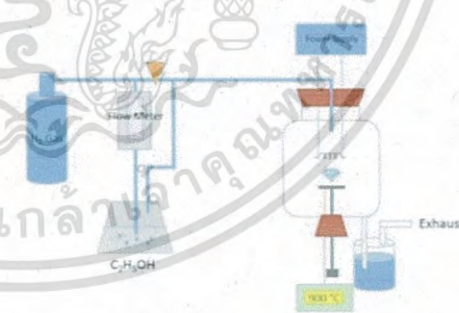
การสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD [2] เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เพชรที่มีต้นทุนที่ต่ำและปลอดภัยสูง แต่มี

ปัญหาในเรื่องระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่อเนื่องได้ไม่ถึง 2 ชั่วโมง ทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่พอที่จะใช้ในงานประยุกต์ ในงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งในอดีตมีการนำเสนอผลการสังเคราะห์ผลึกเพชร ขนาด 600 μm ใช้เวลา 19 ชั่วโมง [1] โดยมีอัตราการโตของผลึกเพชร 31.57 $\mu\text{m/hr}$ ซึ่งเมื่อขนาดของผลึกเพชรมีขึ้นอัตราการโตก็จะลดลง โดยขนาดของผลึกเพชรจะขึ้นกับระยะเวลาในการสังเคราะห์อย่างเห็นได้ชัด แต่ด้วยเวลาต่อเนื่องในการสังเคราะห์ที่ยาวนานอยู่ที่ 2 ชั่วโมง จึงเป็นการยากที่จะสังเคราะห์ให้ได้ขนาดผลึกเพชรขนาดใหญ่เป็นมิลลิเมตร

ในรายงานวิจัยนี้ได้แก้ปัญหาโดยการปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์ผลึกเพชรแบบ HFCVD ให้สามารถสังเคราะห์ต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและสามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรได้ขนาด 1.26 mm โดยระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งหมด 192 ชั่วโมง

และเพื่อยืนยันไว้ว่าผลึกที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็นผลึกเพชร จึงทำการยืนยันโดยใช้วิธี Raman Spectroscopy ซึ่งจะแสดงจุดยอดคลื่นที่ 1332 cm^{-1} และตรวจสอบขนาดของผลึกโดยใช้ Scanning electron microscopy (SEM)

แผนผังแสดงระบบอย่างง่ายของงานสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD แสดงดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบอย่างง่ายของงานสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD

25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

โดยทั่วไปแล้วผลึกเพชรที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD นั้นจะมีขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้นได้นั้นจะขึ้นกับระยะเวลาในการสังเคราะห์และนอกจากนี้ก็จะพบกระแสไฟที่อยู่เหนือจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพชรด้วยวิธีการแอนเนลในบรรยากาศไฮโดรเจนและควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม

การวิเคราะห์ Raman Spectroscopy เป็นวิธีในการใช้วิเคราะห์ความเป็นเพชร จากการแสดงจุดยอดของกราฟ ณ ตำแหน่ง 1332 cm⁻¹

การวิเคราะห์ด้วย Scanning electron microscopy (SEM) เป็นเทคนิควิธีการที่ใช้วิเคราะห์รูปร่างลักษณะพื้นผิวของผลึกเพชรที่สังเคราะห์ขึ้น

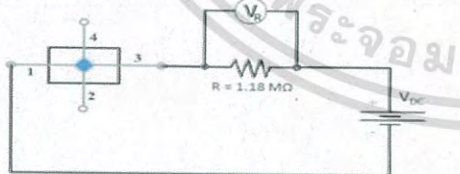
การวิเคราะห์หาค่าความต้านทานของผลึกเพชรนั้นจะหาได้จากคุณสมบัติความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

2. วิธีการทดลอง

ในการสังเคราะห์ผลึกเพชรจะใช้วิธีการ HFCVD โดยใช้แก๊ส H₂ เป็นตัวนำโมเลกุลของเอทานอล โดยมีอัตราการไหล 14 sccm เข้าไปในหลอดแก้วทดลอง ดังสมการที่ 1 อะตอมของคาร์บอนจะตกลงบนฐานรองซิลิกอนที่ควบคุมอุณหภูมิของฐานรองประมาณ 900 °C เป็นเวลา 12,36,60,84,108,132,156,180,192 ชั่วโมง



นอกจากนั้นในการทดลองนี้จะทำการเติมน้ำด้วยบรรยากาศของ H₂ ที่อุณหภูมิฐานรอง 900 °C เป็นเวลา 9 นาที ทุกๆ 12 ชั่วโมง เพื่อที่จะกำจัดกระแสไฟที่มีปะปนอยู่กับผลึกเพชร จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปวัดขนาดด้วยไมโครมิเตอร์และลักษณะผิวของผลึกเพชรทุกๆ 24 ชั่วโมง ด้วย Scanning electron microscopy (SEM) และวิเคราะห์ผลึกเพชรด้วย Raman Spectroscopy จากนั้นทำการวัดค่าคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของผลึกเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นที่เวลา 192 ชั่วโมงซึ่งมีขนาด 1260 μm เพื่อเทียบกับผลึกเพชรธรรมชาติ เพื่อหาความต้านทาน โดยนำกระแสไฟฟ้าไหลเวียนกับผลึกเพชรทั้งหมด 4 ชั่วโมงทำการจ่ายแรงดันเพื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพชรตั้งแต่ 3 โวลต์ไปจนถึง 15 โวลต์ โดยใช้วงจรทดลองดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรที่ใช้หาความต้านทานระหว่างกระแสกับแรงดัน

จากการทดลองจะหาค่าแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านผลึกเพชร เพื่อใช้ในการหาค่าความต้านทานผลึกเพชรโดยใช้สมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

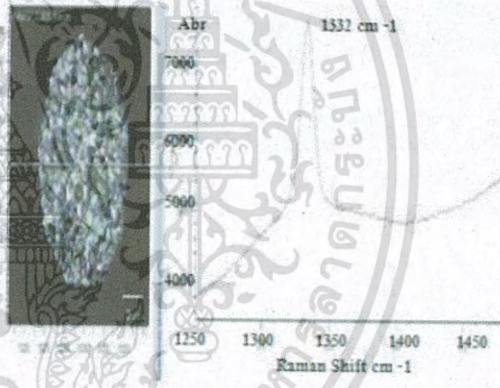
$$V_{(\text{diamond})} = V_{DC} - V_R \quad (2)$$

$$I_{(\text{diamond})} = V_R / R \quad (3)$$

นำค่าแรงดันและกระแสที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดัน ซึ่งจะได้อ่านค่าความต้านทานของผลึกเพชรจากส่วนกลับของความชันของกราฟของกราฟนี้ ทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่ได้จากข้อที่ 4 ขั้ว และเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานที่ได้จากผลึกเพชรธรรมชาติโดยใช้วิธีแบบเดียวกัน

3. ผลการทดลอง

จากการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมงบนฐานรองซิลิกอนพบว่า คาร์บอนเริ่มก่อตัวเป็นผลึกพอที่จะสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าความต้านทานของผลึกเพชรด้วย Raman Spectroscopy ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ผลึกเพชรด้วย Raman Spectroscopy

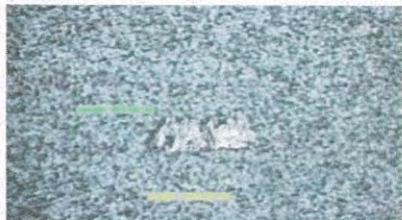
จากรูปที่ 3 พบว่ากราฟแสดงจุดยอด ณ ตำแหน่ง 1332 cm⁻¹ ซึ่งบ่งบอกว่า เป็น "ผลึกเพชร" แต่ยังไม่สมบูรณ์ทั้งหมดเพราะยังมีจุดยอดอื่นๆ อีกด้วย และเมื่อนำไปวัดขนาดรูปร่างด้วย SEM พบว่ามีขนาด 490 μm ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งยังมีขนาดไม่ใหญ่พอที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ จึงนำกลับไปสังเคราะห์ต่อ พร้อมทั้งทำการปรับปรุงคุณภาพผลึกเพชรหลังจากการสังเคราะห์ทุกๆ 12 ชั่วโมง โดยวิธีการแอนเนลในบรรยากาศของ H₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)



รูปที่ 4 ขนาดรูปร่างพื้นผิวจาก SEM ของชิ้นงานที่สังเคราะห์ 12 ชม.



รูปที่ 8 วิเคราะห์พื้นผิวด้วย SEM ที่การสังเคราะห์เป็นเวลา 192 ชม.

จากรูปที่ 4 จะพบผลึกเพชรที่มีขนาด 490 nm อยู่ในกลุ่มของฟิล์มเพชรซึ่งยังมีขนาดไม่ใหญ่พอที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน

ส่วนการวิเคราะห์ขนาดรูปร่างพื้นผิวด้วย SEM จะทำทุกๆ 24 ชั่วโมงหลังจากการสังเคราะห์ซึ่งผลจากภาพถ่าย SEM แสดงดังรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 8

จากภาพจะพบว่าผลึกเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ เมื่อระยะเวลาในการสังเคราะห์นานขึ้น เมื่อทำการสังเคราะห์เป็นระยะเวลา 192 ชั่วโมงผลึกเพชรนั้นมีขนาดใหญ่ถึง 1260 nm



รูปที่ 6 วิเคราะห์พื้นผิวด้วย SEM ที่การสังเคราะห์เป็นเวลา 36 ชม.



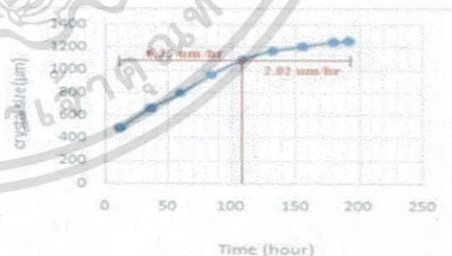
รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ที่มีผลวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

เมื่อทำการตรวจสอบยืนยันความเป็นเพชรด้วย วิธี Raman Spectroscopy เทียบกับเพชรธรรมชาติจะได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นว่ามีการตอบสนอง เช่นเดียวกับกับเพชรธรรมชาติทุกประการ

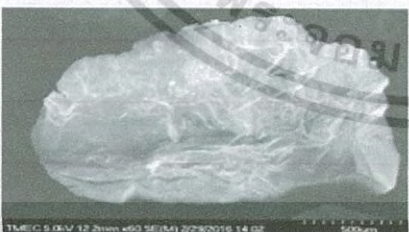
ดังนั้นการวิเคราะห์ผลึกกราฟิตไดโดยนัยที่ได้จากการวัดขนาดของผลึกเพชรที่ทำการสังเคราะห์ด้วยเวลาต่างๆ นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดผลึกเพชรและเวลาการสังเคราะห์ซึ่งแสดงได้ดังรูปกราฟที่ 10 ซึ่งจะเห็นว่าในช่วง 108 ชั่วโมงแรกผลึกเพชรจะมีอัตราการโต 6.25 nm/hr จากนั้นอัตราการโตจะลดลงเหลือ 2.02 nm/hr



รูปที่ 6 วิเคราะห์พื้นผิวด้วย SEM ที่การสังเคราะห์เป็นเวลา 84 ชม.



รูปที่ 10 กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผลึกเพชรกับเวลาในการสังเคราะห์



รูปที่ 7 วิเคราะห์พื้นผิวด้วย SEM ที่การสังเคราะห์เป็นเวลา 180 ชม.

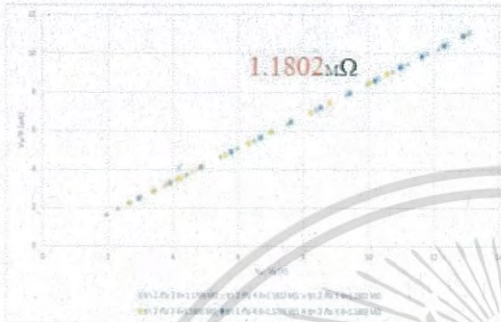
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

จากนั้นทำการวัดค่าคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของผลึกเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นที่เวลา 192 ชั่วโมงที่มีขนาด 1260 μm เพื่อเทียบกับเพชรธรรมชาติ ที่มีขนาดพอๆกัน ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นกราฟ ดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ตามลำดับ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของผลึกเพชรสังเคราะห์



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเพชรธรรมชาติ

จากนั้นหาความต้านทาน จากความสัมพันธ์ของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของผลึกเพชร พบว่าผลึกเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์มีความต้านทานเท่ากับ 1.1802 $\text{m}\Omega$ ส่วนผลึกเพชรที่ได้จากธรรมชาติมีความต้านทานเท่ากับ 1.1799 $\text{m}\Omega$

4. สรุปผลการทดลอง

จากการใช้ชุดทดลอง HECVD ใหม่ที่ได้นำเสนอในการรายงานวิจัยนี้ พบว่าสามารถทำการทดลองได้เป็นระยะเวลาติดต่อกันนาน 24 ชั่วโมงและเมื่อทำการสังเคราะห์ 192 ชั่วโมงจะได้ผลึกเพชรที่มีขนาด 1260 μm ซึ่งมีขนาดพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆได้ อีกทั้งเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์นี้ยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกับเพชรธรรมชาติอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้อำนวยการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณพนักงาน TMEC ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการวิเคราะห์ด้วย Scanning electron microscopy (SEM) และขอขอบคุณพนักงานบริษัท WESTREN DIGITAL ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ในครั้งนี้จนกระทั่งประสบผลสำเร็จได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ลัดดาวัลย์ สุภาดิ "การปลูกผลึกเพชรด้วยเทคนิค HFCVD" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544
- [2] บัญชา กิตติรังสี , นริศ จันทร์แดง , วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง , ดร. สมเกียรติ สุกคร "ผลของอุณหภูมิฐานรองต่อ ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17, พ.ศ. 2557

ประวัติผู้เขียน



นางสาวประภัสสร มีเกื้อม จบการศึกษาระดับปริญญาตรีคณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี มทร.ธัญบุรี ปัจจุบันกำลังศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโคร อิเล็กทรอนิกส์ สจล.



นายปิจชาติ สดงาม จบการศึกษาระดับปริญญาตรีคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง จบการศึกษาระดับ Doctor of Engineering (Solid State Electronics) จาก Tokai University ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์ สจล.

25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวประภัสสร มีเคลือบ
วัน เดือน ปีเกิด	26 ธันวาคม 2532 ที่จังหวัดสิงห์บุรี
ที่อยู่	77/8 หมู่ 3 ต.สิงห์ อ.บางระจัน จ.สิงห์บุรี 16130
ประวัติการศึกษา	2554 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2.) HFCVD 3.) Diamond Crystals

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] นางสาวประภัสสร มีเคลือบ นายปิยชาติ สดงาม และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง “การสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยวิธี HFCVD “ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8