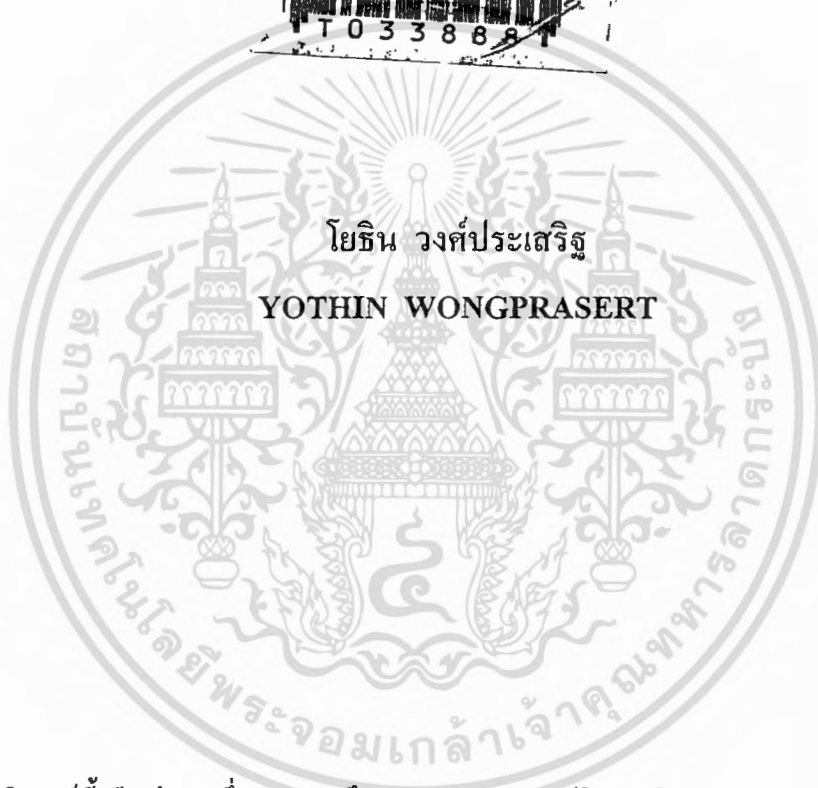


เทคโนโลยีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี COMBUSTION ACTIVATION

THE SYNTHESIS OF DIAMOND FILMS BY COMBUSTION
ACTIVATION TECHNOLOGY



โยธิน วงศ์ประเสริฐ
YOTHIN WONGPRASERT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

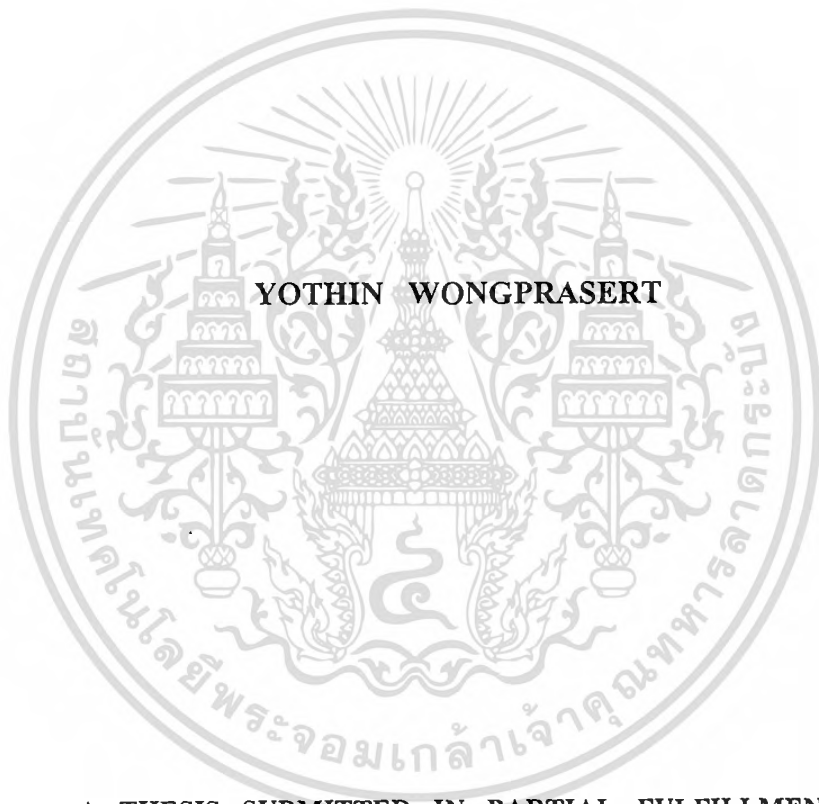
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-558-8

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 33888
วัน, เดือน, ปี 17 ก.ย. 2542

**THE SYNTHESIS OF DIAMOND FILMS BY COMBUSTION
ACTIVATION TECHNOLOGY**



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

1999

ISBN 974-622-558-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคโนโลยีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion Activation
นักศึกษา	นายโยธิน วงศ์ประเสริฐ
รหัสประจำตัว	40061055
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันพบว่าคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชรมีคุณสมบัติที่ดี เช่น มีความแข็งแรงสูง การนำความร้อนดี มีความต้านทานไฟฟ้าสูงและทนต่อการสึกกร่อน จึงได้มีผู้นำเสนอการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชรเป็นฟิล์มเพชรขึ้นด้วยเทคนิค Chemical Vapor Deposition (CVD) เป็นเทคนิคหลัก โดยสามารถแบ่งวิธีที่น่าสนใจดังนี้ Hot filament CVD, Plasma CVD และ Combustion activation

ในวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อนำเสนอการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation ซึ่งเป็นวิธีใหม่ โดยวิธีนี้ต้องประกอบด้วยปัจจัยหลักสองประการ ประการแรกคือแหล่งกำเนิดธาตุคาร์บอน ในการสังเคราะห์นี้ใช้หลักการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ระหว่างก๊าซอะเซทิลีนกับออกซิเจน ซึ่งก๊าซอะเซทิลีนที่เหลือนี้ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ประการที่สองคืออุณหภูมิที่เหมาะสมในการจัดเรียงตัวของธาตุคาร์บอนในโครงสร้างเพชร จากปัจจัยหลักทั้งสองได้ทำการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สังเคราะห์ขึ้นอย่างง่าย เมื่อทำการทดลองสังเคราะห์พบว่าอัตราการเกิดและคุณภาพของฟิล์มเพชรจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรระนาบ {111} ใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์คือ เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที ในช่วงอุณหภูมิฐานรอง 560-820°C โดยใช้อัตราส่วนระหว่างก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนเป็น 0.95 ใช้ฐานรองซิลิกอนขัดด้วยครีมเพชร มีระยะระหว่างปลายเปลวไฟขึ้นในกับฐานรองเท่ากับ 0.5 mm อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 285 cc/min อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน 300 cc/min โดยเสนอผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ อัตราการเกิด ขนาด และความหนาของฟิล์มเพชรด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Atomic Force Microscopy (AFM) ชนิดของประจุพาหะด้วยปรากฏการณ์ Seebeck ลักษณะการยึดเหนี่ยวของพันธะคาร์บอน (sp^2 หรือ sp^3) วิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy และระนาบของฟิล์มเพชรด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำการศึกษาคุณสมบัติฟิล์มเพชรเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงด้วย

Thesis Title	The Synthesis of Diamond Films by Combustion Activation Technology
Student	Mr.Yothin Wongprasert
Student ID.	40061055
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

Recently, the diamond semiconductor has various excellent properties such high hardness, high thermal conductivity, high electrical resistivity and corrosion resistance. The synthesis of semiconductor devices by diamond film has been presented by the Chemical Vapor Deposition (CVD) technique. This synthesis technique has several methods such as hot filament CVD, plasma CVD and combustion activation.

This thesis was a remarkable point of the new synthesis method that was combustion activation. There were two principles. First, we used the carbon source from the incomplete combustion reaction between acetylene and oxygen gases because the rich-acetylene gas contains carbon. Second, we controlled the temperature for carbon in diamond forming. These were basic designing and making the apparatus. However, the growth rate and the quality were very sensitive to several parameters. The {111} diamond plane was synthesized time of 20 min, substrate temperature of 560-820° C, acetylene and oxygen gas ratio of 0.95, polished silicon substrate, substrate and inner core distance of 0.5 mm, oxygen and acetylene gas flow rate of 285 cc/min and 300 cc/min respectively. The diamond films were analyzed by several techniques. Scanning Electron Microscopy (SEM) and Atomic Force Microscopy (AFM) were analyzed diamond film growth rate, grain size and film thickness. Seebeck effect was analyzed type of carrier semiconductor. Raman spectroscopy was analyzed carbon bonding (sp^2 or sp^3). X-ray diffraction was analyzed the chemical bonding. The properties of diamond films were studied on the high temperature operation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ แนวความคิด แก้ไขปัญหาและสนับสนุนงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในการสนับสนุนงานวิจัยด้วยดี ขอขอบพระคุณ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด รองคณบดีฝ่ายบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง AFM ขอขอบพระคุณ ผศ.พรศักดิ์ อรรถวนิช ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้ SEM ขอขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ Raman spectroscopy ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนในห้องซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่ช่วยให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากมูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำเนิด สนับสนุนการศึกษา และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

โยธิน วงศ์ประเสริฐ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
ศัพท์เทคนิค.....	XII
สัญลักษณ์.....	XVI
คำนำ.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 การสังเคราะห์วิธีต่างๆ.....	3
1.2.1 การสังเคราะห์ที่ความดันสูง.....	3
1.2.2 การสังเคราะห์ที่ความดันต่ำ.....	5
1.3 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	17
2.1 คุณสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำเพชร.....	17
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของ โครงสร้างคาร์บอน.....	18
2.1.2 คุณสมบัติภายใต้อุณหภูมิสูง.....	21
2.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	22
2.1.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำเพชรกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ.....	23
2.2 กระบวนการเกิดของฟิล์มเพชร.....	24
2.2.1 หลักการของเทคนิค CVD.....	24
2.2.2 กระบวนการเกิดนิวคลีเอชัน.....	34
2.2.3 การสร้างชั้นอีพิแทกเซียลฟิล์ม.....	35
2.2.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร.....	41
2.2.5 แบบจำลองการเกิดฟิล์มเพชร.....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation.....	44
2.3.1 แหล่งกำเนิดธาตุคาร์บอน.....	44
2.3.2 อุณหภูมิของฐานรอง.....	50
2.3.3 การควบคุมการเกิดของฟิล์มเพชร.....	50
2.3.4 แบบจำลองการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation.....	51
2.4 รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะ.....	52
2.4.1 รอยต่อโอห์มมิก.....	52
2.4.2 รอยต่อแบบเร็คตีไฟ.....	54
2.4.3 การสร้างรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับ โลหะ.....	55
บทที่ 3 กระบวนการสร้าง.....	56
3.1 การเตรียมชุดเครื่องมือในการสังเคราะห์.....	56
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	56
3.1.2 การประกอบชุดเครื่องมือ.....	65
3.2 กระบวนการเตรียมฐานรอง.....	66
3.2.1 การทำความสะอาดฐานรอง.....	66
3.2.2 การขัดฐานรองด้วยครีมเพชร.....	66
3.2.3 การขัดฐานรองด้วยอุลตราโซนิกในผงเพชร.....	67
3.3 การสร้างรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชร.....	67
บทที่ 4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	69
4.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM).....	70
4.2 การวิเคราะห์ด้วย Atomic Force Microscope (AFM).....	74
4.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	78
4.4 การวิเคราะห์ด้วย Seebeck effect.....	82
4.5 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy.....	83
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	89
5.1 การทดลองสังเคราะห์ผลึกเพชร.....	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.1 ตำแหน่งของเปลวไฟ.....	91
5.1.2 อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างก๊าซออกซิเจนกับอะเซทิลีน.....	93
5.1.3 อุณหภูมิฐานรอง.....	97
5.2 อัตราการเกิดและอัตราการโตของฟิล์มเพชร.....	100
5.2.1 อุณหภูมิฐานรอง.....	100
5.2.2 อัตราการไหลของก๊าซ.....	109
5.2.3 ระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้นในกับฐานรอง.....	110
5.2.4 เวลาในการสังเคราะห์.....	112
5.2.5 พื้นที่ของฟิล์มเพชร.....	114
5.3 การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	115
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์.....	118
บรรณานุกรม.....	121
ภาคผนวก.....	123
ภาคผนวก ก.....	123
ภาคผนวก ข.....	131
ประวัติผู้เขียน.....	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ.....23
2.2	แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการเตรียมพื้นผิวฐานรองซิลิกอนด้วยวิธีต่างๆ.....31
2.3	แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นการนิวเคลียชันของเพชรจากการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยวิธีต่าง ๆ.....41
2.4	อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนกับก๊าซอะเซทิลีน.....50
2.5	โลหะที่นำมาเป็นรอยต่อสัมผัส.....55
3.1	แสดงการเลือกอัตราไหลของก๊าซที่เหมาะสมกับหัวทิพขนาดต่างๆ.....62
3.2	แสดงความยาวของเปลวไฟชั้นในที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเท่ากับ 1.....62
3.3	รายละเอียดของเทอร์โมคัปเปิลแบบ Base metal และแบบ Rare metal.....64
4.1	แสดงการเปรียบเทียบการใช้เทคนิคในการวิเคราะห์พื้นผิวนิคต่าง ๆ.....75
4.2	แสดงความสัมพันธ์ของยอดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกในฟิล์มเพชร.....80
4.3	แสดงค่า Interplanar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติ (ASTM6-675).....82
4.4	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Seebeck effect.....83
4.5	แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน.....87
5.1	เงื่อนไขการสังเคราะห์โดยรวม.....89
5.2	เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ตำแหน่งเปลวไฟค่าต่างๆ.....91
5.3	เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซค่าต่าง ๆ.....93
5.4	เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ.....97
5.5	เงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ.....100
5.6	แสดงค่า Interplanar spacing ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้เทียบกับค่ามาตรฐาน ASTM(6-675).....104
5.7	เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนการไหลของก๊าซค่าต่าง ๆ.....109
5.8	เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ระยะระหว่างเปลวกับฐานรองค่าต่าง ๆ.....111
5.9	เงื่อนไขเวลาในการสังเคราะห์ค่าต่าง ๆ.....112
5.10	เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่หัวทิพขนาดต่าง ๆ.....114
6.1	เงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation.....118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แบบจำลองการบรรจุใน pyrophyllite สังเคราะห์ด้วยวิธี HPHT.....4
1.2	อุปกรณ์สังเคราะห์ด้วยวิธี HPHT.....4
1.3	รูปร่างของเพชรที่สังเคราะห์ได้จากวิธี HPHT.....5
1.4	แผนภาพระบบ Hot - filament CVD method.....7
1.5	แผนภาพระบบ DC - plasma CVD method.....8
1.6	แผนภาพระบบ DC-plasma jet CVD method.....9
1.7	แผนภาพระบบ RF-plasma CVD method.....10
1.8	แผนภาพระบบ Microwave-plasma CVD method.....11
1.9	แผนภาพระบบ Electron cyclotron resonance microwave-plasma CVD method.....12
1.10	แผนภาพระบบ Combustion activation Method.....13
1.11	แผนภาพสมดุลของคาร์บอน.....14
2.1	แบบจำลองโครงสร้างเพชร.....18
2.2	แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะ โควาเลนต์ sp^3 ของเพชร.....19
2.3	แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะ โควาเลนต์ sp^2 ของแกรไฟต์..... 19
2.4	ระนาบต่างๆ ของโครงสร้างเพชร.....20
2.5	แสดงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของเพชร.....27
2.6	แสดงกระบวนการเกิดแกรไฟต์และเพชรขณะสังเคราะห์เพชร.....28
2.7	แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่ได้จากการไปอัดฐานรองค่าต่าง ๆ.....30
2.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันกับขนาดของอนุภาคที่ใช้...33
2.9	แสดงกลไกการนิวคลีเอชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง.....35
2.10	แสดงขั้นตอนการเกิดเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร.....37
2.11	แสดงกระบวนการนิวคลีเอชันของเพชรบน Intermediate layer ของ DLC.....38
2.12	แสดงแผนภาพการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชร ในฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซมีเทนใน ไฮโดรเจน และอุณหภูมิฐานรอง.....42
2.13	แผนภาพการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค CVD.....43
2.14	แผนภาพความสัมพันธ์ของ คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน ของการเกิดเพชร.....45
2.15	แผนภาพเปรียบเทียบอัตราการเกิดของเพชรด้วยก๊าซอะเซทิลีนกับก๊าซต่างๆ.....45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16	แผนภาพแสดงอัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีน.....46
2.17	แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีน 0.70-0.98.....47
2.18	แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนเท่ากับ 1.....48
2.19	แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนมากกว่า 1.....48
2.20	แผนภาพอัตราการเกิดเพชรที่ปริมาตรสารต่างๆ.....49
2.21	แผนภาพการกระจายของอนุผลต่าง ๆ ในเปลวไฟ.....49
2.22	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซและอุณหภูมิของการเกิดผลึกเพชร.51
2.23	แผนภาพจำลองการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation.....52
2.24	แผนภาพแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแบบรอยต่อโอห์มมิก.....53
2.25	แผนภาพแถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดพีแบบรอยต่อโอห์มมิก.....53
2.26	แผนภาพแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแบบรอยต่อเรกติไฟ.....54
2.27	แผนภาพแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีแบบรอยต่อเรกติไฟ.....55
3.1	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวเชื้อ.....57
3.2	การทำงานของห้องผสมก๊าซแบบสมดุลความดันก๊าซหรือความดันสูง.....58
3.3	การทำงานของห้องผสมก๊าซแบบสมดุลความดันต่ำหรือชนิดหัวฉีด.....58
3.4	ลักษณะเปลวคาร์บูไรซิง.....60
3.5	ลักษณะเปลวนิวตริล.....60
3.6	ลักษณะเปลวออกซิไดซิง.....61
3.7	ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล.....63
3.8	ชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี Combustion activation.....65
3.9	ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์.....65
4.1	แสดงลักษณะรูปร่างของผลึกเพชรแบบต่าง ๆ.....71
4.2	แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ.....72
4.3	แสดงตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM.....74
4.4	แผนภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วย AFM.....75
4.5	การเปลี่ยนแปลงเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics).....76
4.6	วงจรป้อนกลับ (Feedback circuit) ของ AFM.....76
4.7	แผนภาพของ Scanning Probe Microscope (SPM).....77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	ภาพสามมิติจากการวิเคราะห์ด้วย AFM.....78
4.9	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก.....79
4.10	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....81
4.11	ภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วยปรากฏการณ์ Seebeck.....83
4.12	แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น.....85
4.13	แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่าง ๆ กัน.....86
5.1	ลักษณะผิวที่ใช้ในการสังเคราะห์.....90
5.2	ผลึกเพชรจากเปลวไฟชั้นกลาง.....92
5.3	การวิเคราะห์ผลึกเพชรที่สังเคราะห์บริเวณเปลวไฟชั้นกลางด้วยเทคนิค Raman spectroscopy.....92
5.4	ลักษณะผลึกที่สังเคราะห์จากอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซค่าต่าง ๆ.....94
5.5	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ที่อัตราส่วนก๊าซค่าต่าง ๆ.....95
5.6	แผนภาพขนาดผลึกที่อัตราส่วนโดยปริมาตรก๊าซค่าต่าง ๆ.....96
5.7	ลักษณะผลึกจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ.....98
5.8	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ.....99
5.9	ขนาดของผลึกเพชรที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ.....99
5.10	ลักษณะระนาบและความหนาของฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....101
5.11	การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy102
5.12	ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรระนาบ {111}.....104
5.13	ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรระนาบ {100}.....105
5.14	ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรระนาบรวม.....105
5.15	ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ {111}.....106
5.16	ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ {100}.....107
5.17	ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบรวม.....108
5.18	ความหนาของฟิล์มที่อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนค่าต่าง ๆ.....110
5.19	ลักษณะการเกิดฟิล์มเพชรในระยะฐานรอง 0.0-0.4 mm.....111
5.20	ลักษณะผิวที่สังเคราะห์อัตราส่วนโดยปริมาตรค่าต่าง ๆ.....113
5.21	แผนภาพความหนาของฟิล์มเพชรที่เวลาต่าง ๆ.....113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.22	แสดง โครงสร้างของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	115
5.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ.....	116
5.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน R/R_r กับอุณหภูมิ ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $400\text{ }^{\circ}\text{C}$)	117



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

กระเจิง	Scattering
กระตุ้น	Activation
ก๊าซเฟส	Gas phase
การเลี้ยวเบน	Diffraction
การดูดกลืน	Absorption
การปลูกผลึก	Growth
การแพร่	Diffusion
กริด	Grid
เกรน	Grain
แกรไฟต์	Graphite
ควอตซ์	Quartz
ความเข้มข้น	Concentration
ความเข้มสัมพัทธ์	Relative intensity
ความคล่องตัว	Mobility
ความผิดพลาด	Error
ความเร็วลอยเลื่อน	Drift velocity
ความหนาแน่นการนิวเคลียส	Nucleation density
คาร์บอนอสัณฐาน	Amorphous carbon
ค่าคงที่โครงผลึก	Lattice constant
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
คริมเพชร	Diamond paste
แคโทด	Cathode
โครงผลึก	Lattice
เจือสาร	Dope
ฉนวน	Insulator
ซิลิกอนไดออกไซด์	Silicon dioxide
เซนเซอร์	Sensor
ฐานรอง	Substrate
ดัชนีมิลเลอร์	Miller indices

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

คิซชาร์ท	Discharge
ตัวเก็บประจุ	Capacitor
ตัวต้านทาน	Resistor
ตัวแปร	Parameter
ไตรคลอโรเอทิลีน	Trichloroethylene
แถบกว้าง	Broad band
แถบพลังงาน	Energy band
แถบพลังงานต้องห้าม	Forbidden energy band
ทังสเตน	Tungsten
เทอร์โมคัปเปิล	Thermocouple
น้ำบริสุทธิ์	Deionized water
นิวคลีเอชัน	Nucleation
นิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน	Homogeneous nucleation
นิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน	Heterogeneous nucleation
นิวคลีไอ	Nuclei
บัฟเฟอร์	Buffer
ไบอัส	Bias
ไบอัสไปข้างหน้า	Forward bias
ไบอัสย้อนกลับ	Reverse bias
เปลวคาร์บูไรซิง	Carburizing flame
เปลวนิวทรัล	Neutral flame
เปลวออกซิไดซิง	Oxidizing flame
เป้า	Target
ผงเพชร	Diamond powder
ผลึกเพชร	Diamond crystal
แผ่นซิลิกอนที่ขัดมันเป็นกระจกเงา	Mirror-polished silicon
พลังงานกระตุ้น	Activation energy
พลาสมา	Plasma
พาหะ	Carrier
พาสซีฟ	Passive

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

พันธะ	Bond
พันธะแขวนขาด	Dangling bond
พันธะโควาเลนต์	Covalent bond
เพชร	Diamond
เพชรธรรมชาติ	Natural diamond
ฟลักซ์อิเล็กตรอน	Electron flux
ฟิล์มเพชร	Diamond films
เฟส	Phase
โฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
ยูนิตเซลล์	Unit cell
รอยขีด	Scratch
ระนาบ	Plane
รังสีเอ็กซ์	X-ray
รีแอคแตนต์	Reactant
รีแอคเตอร์	Reactor
ลำอิเล็กตรอน	Electron beam
เลเซอร์ไดโอด	Laser diode
สนามไฟฟ้าพังทลาย	Breakdown field
สภาพต้านทาน	Resistivity
สเปกตรัม	Spectrum
สังเคราะห์	Synthesis
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
แหล่งจ่าย	Source
ออปโตอิเล็กทรอนิกส์	Optoelectronics
อนุภาค	Species
อะซีโตน	Acetone
อะตอม	Atom
อะตอมสารเจือผู้รับ	Acceptor
อะตอมสารเจือผู้ให้	Donor

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

อิเล็กตรอน	Electron
อิเล็กตรอนลำดับที่สอง	Secondary electron
อิเล็กโทรด	Electrode
อิ่มตัว	Saturated
อุลตราโซนิก	Ultrasonic
เอทิลแอลกอฮอล์	Ethylalcohol
แอโนด	Anode
แอคทีฟ	Active
โฮล	Hole
ไฮโดรคาร์บอน	Hydrocarbon



สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a-C	คาร์บอนอสัณฐาน	-
a-Si	ซิลิคอนอสัณฐาน	-
t	อุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$
C_d	อะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าของเพชร	-
C_d^*	อะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น	-
d	ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม	\AA
Nd	ความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันที่บริเวณพื้นผิว	cm^{-2}
Nr	อัตราการนิวคลีเอชันที่บริเวณพื้นผิว	$\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$
h	ค่าคงที่ของพลังค์	J.s
λ	ความยาวคลื่น	\AA
θ	มุม	Degree
W	กำลัง	Watt
V	แรงดันไฟฟ้า	Volt
μ	ค่าความคล่องตัว	$\text{cm}^2/\text{V.s}$
ϵ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	F/cm
K	อุณหภูมิสัมบูรณ์	K
DLC	Diamond Like Carbon	-
sccm	ปริมาณการไหลของก๊าซ	cm^{-3}
P	ความดัน	Pa
ppm	ความเข้มข้น	ต่อล้านส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการสังเคราะห์ฟิล์มขึ้นด้วยวิธีต่างๆอย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่จะเป็นการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Chemical Vapor Deposition (CVD) เป็นหลัก ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบ Hot Filament และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เทคนิค CVD แบบต่างๆ มีหลายวิธี Combustion activation เป็นเทคโนโลยีล่าสุดที่มีข้อดีหลายประการแต่ยังขาดผู้ที่ทำการค้นคว้าวิจัยถึงรายละเอียดของค่าตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนองานวิจัยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยทำการศึกษาปัจจัยและความเป็นไปได้ของการทำชุดเครื่องมือเพื่อสะดวกในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ผลของงานวิจัยจะเป็นพื้นฐานของการพัฒนาการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป รายละเอียดของวิทยานิพนธ์สามารถสรุปแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันสูงและความดันต่ำ รวมถึงการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของสารกึ่งตัวนำเพชรทางกายภาพและภายใต้อุณหภูมิสูง เมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น กระบวนการเกิดของฟิล์มเพชรของวิธี CVD ทั่วไป กระบวนการเกิดจากวิธี Combustion activation และการทำรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะแบบเร็คตีไฟ เพื่อนำไปศึกษาสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้

บทที่ 3 กล่าวถึงการเตรียมอุปกรณ์ในการสังเคราะห์ โดยทำการประกอบเป็นชุดเครื่องมือทดลองการเตรียมแผ่นฐานรองซิลิกอนด้วยการขัดด้วยครีมเพชร และอุลตราโซนิคด้วยผงเพชรทำการสังเคราะห์

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีและเทคนิคของการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มเพชร

บทที่ 5 กล่าวถึงการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ค่าตัวแปรต่างๆเพื่อจะศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ วิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิคต่างๆ

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมากมาย ทำให้เกิดเครื่องมือ เครื่องใช้และอุปกรณ์ต่างๆ ขึ้นอย่างมาก เครื่องมือเครื่องใช้ที่เกิดขึ้นนั้นสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องทุ่นแรง เครื่องอำนวยความสะดวก ซึ่งเครื่องมือเหล่านี้จะต้องถูกควบคุมให้ทำงานได้ตามความต้องการหรือทำงานโดยอัตโนมัติและปลอดภัย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถูกใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุม แม้กระทั่งรถยนต์ก็ยังใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เข้าไปมีส่วนร่วมในอุตสาหกรรม การศึกษา การสื่อสาร ความบันเทิง ตลอดจนชีวิตประจำวัน ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีกลไกในการจำ รวมทั้งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ จึงมีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีศักยภาพสูงขึ้นมาโดยตลอด

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในยุคแรกนั้น ที่สำคัญได้แก่ หลอดสุญญากาศชนิดต่างๆ และด้วยเหตุจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้านการสื่อสารและการควบคุมงานในสงคราม เป็นผลให้เกิดการค้นคว้าและค้นพบอุปกรณ์โซลิดสเตตซึ่งสร้างจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำขึ้น สารกึ่งตัวนำจึงได้มีบทบาทในงานไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์มากกว่าหลอดสุญญากาศเพราะว่ามีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้พลังงานน้อย ทำงานได้แม่นยำและประยุกต์ใช้งานได้ง่าย

สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้นั้นเป็นธาตุหมู่ IV ได้แก่ คาร์บอน ซิลิกอน เยอรมันเนียม และ ดีบุก ได้มีการนำเยอรมันเนียมมาใช้งานก่อน แต่ภายหลังมีการใช้งานอุปกรณ์ในที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือประมาณ 75°C ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเนื่องจากคุณสมบัติหรือขนาดของอะตอมที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 0.278 nm เป็นผลให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอก จะถูกกระตุ้นให้เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ง่ายซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ต้องการ ต่อมาจึงให้ความสนใจ ธาตุที่มีขนาดของอะตอมเล็กกว่าเยอรมันเนียมซึ่งได้แก่ธาตุซิลิกอน เมื่อพิจารณาพบว่าธาตุซิลิกอนมีขนาดอะตอมเล็กกว่าเยอรมันเนียมประมาณ 0.234 nm ทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนมี พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) มากกว่า สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 125°C ได้เป็นอย่างดี การพัฒนาใช้ซิลิกอนเป็นพื้นฐานงานด้านอิเล็กทรอนิกส์จึงก้าวหน้าต่อไป

ส่วนการใช้งานเฉพาะด้านเช่น ที่ความดันสูง อุณหภูมิสูง และในงานที่ความเร็วในการเปิดปิดสูง เป็นต้นนั้น การทำงานของซิลิกอนยังทำงานได้ไม่ดีเช่นเดียวกับเยอรมันเนียม ในที่สุดธาตุหมู่ IV คงเหลือเพียงธาตุคาร์บอนเท่านั้นโดยเป็นธาตุที่มีขนาดอะตอมที่เล็กที่สุดในหมู่ IV ประมาณ 0.154 nm ซึ่งต่อมาได้มีผู้วิจัยคาร์บอนในโครงสร้างเพชรพบว่ามีความสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ จึงเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำเพชร” จากคุณสมบัติที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเพชรมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งที่สุดจึงเป็นสิ่งที่ยากที่จะนำมาตัดให้ได้ขนาดและพื้นที่ตามต้องการรวมทั้งมีราคาแพง จึงได้มีแนวคิดใหม่ในการให้เกิดผลึกเพชรขนาดเล็กๆ เรียงตัวชิดติดกันจนเป็นฟิล์ม เรียกว่า “ฟิล์มเพชร”

ส่วนเทคนิคการสังเคราะห์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยเริ่มจากการสังเคราะห์ที่ความดันและอุณหภูมิสูง (HPHT : High Pressure High Temperature) จนกระทั่งสามารถสังเคราะห์ได้ ที่ความดันต่ำหรือความดันบรรยากาศ (CVD : Chemical Vapor Deposition) โดยมีการพัฒนาและ ค้นคว้าสรุปได้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1772 Antoine Lavoisier นักเคมีชาวฝรั่งเศส ได้ทดลองเผาเพชรในภาชนะที่ปิด จากการรวมแสงอาทิตย์ผ่านเลนส์ ผลที่เกิด CO_2 และผงถ่าน

ในปี ค.ศ. 1952 มีการสังเคราะห์เพชรจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับก๊าซไฮโดรเจน

ในปี ค.ศ. 1953 นักวิจัยชาวสวีเดนที่ Allmaman Sevenka Eleclriska (ASE) ได้ทำการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูงแต่ไม่มีการบันทึกรายงานถึงวิธีทำการสังเคราะห์ไว้

ในปี ค.ศ.1955 Bundy et al. ได้ทำการสังเคราะห์เพชรเป็นผลสำเร็จที่ General Electric Research Laboratories (GE) ด้วยวิธี HPHT กระบวนการสร้างเป็นการเปลี่ยนรูปคาร์บอนจากแกรไฟต์เป็นเพชร โดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง

หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาการสังเคราะห์ที่ความดันสูงอย่างต่อเนื่องแต่พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพงเพราะต้องทนต่อความดันและอุณหภูมิสูง เป็นเหตุให้มีกลุ่มนักวิจัยให้ความสนใจการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำ โดยมีการเริ่มศึกษาและพัฒนาเช่นเดียวกับการสังเคราะห์ที่ความดันสูงสรุปได้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1949 โดย W.G. Eversole et al. ประสบผลสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรบนผลึกเพชรได้จากก๊าซไฮโดรคาร์บอน

ในปี ค.ศ. 1956 Boris Spitsyn et al. ได้นำเสนอการสังเคราะห์ด้วยการแตกตัวของก๊าซ CCl_4 และ CBr_4 เกิดเพชรบนผลึกเพชร

ใน ค.ศ. 1971 Angus et al. ชาวรัสเซีย เสนอใช้อะตอมไฮโดรเจน จากการแตกตัวบริเวณไส้หลอดทั้งสแตนเพื่อกำจัดแกรไฟต์ที่เกิดขึ้นขณะสังเคราะห์เพชร

ในปี ค.ศ. 1973 โดย Proferl et al. ได้สังเคราะห์เพชรชนิดพีโดยการผสมก๊าซ B_2H_6 กับก๊าซ CH_4 ระหว่างการสังเคราะห์

ใน ค.ศ. 1981 Matsumoto et al. ชาวญี่ปุ่น เสนอการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Hot filament CVD

ในปี ค.ศ. 1982 Matsumoto et al. ชาวญี่ปุ่น เสนอการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Microwave plasma CVD

ในปี ค.ศ. 1987 Suzuki et al. ชาวญี่ปุ่น เสนอการสังเคราะห์ด้วยวิธี DC plasma CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 1988 Hirose et al. ชาวญี่ปุ่น เสนอการสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation

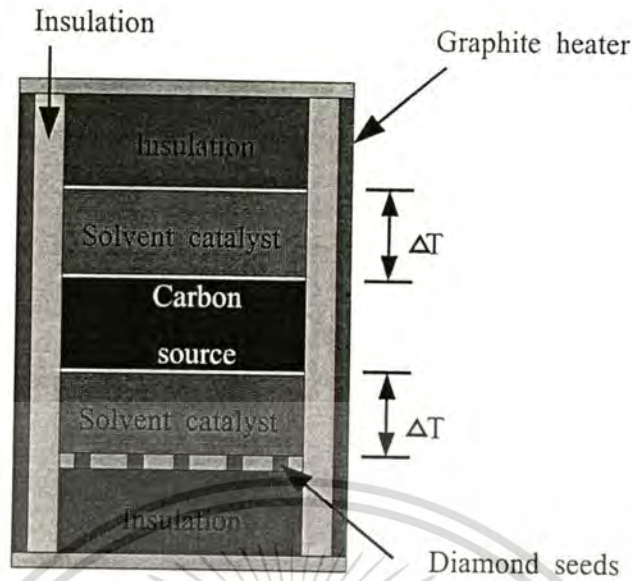
ซึ่งเทคนิคการสังเคราะห์ทั้งหมดนี้สามารถทำการสังเคราะห์บนฐานรองหลายชนิดเช่น Si, SiC, W, Cu, WC, Ta, Mo และ Al_2O_3 เป็นต้น โดยมีหลักการพื้นฐานคือการทำให้อะตอมไฮโดรคาร์บอนแตกตัวบริเวณพื้นผิวและจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างเพชร ส่วนเทคนิคในการสังเคราะห์จะนำเสนอต่อไปนี้

1.2 การสังเคราะห์วิธีต่างๆ

การสังเคราะห์เพชรในยุคแรกเป็นการสังเคราะห์เพื่อต้องการพิสูจน์ว่าสามารถเปลี่ยนคาร์บอนในรูปของแกรไฟต์ให้เป็นเพชรได้ เพราะทั้งแกรไฟต์และเพชรก็เป็นคาร์บอนเหมือนกัน ต่างกันที่ความหนาแน่นเนื่องจากโครงสร้างเท่านั้นเอง โดยแกรไฟต์มีความหนาแน่น 2.25 g/cm^3 ส่วนเพชรมีความหนาแน่น 3.52 g/cm^3 จึงมีผู้ทำการเปลี่ยนแกรไฟต์ให้เป็นเพชรโดยการให้ความดันที่มากพอพร้อมให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่กลายเป็นเพชร เนื่องจากเพชรมีราคาแพงจึงนำไปเป็นเครื่องประดับ จนกระทั่งภายหลังได้มีการพัฒนาการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำมีจุดประสงค์เพื่อนำไปใช้งานอิเล็กทรอนิกส์

1.2.1 การสังเคราะห์ที่ความดันสูง

การสังเคราะห์เริ่มขึ้นที่ General Electric Research Laboratories (GE) ได้ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธี HPHT แบบ Molten Transition Metal Solvent Catalytic โดยการนำคาร์บอนในรูปของแกรไฟต์ผสมกับโลหะเช่น นิกเกิล เหล็ก โคบอลต์ แมงกานีส แพลเลเดียม และทองคำขาว โดยบรรจุภายในหลอด Pyrophyllite ปิดด้วยโลหะทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 1.1 นำไปบรรจุในอุปกรณ์ดังรูปที่ 1.2 ทำการเพิ่มแรงดันประมาณ 1 ล้านปอนด์ต่อตารางนิ้ว จ่ายกระแสไฟผ่านไปยังโลหะที่ปิดอยู่เพื่อให้แกรไฟต์ผ่านไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง แกรไฟต์มีความต้านทานสูงทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน ทำการควบคุมกระแสเมื่ออุณหภูมิภายในสูงประมาณ 1800°C เป็นผลให้โลหะและคาร์บอนในรูปแกรไฟต์หลอมละลาย คาร์บอนในรูปแกรไฟต์จะจัดเรียงตัวใหม่เป็นผลึกเพชรส่วนโลหะจะรวมเป็นฟิล์มมีความหนาประมาณ 0.1 mm ทำหน้าที่แยกแหว่งแกรไฟต์และเพชรออกจากกัน คาร์บอนที่เหลือจะรวมตัวกับโลหะ แกรไฟต์จะเปลี่ยนเป็นเพชรโลหะ จะไหลออกจากปลายทั้งสองด้านของ Pyrophyllite ลอดอุณหภูมิด้วยการปรับกระแสไฟที่ให้อุปกรณ์ทั้งเย็นตัวแล้วจึงทำการลดแรงดันที่ให้อุปกรณ์



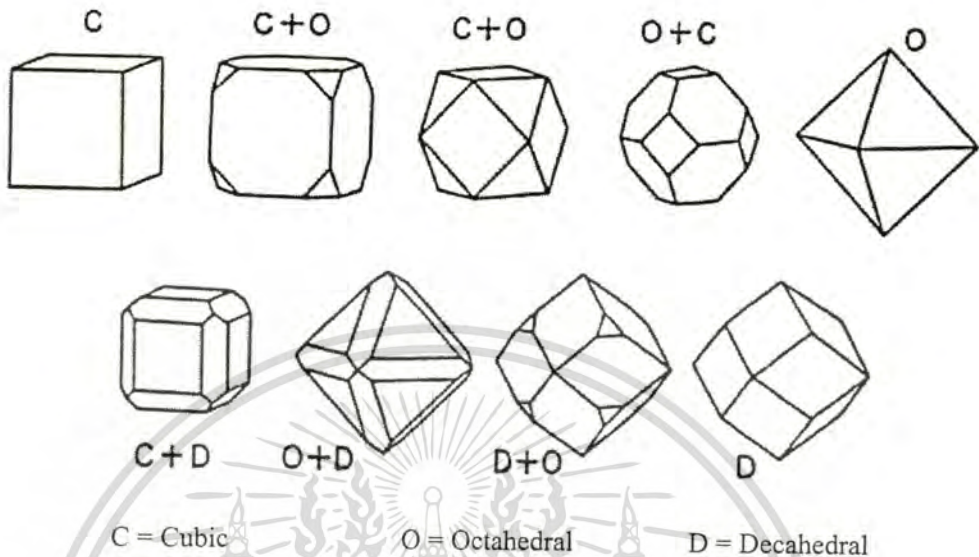
รูปที่ 1.1 แบบจำลองการบรรจุใน Pyrophyllite ตั้งเคราะห์ด้วยวิธี HPHT



รูปที่ 1.2 อุปกรณ์ตั้งเคราะห์ด้วยวิธี HPHT

ผลการตั้งเคราะห์สรุปได้ดังนี้ ขนาดของเพชรจะขึ้นอยู่กับ ชนิดโลหะที่เลือกใช้ ชนิดของแกรไฟต์ อุณหภูมิ ความดัน และเวลา รูปร่างของผลึกจะขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่าง Cubic (100) ที่อุณหภูมิ 1,300° C รูปร่าง Cubic ผสมกับ Octahedral ที่ 1,400-1,500° C รูปร่าง Octahedral (111) อุณหภูมิ 1,600° C ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 รูปร่างของเพชรที่สังเคราะห์ได้จากวิธี HPHT

นอกจากวิธี HPHT แบบ Solvent catalytic แล้วยังมีการสังเคราะห์โดยตรงซึ่งไม่ต้องใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และอีกวิธีหนึ่งเป็นการสังเคราะห์ที่ความดันสูงที่อุณหภูมิต่ำ เรียกว่า Shock wave technique จึงสรุปวิธีที่ความดันสูงได้ดังนี้

1. HPHT แบบ Molten transition metal solvent catalytic
2. HPHT แบบ Direct convert
3. HPHT แบบ Shock wave direct convert

1.2.2 การสังเคราะห์ที่ความดันต่ำ

การสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำเป็นทางเลือกใหม่ของกลุ่มผู้สนใจ เนื่องจากเครื่องมือและอุปกรณ์สามารถหาได้ง่ายราคาไม่แพง โดยมีผู้พัฒนาวิธีการสังเคราะห์แตกต่างกันออกไปแต่มีจุดประสงค์เดียวกันคือเพื่อนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และใช้การเคลือบอุปกรณ์เพื่อเพิ่มความคงทนและแข็งแรง หรือบางวิธีทำเพื่อเป็นการลดต้นทุนของกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงและคุ้มค่า อย่างไรก็ตามคุณสมบัติและคุณภาพของฟิล์มเพชรเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการสังเคราะห์ เทคนิคสำคัญที่ความดันต่ำคือเทคนิค CVD ทั้งสิ้น ซึ่งจะแตกต่างกันที่อุปกรณ์เท่านั้น มีหลักการคือการทำให้เกิดอะตอมคาร์บอนแล้วควบคุมอุณหภูมิของฐานรองให้เหมาะสม ในปัจจุบันมีการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำที่นิยมกันแพร่หลายดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

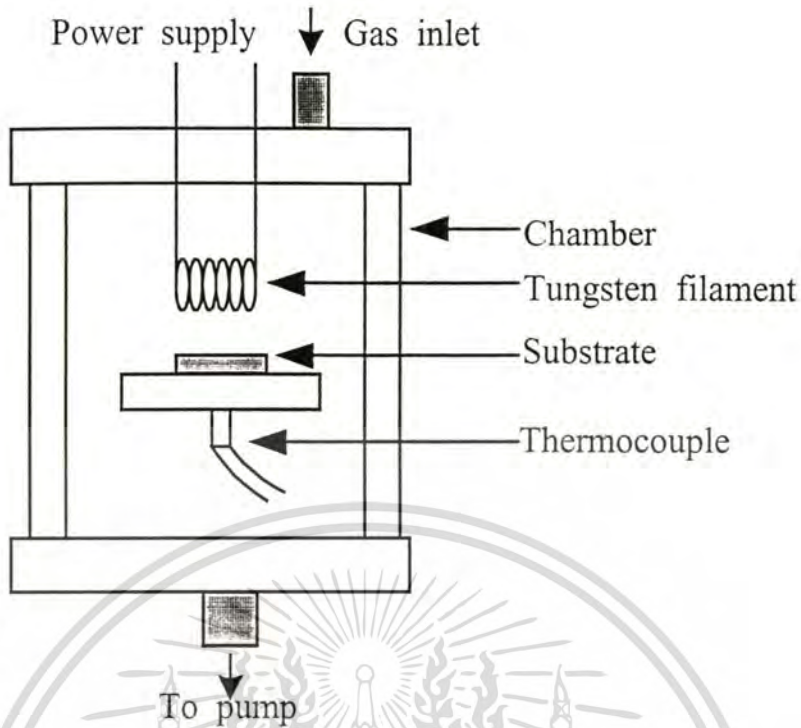
1. Hot filament CVD method
2. DC plasma CVD method
3. DC plasma jet CVD method
4. RF plasma CVD method
5. Microwave plasma CVD method
6. Electron cyclotron resonance microwave plasma CVD method
7. Combustion activation method

วิธีต่างๆมีพื้นฐานของเครื่องมือและหลักการดังนี้

1. Hot filament CVD method

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 1.4 ประกอบด้วย Chamber แหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรคาร์บอน แหล่งจ่ายไฟฟ้า ขดลวดทั้งสแตน เป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือ จ่ายไฟยังขดลวดทั้งสแตนจนมีอุณหภูมิประมาณ $2,000-2,300^{\circ}\text{C}$ ทำการผ่านก๊าซไฮโดรคาร์บอนเหนือขดลวดทั้งสแตน ก๊าซไฮโดรคาร์บอนจะเกิดการแตกตัวเนื่องจากความร้อนจากขดลวดทั้งสแตน ออกเป็นอะตอมคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจน อะตอมคาร์บอนจะตกลงบนฐานรองที่มีอุณหภูมิระหว่าง $700-1,000^{\circ}\text{C}$ การสังเคราะห์ในปัจจุบันใช้ก๊าซผสมระหว่างมีเทนต่อก๊าซไฮโดรเจน (0.5 – 2.0 % vol.) ที่ความดัน 10 – 100 torr

ฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณสมบัติดี อัตราการโต $1 - 10 \mu\text{m/h}$ สามารถสร้างฟิล์มได้บริเวณกว้าง แต่ปัญหาคืออายุการใช้งานของขดลวดทั้งสแตน

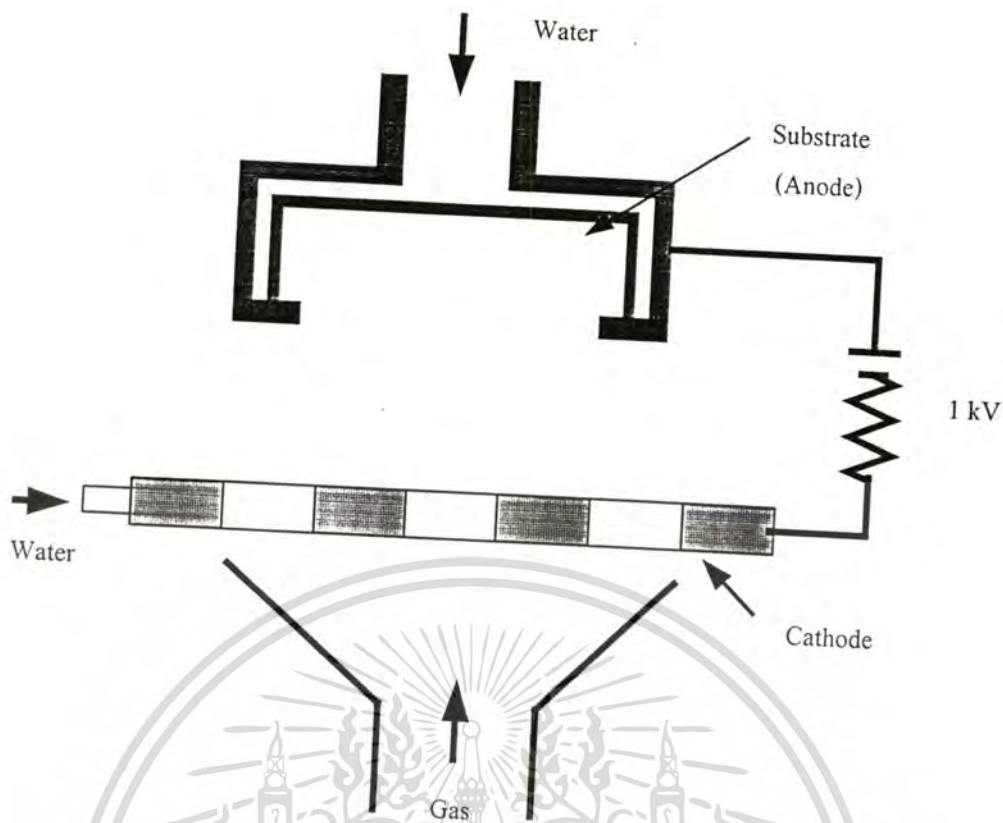


รูปที่ 1.4 แผนภาพระบบ Hot filament CVD method

2. DC plasma CVD method

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 1.5 ประกอบด้วย Chamber แหล่งจ่ายไฟ กระแสตรง แผ่นอิเล็กโทรด 2 อันขนานกัน โดยคานยึดฐานรองได้รับการไบอัสเป็นแอโนด ส่วนเพลทอีกด้านหนึ่งที่ย้ำก๊าซถูกไบอัสเป็นแคโทด แหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรคาร์บอน เป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือ แผ่นอิเล็กโทรดจะถูกไบอัสด้วยแรงดัน 1 kV ความหนาแน่นกระแส 4 A/cm² เมื่อก๊าซไหลผ่านบริเวณระหว่างแคโทดและแอโนด จะเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาขึ้น ควบคุมอุณหภูมิของฐานรองอยู่ในช่วง 600-800^o C อะตอมคาร์บอนในพลาสมาจะตกลงยังฐานรองเกิดเป็นฟิล์มเพชร ในปัจจุบันใช้อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทนต่อก๊าซไฮโดรเจน (0.5-2% vol.) ที่ความดัน 200 torr

ฟิล์มเพชรที่สร้างได้จะมีคุณภาพดีค่าอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรสูงถึง 20 μm/h สามารถสร้างได้เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 cm แต่ในบางครั้งฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นพบว่ามีการปนเปื้อนเนื่องจากแผ่นอิเล็กโทรดถูกกัดกร่อน

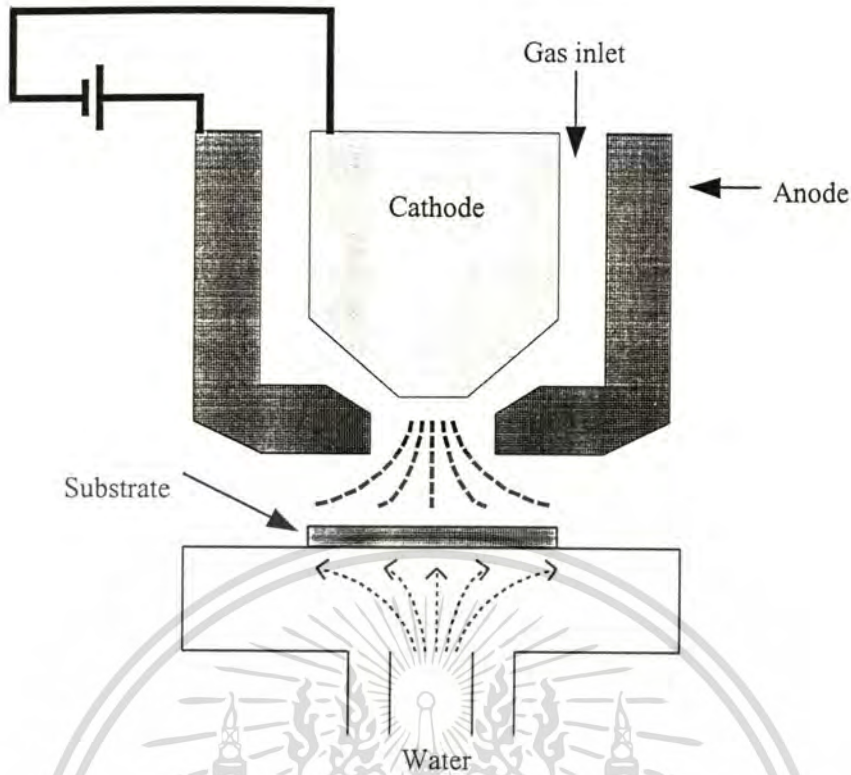


รูปที่ 1.5 แผนภาพระบบ DC plasma CVD method

3 DC plasma jet CVD Method

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 1.6 ประกอบด้วย Chamber แหล่งจ่ายไฟ กระแสตรง หัวเผาแบบขั้วแคโทดวางอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วแอโนด และแหล่งจ่ายก๊าซ ไฮโดรคาร์บอน เป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือ จ่ายกระแสไฟตรงแก่หัวเผาจะมี อุณหภูมิสูงถึง $4,000^{\circ}\text{C}$ ผ่านก๊าซไฮโดรคาร์บอนให้ไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วทั้งสอง ก๊าซจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาขึ้น ควบคุมอุณหภูมิฐานรองให้มีอุณหภูมิ ประมาณ $1,000^{\circ}\text{C}$ อะตอมของคาร์บอนจะตกลงบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มเพชร ฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีนี้มีคุณสมบัติพอใช้ มีขนาดพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 mm เป็นวิธีที่มีอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร $60\ \mu\text{m/h}$ การควบคุมอุณหภูมิที่ได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

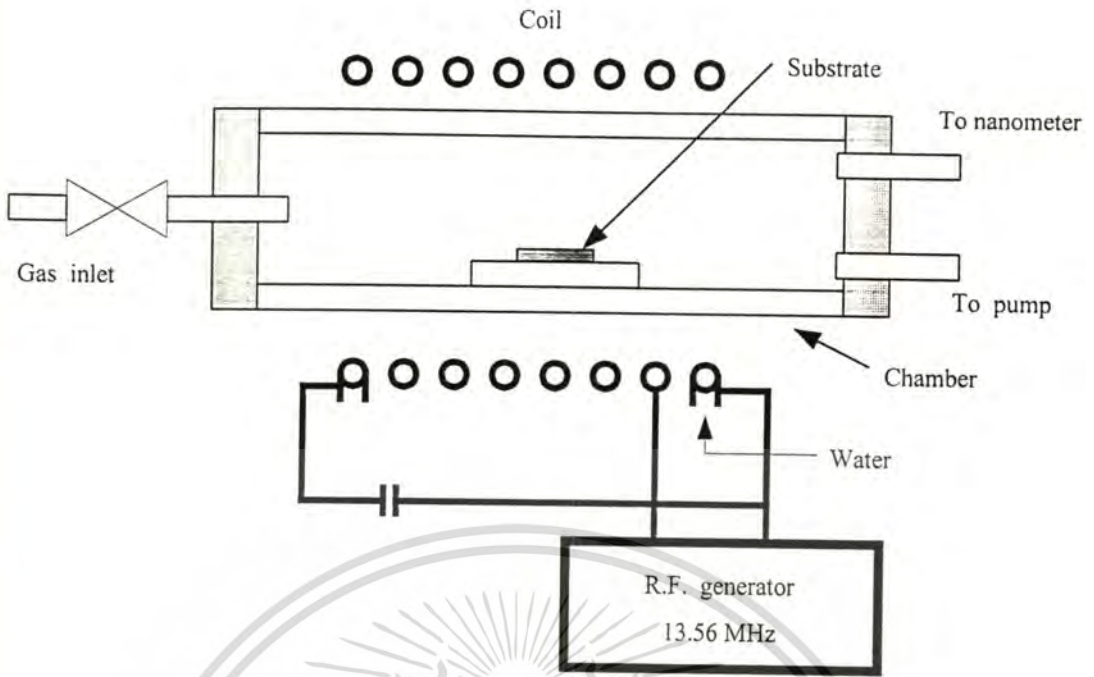


รูปที่ 1.6 แผนภาพระบบ DC plasma jet CVD method

4. RF plasma CVD method

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 1.7 ประกอบด้วย Chamber RF generator ท่อควอดซ์ คอยล์ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง และแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรคาร์บอน เป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือ RF generator กำเนิดคลื่นวิทยุที่มีความถี่ 13.56 MHz ส่งไปยังคอยล์ ทำให้เกิดพลาสมาของก๊าซขึ้นบริเวณฐานรอง โดยฐานรองจะมีอุณหภูมิประมาณ 800°C เนื่องจากผลของการเหนี่ยวนำและความร้อนจากพลาสมา อะตอมของคาร์บอนจะตกลงบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มเพชร เงื่อนไขการสร้างด้วยวิธีนี้จะใช้อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทน (0.5-2 %vol.) ต่อก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดันระหว่าง 1-30 torr ถ้า RF power 500-1,000 W อุณหภูมิของฐานรอง 800-1,000°C

ฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติของฟิล์มเพชรไม่ดีมากนัก ขนาดผลึกเล็ก แต่มีการยึดเกาะกับฐานรองดี อัตราการเกิดฟิล์มเพชรประมาณ 1-2 $\mu\text{m/h}$ ผลจากการใช้ High power จะทำให้เกิดโอระเหยที่บริเวณผิวของท่อควอดซ์ ส่งผลให้ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีสารปนเปื้อนจำพวก SiC เกิดขึ้น



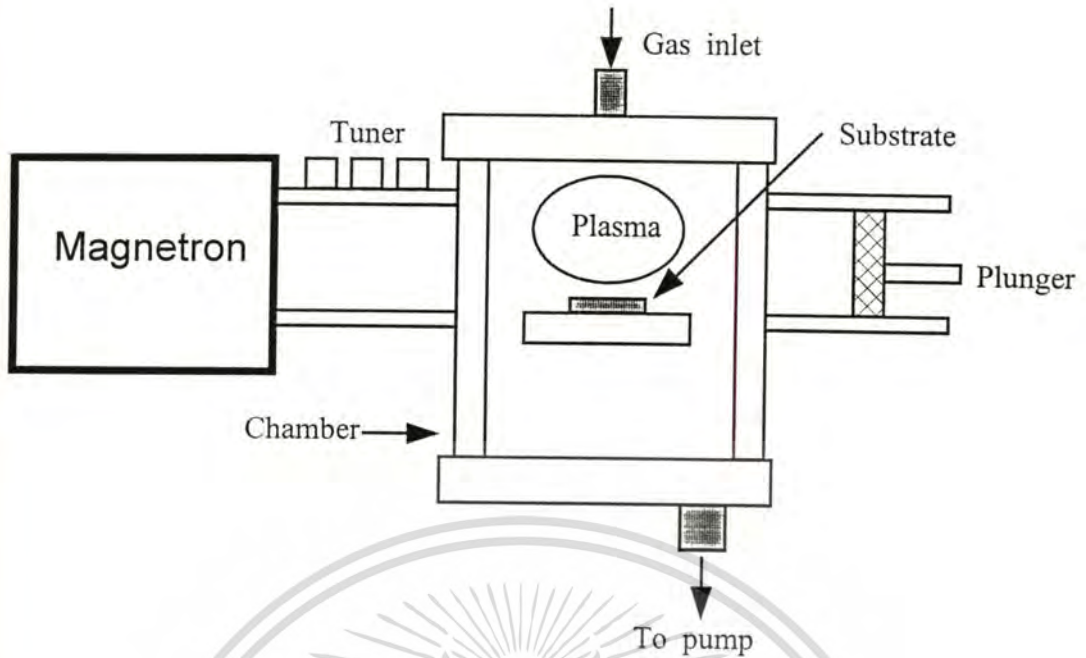
รูปที่ 1.7 แผนภาพระบบ RF plasma CVD method

5. Microwave plasma CVD method

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 1.8 ประกอบด้วย Chamber, Magnetron, Rectangular wave guide, Three stub tuners และแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรคาร์บอน เป็นอุปกรณ์หลักในการสังเคราะห์ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดปัญหาการเกิดสารปนเปื้อนในฟิล์ม ระบบประกอบไปด้วย Magnetron ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz Rectangular wave guide จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของคลื่นไมโครเวฟระหว่าง Magnetron generator และ Reaction chamber ซึ่งทำมาจากท่ออวตซ์ในตำแหน่งที่ทิศทางคลื่นไมโครเวฟจาก Rectangular wave guide พุ่งผ่าน Three stub tuners ที่บริเวณ Wave guide ใช้เป็นตัวจำกัดพลังงานที่สะท้อนจาก Applicator ให้มีค่าน้อยที่สุด คลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดพลาสมาซึ่งเกิดจากการรวมกันของอนุภาคของอะตอมไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน พลาสมาที่เกิดขึ้นจะถูกบังคับให้อยู่ตรงกลางฐานรองฐานรองจะมีอุณหภูมิ 700-1,000°C จากพลาสมาและการแผ่รังสี เงื่อนไขการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้ใช้อัตราส่วนของก๊าซมีเทนต่อก๊าซไฮโดรเจน (0.5-2.0 %vol.) กระทำที่ความดัน 5-100 torr Microwave power 100-700 W

ฟิล์มเพชรจะเกิดอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดสารปนเปื้อน อัตราการเกิดฟิล์มเพชรประมาณ 1-5 $\mu\text{m/h}$ เกิดเป็นบริเวณกว้างเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

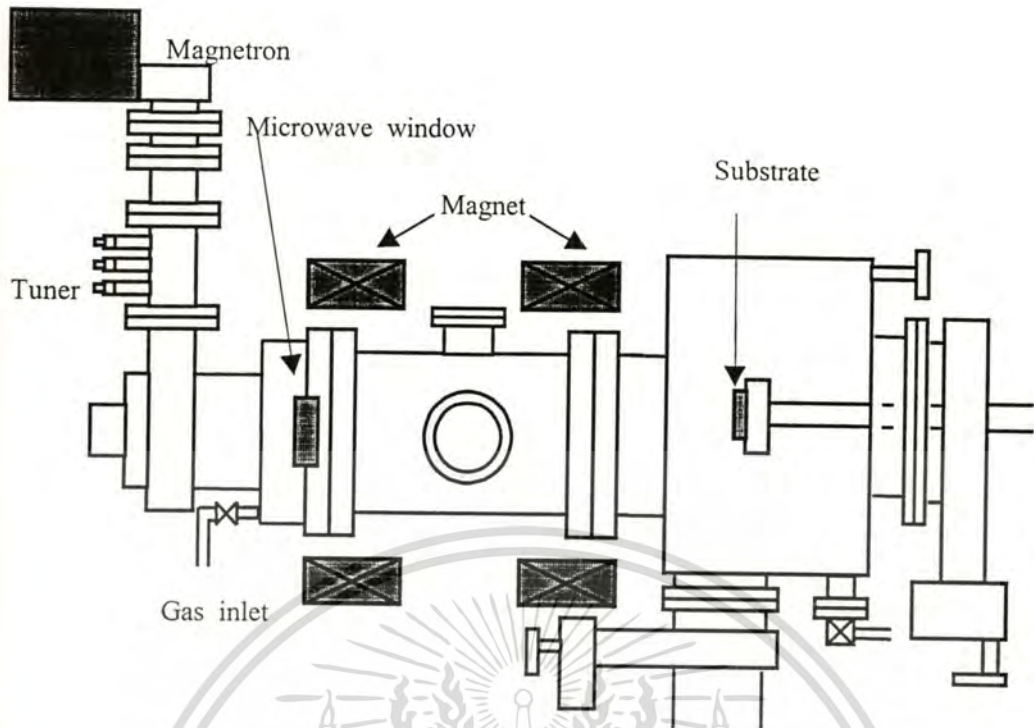


รูปที่ 1.8 แผนภาพระบบ Microwave plasma CVD method

6. Electron cyclotron resonance microwave plasma CVD method

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 1.9 ประกอบด้วย Chamber, Magnetron, Wave guide, Cylindrical cavity, Electromagnet 2 คู่ และแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรคาร์บอน เป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเกิดฟิล์มเพชรให้มีขนาดกว้างขึ้นและลดอุณหภูมิการสร้างให้ต่ำลง สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นจาก Electromagnet เพื่อใช้ควบคุมบริเวณการเกิดฟิล์มเพชร คลื่นไมโครเวฟถูกสร้างที่ความถี่ 2.45 GHz ทำให้เกิดพลาสมาของก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน ในขณะเดียวกัน Electromagnet จะให้กำเนิดสนามแม่เหล็กค่า 875 Gauss อันเป็นเงื่อนไขของการเกิด Electron cyclotron resonance ความถี่ของ Electron gyration มีค่าเท่ากับความถี่ของไมโครเวฟที่ 2.45 GHz สนามแม่เหล็กจะเกิดโดยรอบ Cylindrical cavity และทำหน้าที่ควบคุมการกระจายของพลาสมาอย่างสม่ำเสมอ ผลของ Resonance ทำให้อิเล็กตรอนมีค่าพลังงานสูงเกิดการแตกตัวของอะตอมไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนอย่างสม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้าง ในการสร้างฟิล์มเพชรใช้ความดันต่ำคือน้อยกว่า 10 torr อุณหภูมิของฐานรอง 400-600°C

ฟิล์มเพชรที่ได้มีขนาดผลึกใหญ่มีความสม่ำเสมอและคุณภาพดี

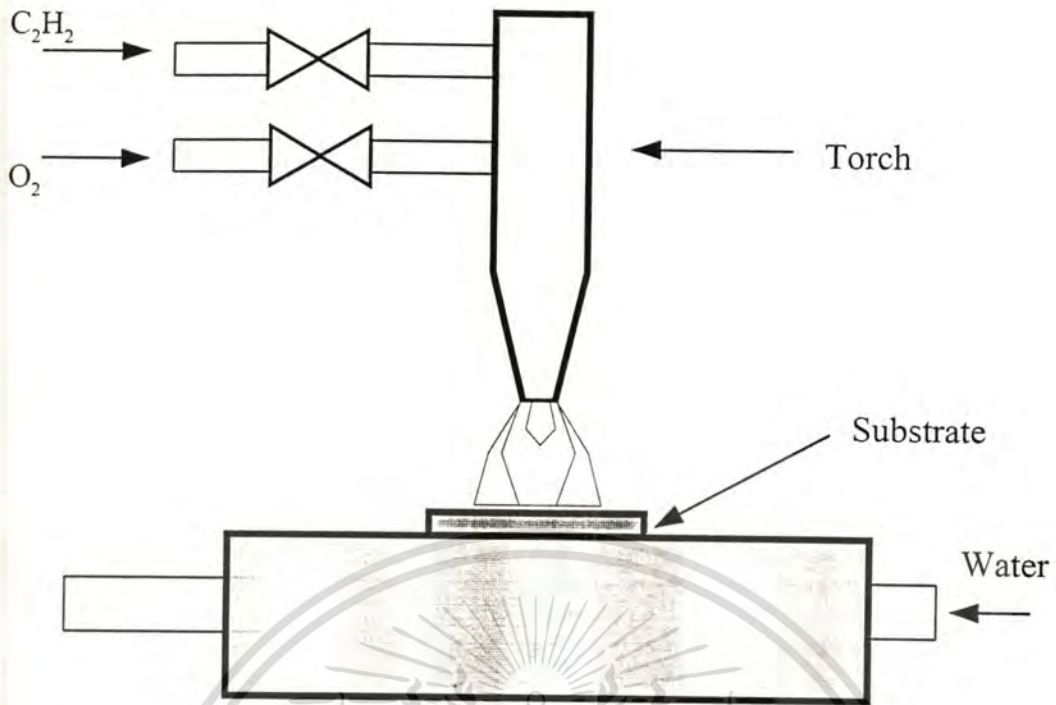


รูปที่ 1.9 แผนภาพระบบ Electron cyclotron resonance microwave plasma CVD method

7. Combustion activation CVD method

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 1.10 ประกอบด้วย หัวเชื่อม แหล่งจ่ายก๊าซ ออกซิเจนและไฮโดรคาร์บอนเป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือ ทำการเผาก๊าซออกซิเจนกับไฮโดรคาร์บอนในอัตราส่วน ประมาณ 0.70-0.95 จะปรากฏเปลวไฟเป็นสามเปลว ทำการปรับให้เปลวไฟชั้นกลางสัมผัสกับฐานรองซิลิกอน ควบคุมอุณหภูมิของฐานรองในช่วง $800-1,000^{\circ}\text{C}$ อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้จะตกลงบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มเพชร

ฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นมีคุณภาพที่ดี อัตราการเกิดของฟิล์มเพชรสูงสุดประมาณ $100\ \mu\text{m/h}$ และอัตราเฉลี่ย $30 - 50\ \mu\text{m/h}$



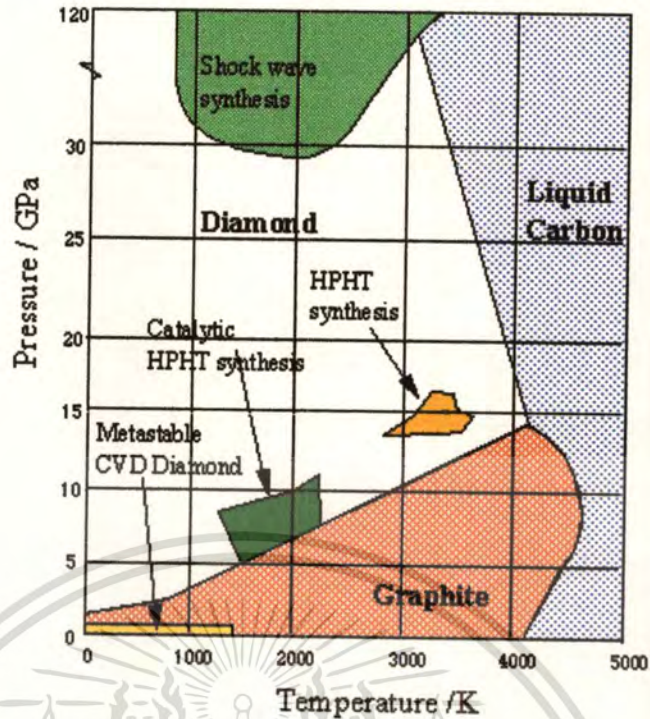
รูปที่ 1.10 แผนภาพระบบ Combustion activation method

ข้อดีของวิธี Combustion activation ที่สำคัญดังนี้

1. สามารถสังเคราะห์ในอากาศได้ ไม่ต้องใช้ Chamber และ ป้อนสุญญากาศ
2. อุปกรณ์หาง่ายราคาถูก
3. ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าขณะสังเคราะห์
4. มีอัตราการเกิดผลึกเพชรสูงสุดถึง 200 $\mu\text{m}/\text{h}$ ขณะที่ฟิล์มเพชร 100 $\mu\text{m}/\text{h}$ ค่าเฉลี่ยที่ 30-50 $\mu\text{m}/\text{h}$ และ Diamond Like Carbon (DLC) 200-500 $\mu\text{m}/\text{h}$
5. สามารถสังเคราะห์ให้ได้ฟิล์มบริเวณกว้างได้
6. สามารถสร้างบนฐานรองที่เป็นส่วนโค้งได้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิของแก๊สไฟต์และเพชรที่ทำการสังเคราะห์ในแต่ละวิธีสามารถสรุปเป็นรูปดังรูปที่ 1.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.11 แผนภาพสมดุลของคาร์บอน

1.3 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร

การประยุกต์ใช้งานของฟิล์มเพชรนั้นได้มีการนำไปใช้จากเทคนิค CVD นั้นได้นำไปใช้งานได้จริง ซึ่งการใช้นั้นจะต้องศึกษาคุณสมบัติของเพชรจากวิธีต่างๆว่าวิธีใดสามารถให้คุณสมบัติของฟิล์มได้เหมาะสมที่สุดกับงานที่จะนำไปใช้ ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งานมีดังนี้

1. อุปกรณ์ระบายความร้อน

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะเป็นตัวกำเนิดความร้อนเนื่องจากความต้านทานภายในอุปกรณ์ ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดมีความไวต่อความร้อนทำให้คุณสมบัติของอุปกรณ์ผิดพลาดได้ สารกึ่งตัวนำเพชรสามารถระบายความร้อนจากอุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็วหรือเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ดีเยี่ยม ด้วยค่าสภาพการนำความร้อน 20 W/cm K ซึ่งมากกว่าโลหะเงินถึง 5 เท่า หรือ 500% โดยโลหะเงินมีค่าสภาพการนำความร้อนเพียง 4 W/cm K ประโยชน์ที่ได้คืออุปกรณ์มีความแม่นยำและเพิ่มอายุการใช้งานของอุปกรณ์ได้

ในอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด สารกึ่งตัวนำเพชรมีบทบาทในการเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานให้มากขึ้น รวมทั้งสามารถระบายความร้อนจากอุปกรณ์ได้ดีเยี่ยม โดยให้ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนออกจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด เป็นการปฏิวัติการสร้างเลเซอร์ไดโอดกำลังสูง โดยสามารถเพิ่มแสงที่จ่ายออกมาและเพิ่มอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ในด้านการลงทุนสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดค่าใช้จ่ายในส่วนของอุปกรณ์ระบายความร้อน ทำให้ต้นทุนการสร้างลดลง อุปกรณ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ Diode Pumped Solid State Lasers (DPSSLs) และ High power laser diode array ซึ่งใช้สำหรับอุตสาหกรรมผลิตวัสดุ และ Direct to plate ในอุตสาหกรรมการพิมพ์

ในอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์กำลังสูงที่ทำงานด้วยความถี่ไมโครเวฟนั้น สารกึ่งตัวนำเพชรจัดเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมาก ซึ่งใช้ประโยชน์จากการระบายความร้อนเช่นเดียวกัน Laser diode อุปกรณ์ชนิดนี้จะเป็นอุปกรณ์ที่มีความหนาแน่นของกระแสสูงในพื้นที่เล็ก ทำให้เกิดปัญหาของการคายความร้อนออกมา สารกึ่งตัวนำเพชรนี้ลดความร้อนจากอุปกรณ์ในอัตราที่รวดเร็วเป็นผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตคลื่นวิทยุมากขึ้นอย่างมาก การเพิ่มสารกึ่งตัวนำเพชรเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งในการบรรจุรวมกับอุปกรณ์ไมโครเวฟทรานซิสเตอร์นั้นทำได้ง่ายมาก การประยุกต์ใช้งานที่เริ่มมีส่วนร่วมคือกิจการควบคุมการบินและอิเล็กทรอนิกส์ทางการทหาร การประยุกต์การใช้งานทางด้านทางทหารนั้นจะสามารถสร้างอุปกรณ์ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ใช้พื้นที่น้อย ระบายความร้อนได้ดี ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการปฏิบัติการภาคสนาม

ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น Microprocessors มีการพัฒนาถึงขั้นสามารถเพิ่มความหนาแน่นในวงจรมีได้และทำให้ความเร็วของสัญญาณคล็อกมีความถี่สูงขึ้น แม้ในปัจจุบันมีการใช้ทองแดงในการเชื่อมต่อวงจรภายในวงจรรวมและสามารถลดปัญหาความร้อนลงไปได้แล้วในระดับหนึ่ง แต่ปัญหาที่ตามมาคือการระบายความร้อนออกจากตัวชิปเอง สารกึ่งตัวนำเพชรจะเข้าไปมีส่วนร่วมในการระบายความร้อนระหว่างชิปวงจรกับภาชนะบรรจุ ประโยชน์ที่เด่นชัดคือการระบายความร้อนออกจากชิปและป้องกันการเกิดการร้อนจัดของชิปทำให้ไม่เกิดความเสียหายได้

2. เครื่องมือตัด

เพชร จากวิธี CVD จะนำมาใช้แทน Metal-cemented ผสมกับผลึกเพชร ซึ่งเป็นทางเลือกใหม่เพราะ วัสดุเพชร จากวิธี CVD เป็นเพชร 100 % ไม่มีส่วนผสมอื่นๆ มาเกี่ยวข้อง เพราะความแข็งและมีการระบายความร้อนที่ดี และที่สำคัญที่สุดคือสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่าวัสดุเดิมมาก เมื่อเปรียบเทียบราคาแล้วยังมีราคาที่ต่ำกว่าวัสดุเดิมและสามารถทำให้เพิ่มความคมของส่วนของมุมต่างๆของเครื่องมือได้ ได้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางเช่น การเคลือบใบเลื่อยไฟเบอร์ เป็นต้น ประโยชน์ที่ได้คือเพิ่มอายุการใช้งาน ผิวของชิ้นงานและรอยตัดจะมีคุณภาพที่ดีกว่า

การเคลือบด้วย วิธี CVD ในเครื่องมือที่ใช้เป็นประจำซึ่งได้แก่ ดอกสว่าน เครื่องไม้ และ อุปกรณ์ที่มีความคม การใช้งานในเครื่องมือที่ไม่มีการสะท้อนของแสงและความเร็วสูงมากๆ จะทำให้เครื่องมือมีประสิทธิภาพเต็มที่และอายุการใช้งานยาวนาน

3. อุปกรณ์ Surface Acoustic Wave (SAW)

อุปกรณ์ SAW เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์หลายชนิดเช่น คิวบิตอลไมโครเวฟ และการเชื่อมระบบเครือข่ายใยแก้ว โดยสารกึ่งตัวนำเพชรทำหน้าที่ลดความยุ่งยากของการส่งสัญญาณผ่านไปวัสดุ เช่น ลิเทียม นิโอเบท อุปกรณ์นี้สามารถลดจำนวนเครือข่ายของซมสายโทรศัพท์ และลดความยุ่งยากของระบบการเชื่อมโยงได้เช่น การสื่อสารที่ใช้ความถี่ไมโครเวฟ อุปกรณ์นี้ต้องการเพชรเพราะคุณสมบัติการนำดีที่สุดคือเท่าความเร็วของเสียงและเป็นชนิดเดียวที่มีคุณสมบัติด้านอคูสติก เพชรธรรมชาตินั้นมีราคาแพงแต่เพชรจาก CVD มีต้นทุนต่ำกว่ามาก อุปกรณ์ SAW จากเพชร จึงได้ถูกพัฒนาจากบริษัทใหญ่หลายๆ บริษัท

4. อุปกรณ์ตรวจวัดกัมมันตรังสี

เพชรจากวิธี CVD สามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสีได้ โดยใช้แทนที่ซิลิกอนซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในปัจจุบัน โดยเพชรจะมีความต้านทานลดลงเมื่อมีการแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสีสูงในสิ่งแวดล้อมหรือใช้เป็นเครื่องตรวจวัดอนุภาคในเครื่องเร่งอนุภาค ได้มีการนำไปใช้ในเครื่องวัดปริมาณกัมมันตรังสีในโรงพยาบาล ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณกัมมันตรังสีในพนักงานในหน่วยงานรังสีการแพทย์ และตรวจวัดสารกัมมันตรังสีจากยาเป็นบริเวณกว้าง จึงมีการพัฒนาให้มีความไวในการตรวจจับในบริเวณกว้างออกไป

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชร การแบ่งกลุ่มของเพชรเพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของเพชร กระบวนการเกิดฟิล์มเพชรของเทคนิค CVD ซึ่งได้กล่าวถึงหลักการสังเคราะห์ของแต่ละวิธีในบทที่ 1 แล้วนั้น โดยมีได้กล่าวถึงกระบวนการเกิดของฟิล์มเพชรของการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD ในบทนี้จึงได้อธิบายพื้นฐานการเกิดของฟิล์มเพชรและจะอธิบายการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion Activation ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเทคนิค CVD แต่มีความแตกต่างออกไปตามลักษณะของอุปกรณ์และแหล่งจ่ายก๊าซ ตลอดจนการทำปฏิกิริยาของก๊าซที่ใช้ในการสังเคราะห์ เมื่อสังเคราะห์ได้ฟิล์มเพชรแล้วทำการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้เป็นลำดับ ฉะนั้นการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรทั้งแบบโอห์มมิกและเร็คติไฟ จะพิจารณาด้วยทฤษฎีแถบพลังงาน และวิธีการเลือกโลหะที่เหมาะสมที่จะทำเป็นรอยต่อเพื่อทำการศึกษาคูณสมบัติต่อไปกล่าวถึงรายละเอียดได้ตามหัวข้อต่างๆ ดังนี้

2.1 คุณสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำเพชร

การศึกษาคูณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชรนั้น ได้มีการจำแนกประเภทเพชรที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยพิจารณาชนิดและปริมาณของสารเจือปนที่พบในเพชรนั้นๆเป็นเกณฑ์กำหนดซึ่งสามารถถูกแบ่งได้เป็น 4 ประเภทคือ

1. เพชรชนิด I_u พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความเข้มข้นของสารเจือไนโตรเจนเป็นจำนวนมาก (ตั้งแต่ 0.3 % โดยอะตอม) โดยไนโตรเจนอยู่รวมกันซึ่งเป็นลักษณะที่พบในเพชรธรรมชาติ

2. เพชรชนิด I_o พบได้น้อยมากในธรรมชาติประมาณ 0.1 % ส่วนมากพบในเพชรที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น มีความเข้มข้นของสารเจือไนโตรเจนน้อยมากประมาณ 0.0005 % โดยอะตอม และไนโตรเจนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

3. เพชรชนิด II_u พบได้น้อยมากในธรรมชาติ มีความเข้มข้นของสารเจือไนโตรเจนอยู่จำนวนน้อยมากทำให้การตรวจสอบด้วยการวัดการดูดกลืน IR หรือ UV ทำได้ยาก และไม่มีโบรอนเจือปน ทำให้มีความเป็นฉนวนสูง

4. เพชรชนิด II_o เพชรชนิดนี้พบได้ยากที่สุดในธรรมชาติ มีความเข้มข้นของสารเจือไนโตรเจนน้อยที่สุด (น้อยกว่าชนิด II_u) และมีจำนวนโบรอนเจือปนมากกว่าไนโตรเจน ดังนั้นเพชรชนิด II_o นี้จึงมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ

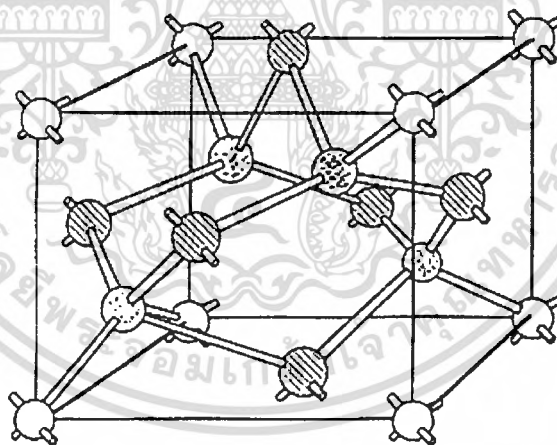
นอกจากนี้เพชรยังมีคุณสมบัติอีกหลายประการที่น่าสนใจ เมื่อพิจารณาคูสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอน และคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิสูง ซึ่งคุณสมบัติแต่ละชนิดจะแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอน

การเกิดพันธะของคาร์บอนเป็นการเกิดจากพันธะโควาเลนต์ซึ่งแตกต่างกันที่ชนิดของพันธะ (sp^2 หรือ sp^3) ก็จะมีโครงสร้างต่างกันคือ

1. โครงสร้างเพชร

โครงสร้างนี้เกิดขึ้นจากอะตอมคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 เรียกว่า โครงสร้างเพชร โดยมียูนิทเซลล์ดังรูปที่ 2.1 ในหนึ่งยูนิทเซลล์จะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนจำนวน 18 อะตอม คือที่ตำแหน่งที่มุมของยูนิทเซลล์ 8 อะตอม ซึ่งจะแบ่งกับยูนิทเซลล์ข้างเคียงทั้งหมด 8 ยูนิทเซลล์ อะตอมที่บริเวณ Face center จำนวน 6 อะตอม ซึ่งแบ่งกับยูนิทเซลล์ข้างเคียง 2 ยูนิทเซลล์ และอะตอมภายในยูนิทเซลล์ที่ตำแหน่งหนึ่งส่วนสี่จากมุมของยูนิทเซลล์ เมื่อรวมอะตอมต่อหนึ่งยูนิทเซลล์ที่เซลล์จะมี 8 อะตอมต่อยูนิทเซลล์

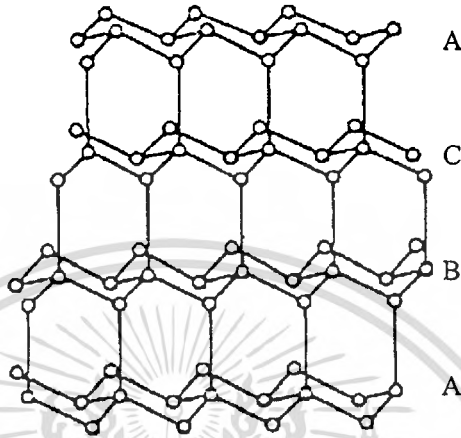


รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างเพชร

เมื่อพิจารณาถึงพันธะที่อะตอมคาร์บอนนั้นมีการยึดเหนี่ยวกับอะตอมข้างเคียงแบบ Tetrahedral โดยที่จะยึดเหนี่ยวกับอะตอมรอบข้างด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 เมื่อพิจารณาในระนาบ $\{111\}$ พบว่าการยึดเหนี่ยวพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนเป็นแบบวงแหวนหกเหลี่ยมมีการสลับขึ้นลงโดยมีอะตอมที่ตำแหน่งหนึ่งส่วนสี่ เป็นระนาบ $\{111\}$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 จะเสมือนว่าวงแหวนหกเหลี่ยมก็มีการเรียงซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบแบบ ABCABCABC....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

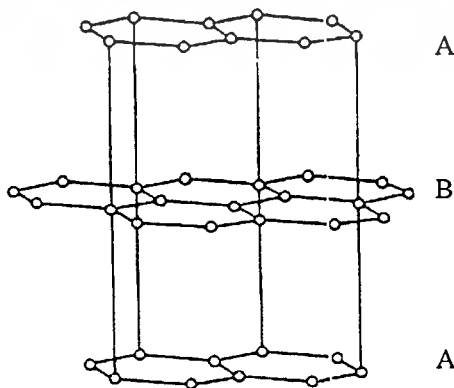
เมื่อพิจารณาที่ยูนิตเซลล์พบว่ามีความยาวของโครงผลึกเท่ากับ 3.567 \AA ความยาวของอะตอมข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดเท่ากับ 1.54 \AA มีค่า Raman shift ของรูป Cubic ที่ $1,332 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,284 \text{ cm}^{-1}$ สำหรับคาร์บอน 12 และคาร์บอน 13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะ โควาเลนต์ sp^3 ของเพชร

2. โครงสร้างแกรไฟต์

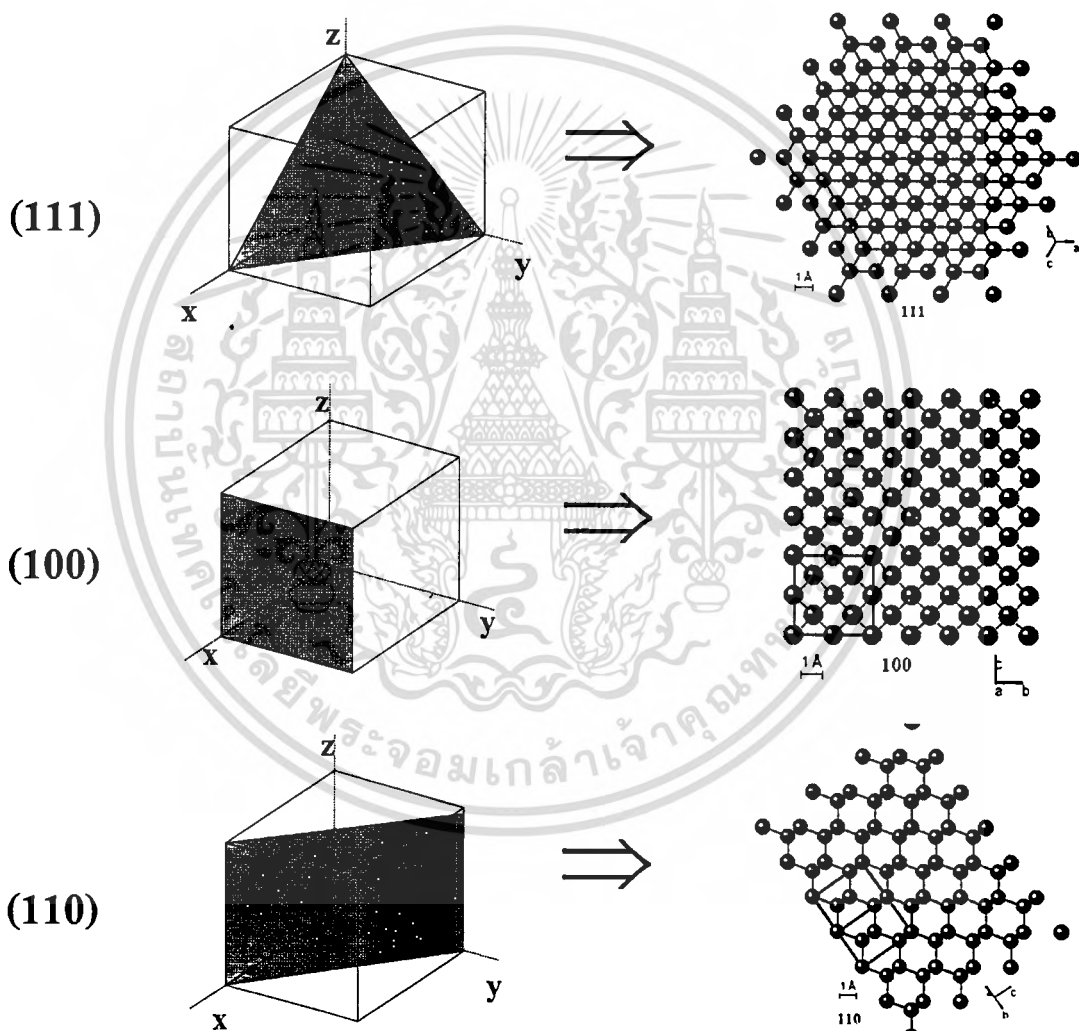
โครงสร้างที่เกิดขึ้นจากอะตอมคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 เรียกว่า โครงสร้างแกรไฟต์ อะตอมคาร์บอนจะมีการยึดเหนี่ยวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอมในระนาบเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยชั้นระหว่างวงแหวนหกเหลี่ยมวางซ้อนกันแบบ ABABAB... มีความยาวของโครงผลึก 6.707 \AA ระยะระหว่างอะตอมที่ใกล้ที่สุดเท่ากับ 1.42 \AA มีค่า Raman shift เท่ากับ $1,580 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 ของแกรไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากโครงสร้างทั้งสองแล้วยังมีโครงสร้างอื่นๆอีกเช่น Microcrystalline carbon, Amorphous carbon และ Lonsdaleite เป็นต้นโดยความแตกต่างของโครงสร้างนี้จะต้องทำการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy ซึ่งจะอธิบายในบทที่ 4 ต่อไป เมื่อพิจารณาระนาบของผลึก พบว่าที่ระนาบ $\{111\}$ จะเหมือนว่าอะตอมของคาร์บอนในระนาบเดียวกันเรียงตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมซ้อนกัน ระนาบ $\{100\}$ อะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันจะเรียงตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสซ้อนกัน และระนาบ $\{110\}$ อะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันจะเรียงตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระนาบต่างๆ ของโครงสร้างเพชร

2.1.2 คุณสมบัติภายใต้อุณหภูมิสูง

โครงสร้างของเพชรเกิดจากพันธะโควาเลนต์ซึ่งมีความแข็งแรงมาก จึงทำให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุอื่นๆ หลายประการ เช่น ความแข็ง ความหนาแน่น ความนำความร้อน ค่าความยืดหยุ่น และค่า Bulk modulus ดีกว่าวัสดุอื่นๆ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนต่ำมาก คุณสมบัติต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

ความนำความร้อน (Thermal conductivity) เพชรมีค่าความนำความร้อนสูงที่สุดคือมีค่า 20 W/cm²·K เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ในภาคผนวก ก ค่าความนำความร้อนนี้จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับตัวแปรต่างๆ เช่น เพชรชนิด I₂ ซึ่งมีไนโตรเจนเจือปนอยู่มากจะมีค่าความนำความร้อนลดลง 30-50 % ของค่าสูงสุด ลักษณะของผลึกมีส่วนต่อค่าความนำความร้อนคือฟิล์มเพชรที่เป็นผลึกรวม (Polycrystalline) จากการสร้างที่ดีมีความนำความร้อนเป็น 55 % ของผลึกเดี่ยวในระนาบทิศทางการวัดเดียวกัน ส่วนในทิศทางระนาบของการปลูกผลึกความนำความร้อนของผลึกเดี่ยวจะมีค่ามากกว่า 25 % โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก เป็นส่วนใหญ่

บริเวณของวัสดุที่เกิดการผิดรูปไปเนื่องจากมีแรงมากระทำ และสามารถรักษาให้เปลี่ยนกลับมาสู่สภาพเดิมได้ บริเวณนี้เรียกว่า บริเวณยืดหยุ่น (Elastic region) จากกฎของ Hook กล่าวว่าอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดจะประมาณได้ว่ามีค่าคงที่ในบริเวณดังกล่าว โดยอัตราส่วนของความเค้นที่เกิดจากการดึงต่อความเครียดในเชิงเส้นถูกเรียกว่า Young's modulus แสดงตามตารางที่ ก-6 ในภาคผนวก ก

ความจุความร้อนต่อโมล (Molar heat capacity) ค่าความจุความร้อนต่อโมลหมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารที่มีปริมาณหนึ่ง โมลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา จากตารางที่ ก-3 ในภาคผนวก ก แสดงการเปรียบเทียบค่าความจุความร้อนต่อโมลระหว่างเพชรกับวัสดุชนิดอื่นๆ จะพบว่าค่าความจุความร้อนต่อ โมลของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ แสดงว่าเพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อน ได้ดีหรือเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อน

การขยายตัวจากความร้อน (Thermal expansion) คือค่าอัตราส่วนของความยาวของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเปรียบเทียบกับความยาวที่อุณหภูมิ 0° C ค่าการขยายตัวจากความร้อนนี้จะเป็นส่วนสำคัญโดยตรงกับค่าความจุความร้อนต่อโมล สำหรับของแข็งค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายความร้อนเชิงปริมาตรจะมีค่ามากกว่าเชิงเส้นประมาณ 3 เท่า ค่าการขยายตัวจากความร้อนของเพชรและวัสดุอื่นๆ เปรียบเทียบไว้ในตารางที่ ก-2 ในภาคผนวก ก

ความแข็ง (Hardness) เพชรเป็นสารที่มีความแข็งสูงที่สุดในวัสดุทั้งหมด โดยจะมีค่าความแข็งสูงถึง 5,700-10,400 kg/mm² อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามสร้างสารประกอบ C₃N₄ (Carbon Nitride) เชื่อว่าเป็นสารที่มีความแข็งมากกว่าเพชร ตารางการเปรียบเทียบค่าความแข็งของเพชรกับวัสดุอื่นๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ ก-4 ในภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางแปลนแจ้งรับของเพชรกับวัสดุอื่นๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ ก-4 ในภาคผนวก ก การนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับคุณสมบัติทางกลอื่นๆของเพชรเช่น ค่า Sound velocity, Coefficient of friction, Optical property และ Density จะแสดงไว้ในตารางที่ ก-5 ก-7 ก-8 และ ก-9 ในภาคผนวก ก ตามลำดับ

2.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall ในเพชรธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^{15} ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง $1,800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า $2,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ แต่ในเพชรที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ 500°C พบว่ามีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง $50 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเยอรมันเนียมและอินเดียมแอนติโมนไนด์เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูง ส่วนในวัสดุอื่นๆจะมีค่าความเร็วโฮลอิมิต์และ Dielectric strength ต่ำ ที่ความแรงสนามไฟฟ้า 10^4 V/cm ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนและโฮลเริ่มมีการอิมิต์สำหรับโฮลมีค่าความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดที่ 10^7 cm/s และในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ $2.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง $10^{16} \Omega\cdot\text{cm}$

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

สำหรับกรณีของสารเจือผู้ให้ (Donor) หากพิจารณาในโตรเจนพบว่าไม่สามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นของไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าแถบความนำมาก คือมีค่าถึง 1.57 eV ดังนั้นจึงไม่เกิด Shallow level ขึ้น อีกทั้งอะตอมของไนโตรเจนยังทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ส่วนกรณีของฟอสฟอรัสซึ่งมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าคาร์บอนการคำนวณจากทฤษฎีทำนายว่าฟอสฟอรัสสามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ Okano et al. รายงานในปี ค.ศ. 1990 ว่าได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขึ้นมา โดยใช้ไอระเหยของสารละลาย P_2O_5 ในเมทานอล ซึ่งถูกเจือจางด้วยอะซิโตน ค่าความหนาแน่นประจุพาหะวัดได้ 10^{15} cm^{-3} และค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน $50 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ แต่ปัญหาที่พบคือ ไม่สามารถควบคุมค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์ยังไม่มี ความแน่นอน และอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอสฟอรัสมีขนาดใหญ่ เมื่อสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนแล้วมีผลทำให้โครงสร้างของเพชรเสถียรไป ดังนั้นลิเทียมจึงเป็นสารที่ได้รับความนิยมและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์มเพชรที่ทำการเจือสารลิเทียมด้วยวิธี Ion-implantation แสดงคุณสมบัติเป็นฟิล์มชนิดเอ็น แต่ในการเจือสารแบบ In-situ และ In-diffusion จะไม่เกิดผลตามต้องการ เนื่องจากเกิดการชดเชยด้วยความหนาแน่นสูงของสถานะผู้รับที่กระจายอยู่ในแถบพลังงานต้องห้ามตลอดจนลิเทียมในเพชรมีการกระจายตัวสูงอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้องซึ่งทำให้การเจือสารไม่มีความแน่นอน

2.1.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับซิลิกอนและเยอรมันเนียม ซึ่งสารทั้งสองชนิดดังกล่าวเป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลจากตารางที่ 2.1 สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำดังนี้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ

Materials	Diamond	Si	Ge
Crystal structure	Diamond	Diamond	Diamond
Energy gap (eV)	5.45	1.1	0.72
Electron mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	2,000	1,500	3,900
Hole mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1,800	600	1,900
Breakdown field (V/cm)	10^7	5×10^6	10^4
Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	10^{16}	10^3	10^1
Saturated electron velocity (cm/s)	2.7×10^7	1×10^7	1×10^7
Dielectric constant (ϵ)	5.7	11	15.8
Lattice constant (\AA)	3.567	5.431	5.658
Thermal conductivity ($\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$)	20	1.5	0.28

1. เพชรมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามสูงกว่าซิลิกอนและเยอรมันเนียมมากจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ที่อุณหภูมิสูงๆซิลิกอนและเยอรมันเนียมจะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้น (โฮลและอิเล็กตรอน) จำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้

2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงได้ดีกว่า

3. ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ โดยเติมอะตอมสารเจือ

2.2 กระบวนการเกิดของฟิล์มเพชร

กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งจะมีการใช้อุปกรณ์แตกต่างกันทุกวิธี จะมีแต่พื้นฐานที่สำคัญคือ

2.2.1 หลักการของเทคนิค CVD

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.2 เกี่ยวกับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีต่างๆ แม้ว่าแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามจะมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญเหมือนกันดังนี้

1. ในระบบต้องมีอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนหรือออกซิเจน
2. การกระตุ้นให้เกิดอนุพลคาร์บอน
3. อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม
4. การเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ในกระบวนการเกิดฟิล์มเพชรจะต้องมีการเกิดของทั้งสี่ข้อนี้มีเช่นนั้นจะเป็นเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสมทำให้ไม่เกิดเป็นฟิล์มเพชร แต่อาจจะเกิดเป็นวัสดุอื่น เช่น แกรไฟต์ เป็นต้น โดยจะกล่าวในรายละเอียดดังนี้

1. ในระบบต้องมีอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนหรือออกซิเจน

เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD เป็นการใช้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นแหล่งจ่ายอะตอมคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจน อะตอมคาร์บอนและอนุพลคาร์บอนจะเป็นปัจจัยในการเกิดฟิล์มเพชร ส่วนก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นส่วนสำคัญในการกำจัดแกรไฟต์ ทั้งนี้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและอนุพลคาร์บอนจะต้องมีความเหมาะสมจึงจะทำให้การเกิดของเพชรที่มีคุณภาพที่ดีไม่ปนเปื้อนจากแกรไฟต์ ก๊าซไฮโดรคาร์บอนในการสังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น มีเทน อะซีโตน โพรเพน อีเทน อะเซทิลีน และแอลกอฮอล์ เป็นต้น ซึ่งก๊าซบางชนิดมีจำนวนก๊าซไฮโดรเจนน้อย จึงต้องผสมก๊าซไฮโดรเจนเพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เงื่อนไขการสร้างด้วยวิธี Hot filament CVD อาจใช้อัตราส่วนของก๊าซ CH_4 ต่อไฮโดรเจนน้อยกว่า 1% อัตราการไหลของก๊าซ 100 sccm. ความดันที่ใช้ต่ำกว่า 100 torr อุณหภูมิฐานรองประมาณ 800°C และอุณหภูมิไส้หลอดอยู่ระหว่าง $2,000-2,200^\circ\text{C}$ ฐานรองที่ใช้อาจเป็น Si หรือ Mo จากเงื่อนไขนี้ฟิล์มเพชรที่ได้มีอัตราการก่อตัวประมาณ $1\ \mu\text{m/h}$ และสามารถเพิ่มให้มากขึ้นได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ

มีเทน อุณหภูมิไ้ส้หลอด อัตราการไหลของก๊าซ หรือลระยะห่างระหว่างไ้ส้หลอดกับฐานรอง ซึ่งทำให้อุณหภูมิฐานรองมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน และอัตราการก่อตัวจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิฐานรองอยู่ระหว่าง 950°C หลังจากนั้นทั้งค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน และอัตราการก่อตัวเริ่มลดลง เมื่อพิจารณาบทบาทของการผสมก๊าซที่ใช้มีสองชนิดคือก๊าซ ไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน คือ

บทบาทของก๊าซไฮโดรเจน นับตั้งแต่ Angus et al. เสนอว่าอะตอมไฮโดรเจนสามารถ กำจัดแกรไฟต์ออกจากเพชรได้เป็นอย่างดี อีกทั้งได้รับการนำเสนอทำนองเดียวกันจากกลุ่มนัก วิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียว่าสมมูลความหนาแน่นสูงของอะตอมไฮโดรเจนที่พื้นผิวการเกิด มีคุณสมบัติในการกำจัดแกรไฟต์ Setaka et al. ได้แสดงให้เห็นถึงการกำจัดแกรไฟต์ออกโดย อะตอมไฮโดรเจนที่ถูกกระตุ้นจะทำได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิการสร้างเพชรต่ำๆ แบบจำลองของ Frenklach et al. ทำนายว่าอัตราการกำจัดพันธะ sp^2 ของอะตอมไฮโดรเจนจะลดลงเมื่อเทียบกับอัตราที่เกิดขึ้นของกระบวนการอื่นๆ เช่น Hydrogenation ของพันธะ sp^2 ไปสู่ sp^3 โดยอะตอมไฮโดรเจน

หน้าที่หลักอีกอย่างหนึ่งของไฮโดรเจนคือ ช่วยทำให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้น เนื่องจาก บริเวณผิวหน้าของเพชร อะตอมคาร์บอนจะมีพันธะแขวนขาด (Dangling bond) อะตอมไฮโดรเจน จะเข้าไปจับตัวกับแขนที่ขาดของอะตอมคาร์บอนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะของ sp^3 ไปเป็น sp^2 หรือ sp^1 และอะตอมไฮโดรเจนยังมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดเพชร โดยจะเป็นตัว กำจัดไฮโดรเจนที่จับตัวเป็นพันธะ C_4-H^* กับอะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร อะตอม คาร์บอนในพันธะระหว่าง C_4-H เมื่อสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนออกไปจะเป็น C_4^* ดังสมการ



เมื่อ C_4 คืออะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร และ C_4^* คืออะตอมคาร์บอน บริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ให้ความเห็นเกี่ยวกับหน้าที่อื่นๆ ของไฮโดรเจนอีก เช่น Frenklach et al. เสนอว่าอะตอมไฮโดรเจนยังช่วยในการเกิดก๊าซเฟส หรือ Machlin et al. กล่าวว่าอะตอมไฮโดรเจนช่วยในการกำจัดออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง

บทบาทของก๊าซออกซิเจน การเติมออกซิเจนเข้าไปในก๊าซผสมระหว่างไฮโดรเจนและ ไฮโดรคาร์บอน ได้รับการรับรองจากผู้ศึกษาการสังเคราะห์เพชรหลายกลุ่ม (Kawato et al.) ว่าทำ ให้เพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีที่อุณหภูมิฐานรองต่ำ และยังช่วยให้อัตราการเกิดดีขึ้น

บทบาทหลักๆ ของออกซิเจนคือช่วยทำให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมามีคุณภาพดี เป็นที่เชื่อกันว่าหากเมื่อผ่านอนุพลของก๊าซออกซิเจน เช่น O^* , O_2 หรือ OH^* เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชร

จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชร และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น อนุมูล OH^* สามารถกระตุ้นอะตอมบริเวณพื้นผิวดังสมการ



อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาจากสมการ (2.1) และ (2.2) มีความสำคัญในการช่วยกำจัดแกรไฟต์ ส่วนหน้าที่อื่นๆ ของออกซิเจนที่มีผู้ศึกษาไว้ได้แก่ Kawato et al. เสนอว่าออกซิเจนมีคุณสมบัติที่จะลดความหนาแน่นของอะเซทิลีน ซึ่งถูกสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดแกรไฟต์ และคาร์บอนอสัณฐาน Mucha et al. รายงานว่า ออกซิเจนยังเป็นตัวช่วยเพิ่มความเข้มข้นของอะตอมไฮโดรเจน

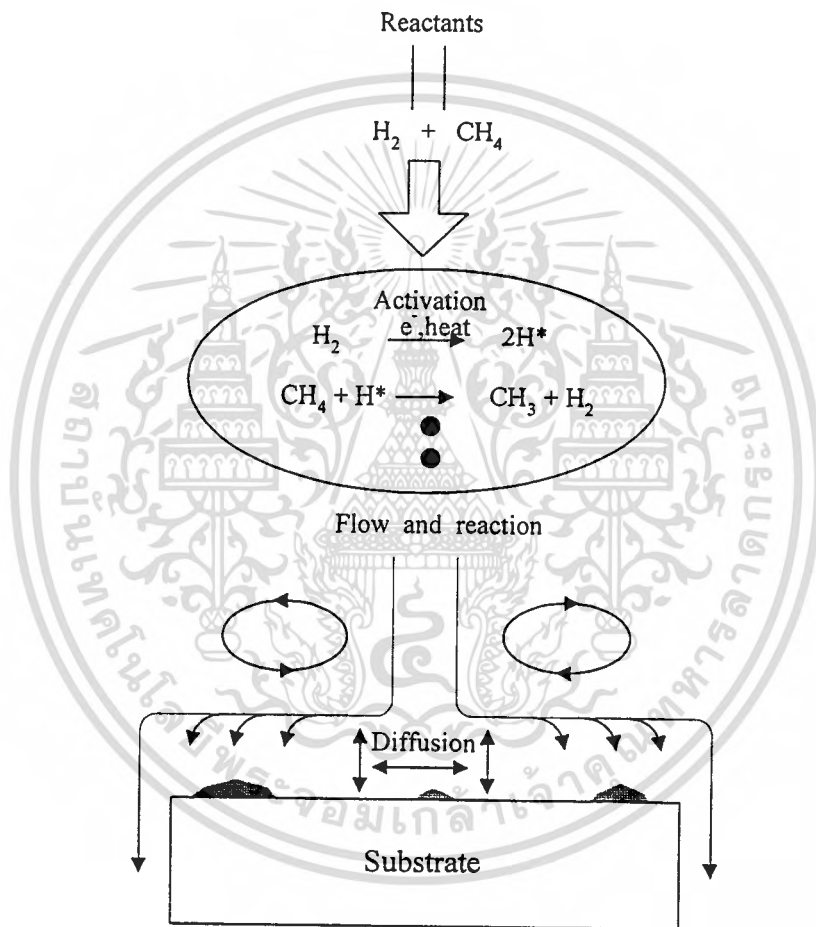
2. การกระตุ้นก๊าซให้เกิดอนุมูลคาร์บอน

เมื่ออัตราส่วนระหว่างอะตอมไฮโดรเจนและคาร์บอนมีอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วจะต้องมีการกระตุ้นให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมาด้วยความร้อน พลาสมา การเหนี่ยวนำ หรือ Combustion เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมา โดยอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่ฐานรอง ซึ่งส่วนมากแล้วในกระบวนการ CVD Driving force ที่ใช้ส่งอะตอมคาร์บอน จะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างบริเวณที่ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นกับพื้นผิวฐานรอง หรืออาจใช้การเป่าก๊าซเฟสไปยังฐานรองรวมไปถึงการใช้สนามไฟฟ้าในการช่วยการส่งผ่าน

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐานคือต้องมีการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์สองประการ คือ ประการแรกทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาก่อตัวที่พื้นผิว และประการที่สองแยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจน โดยทั่วไปแล้วรีแอกเตอร์ ที่ใช้กระตุ้นมีอยู่ 4 วิธีที่นิยมคือ Hot filament reactors, Microwave plasma reactors, DC arcjet reactor และ Combustion reactors

แม้ว่าแต่ละระบบการสร้างมีความแตกต่างกันในแง่ของรูปแบบทางวิศวกรรม แต่ทั้งหมดจะมีลักษณะสำคัญพื้นฐานเหมือนกัน คือทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดีออกมา พลังงานจำนวนมากที่ใช้จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนแตกตัว การสร้างจะกระทำที่ความดันต่ำ (ประมาณ 10-760 torr) เพื่อป้องกันการรวมตัวของอะตอมของไฮโดรเจนกลับไปสู่รูปของโมเลกุล อุณหภูมิของก๊าซเฟสมีค่าสูงกว่า $1,700^\circ\text{C}$ เกิดขึ้นที่บริเวณ Activation zone การระบายความร้อนทั้งแบบแอคทีฟหรือพาสซีฟเป็นตัวรักษาระดับอุณหภูมิของฐานรองให้มีค่าประมาณ 925°C

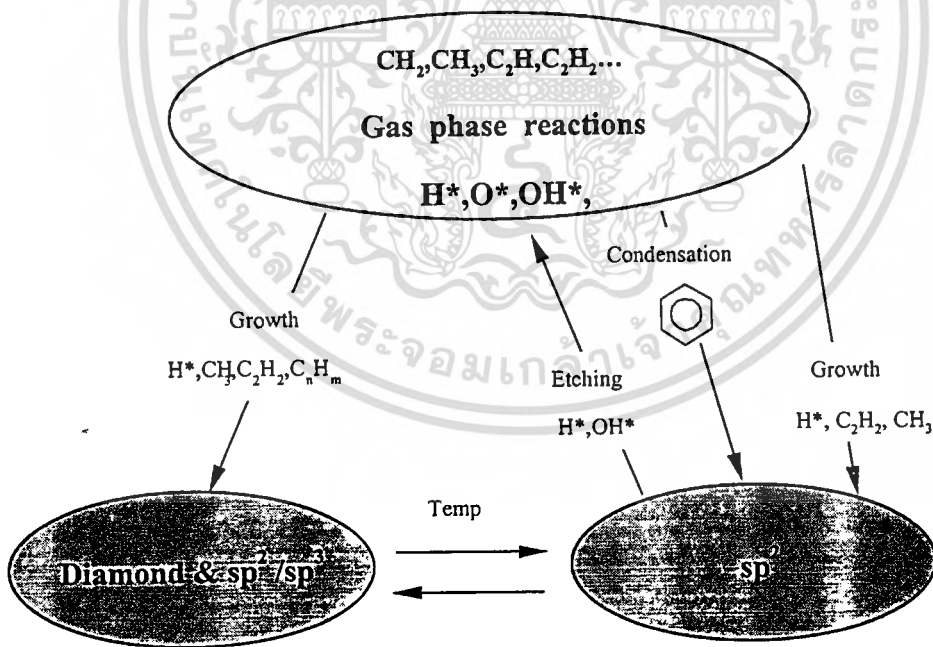
อย่างไรก็ตามกระบวนการส่งผ่านจะมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ในรีแอกเตอร์ทั้งสี่ชนิด รีแอกเตอร์ชนิด Hot filament และ Microwave plasma มีการแพร่เป็นส่วนสำคัญ ความเร็วหรือความหนาแน่นของ “Boundary layer” จึงมักจะพบการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของอุณหภูมิ ความเร็วหรือความหนาแน่นของอนุภาคระหว่างบริเวณกระตุ้น (Hot filament หรือ Plasma ball) และพื้นผิวการเกิดในแต่ละรีแอกเตอร์ ส่วนรีแอกเตอร์ชนิด Arc jet และ Combustion เป็นชนิดที่มีความเร็วของ Boundary layer สูง (ตัวอย่างเช่น อาจสูงเกินกว่า 10^5 cm/s) จึงมีการพาเป็นส่วนสำคัญ ความเร็วและความหนาแน่นจะเกิดขึ้นใกล้ ๆ กับพื้นผิวที่เกิด



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของเพอร์

จากแผนภาพในรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD รีแอกเตอร์ชนิด Hot filament หรือก๊าซใช้ไปคือก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้สำหรับรีแอกเตอร์แบบ Hot filament และ Plasma รีแอกเตอร์ที่เข้าไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง หรือพลังงานสูงจะถูกกระตุ้นภายในบริเวณนั้น ปฏิกิริยาเคมีเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนแตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10^9 วินาที และเกิดการชนกันของก๊าซในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นานพอเหมาะไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีแอกเตอร์โดยใช้เวลาดั้งแต่ 10^{-4} วินาที ถึง 10 วินาที จากนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่างๆจะถูกส่งผ่านโดยการไหล การแพร่ และการพาจากรีแอกเตอร์ไปยังฐานรองที่บริเวณใกล้ฐานรอง การแพร่จะเข้าสู่บริเวณที่การไหลหยุดนิ่งซึ่งถูกเรียกว่า “Boundary layer” พื้นผิวบนฐานรองจะเกิดการดูดกลืนและการคายความร้อน การแพร่ที่พื้นผิวหรือเข้าไปในเนื้อสารและเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นประโยชน์ต่อการเกิดเพชรและมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ เป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนของอุณหภูมิ โครงสร้าง และองค์ประกอบของพื้นผิว นอกจากนี้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD คาร์บอนสามารถมีพันธะเคมีได้หลายรูปขึ้นอยู่กับ Hybridization ว่าเป็นแบบ sp^1 sp^2 หรือ sp^3 รูปที่ 2.6 แสดงแผนภาพกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะสร้างเพชรว่าคาร์บอน สามารถเป็นได้ทั้งเพชร (sp^3) หรือ แกรไฟต์(sp^2) การเปลี่ยนไปมาระหว่างพันธะแบบ sp^2 ไปสู่ sp^3 หรือ sp^3 กลับไป sp^2 การกำจัดคาร์บอนรูปอื่นๆที่ไม่ใช่เพชร และกระบวนการอื่นๆที่เป็นการกำหนดอัตราการก่อตัวและคุณภาพในการเกิด ค่าต่างๆเหล่านี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง เช่น อุณหภูมิ ความดัน วิธีการกระตุ้น ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้หรือแม่แต่รูปทรงของรีแอกเตอร์



รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการเกิดแกรไฟต์และเพชรขณะสังเคราะห์เพชร

3. อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม

วิธี CVD แบบความร้อนทั้งหมดที่กล่าวมา เพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 500°C ถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ถ้าหากอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูง หรือต่ำเกินไปจากนี้ อาจจะทำให้เกิดแกรไฟต์หรือ DLC ได้ การควบคุมอุณหภูมิฐานรองทำได้หลายกรณี เช่น การระบายความร้อนด้วยน้ำ การให้ความร้อนด้วยเครื่องกำเนิดความร้อนในกรณีที่อุณหภูมิของฐานรองมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จุดประสงค์เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมและคงที่

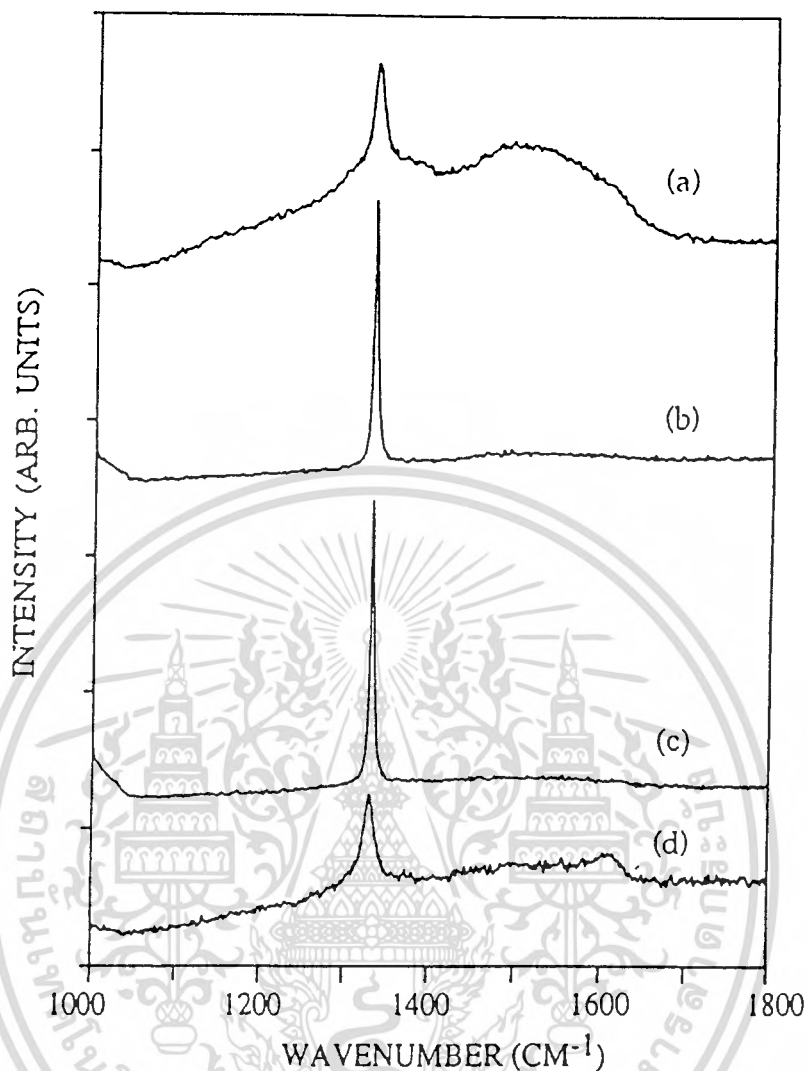
ผลของอุณหภูมิฐานรอง ในกระบวนการสร้างเพชรด้วยวิธี CVD อุณหภูมิของฐานรอง จะส่งผลต่อการเกิดเพชรหลายอย่าง Spitsyn et al. ได้เสนอผลจากการทดลองว่ามีเพชรเกิดขึ้นเมื่อ อุณหภูมิของฐานรองมีค่าตั้งแต่ 500°C ถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ แล้วแต่วิธีการที่ใช้ โดยหากอุณหภูมิฐานรองมีค่าเกินกว่า $1,200^{\circ}\text{C}$ ผลที่ได้จะเป็นแกรไฟต์ และหากอุณหภูมิฐานรองต่ำกว่า 500°C ใน ก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจน ผลที่ได้จะเป็น DLC เกิดขึ้นแทน เมื่อไม่กี่ปีมานี้ Inspektor et al. รายงานถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่สร้างเพชรขึ้นได้ประมาณ 300°C โดยใช้ก๊าซที่มีส่วนผสมของ C-H-O นอกจากนี้อุณหภูมิฐานรองยังมีผลต่ออัตราการเกิดเพชรอีกด้วย โดยอัตราการเกิดเพชรจะมีค่าลดลงเมื่อฐานรองมีอุณหภูมิสูงกว่า $1,000^{\circ}\text{C}$

4. การเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการนิวเคลียชัน ซึ่งกระบวนการเตรียมพื้นผิวที่ใช้มีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะให้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังรวมไปถึงฐานรองที่ใช้ บริเวณพื้นผิวต้องไม่มีตัวเร่งต่างๆที่ทำให้เกิดแกรไฟต์ และต้องมีข้อจำกัดในการแพร่ของอะตอมคาร์บอนลงไปในพื้นที่ของฐานรองที่อุณหภูมิที่ทำการสร้าง

มีวิธีที่ช่วยในการเกิดฟิล์มเพชรวิธีหนึ่งคือการไบอัสระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง นั่นคือเหมือนกับว่าเป็นการนำเอาวิธีแบบ Hot filament รวมกับกระบวนการพลาสมา โดยเพิ่มสนามไฟฟ้าและเหนี่ยวนำให้เกิดประจุขึ้นมาในระบบแบบความร้อน ภายใต้การไบอัสระบบจะประพุดติ ตัวคล้ายไดโอดเนื่องจากจำนวนฟลักซ์อิเล็กตรอนจากไส้หลอด (โลหะที่อุณหภูมิสูงกว่า $2,000^{\circ}\text{C}$) มีค่ามากกว่าฟลักซ์อิเล็กตรอนจากฐานรอง (อุณหภูมิน้อยกว่า $1,000^{\circ}\text{C}$) นั่นคือถ้าฐานรองมีสถานะเป็นบวกเมื่อเทียบกับไส้หลอด (Forward bias) กระแสอิเล็กตรอนจากไส้หลอดจะไหลสู่ฐานรองอย่างมาก แต่ถ้าฐานรองถูกไบอัสแบบย้อนกลับทำให้ไม่มีการไหลของอิเล็กตรอน จนกระทั่งถึงค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤติ (ประมาณ -160 V) กระแสอิเล็กตรอนจะมีจำนวนมาก ซึ่งที่ค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตินี้ก่อให้เกิด DC plasma ขึ้นในระบบ การไบอัสแต่ละแบบส่งผลให้ฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติต่างๆกันไป การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรที่ได้จากการไบอัสสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่ได้จากการไป้อัสนานรอนค่าต่าง ๆ

- (a) ไป้อัสไปข้างหน้า 150 V ($I \sim 125$ mA)
- (b) ไม่มีการไป้อัส ($I \sim 10$ μ A),
- (c) ไป้อัสย้อนกลับ -150 V ($I \sim -5$ μ A)
- (d) ไป้อัสย้อนกลับ -180 V ($I \sim 60$ mA)

จากรูปแสดงให้เห็นว่าการไป้อัสจะส่งผลถึงการนิวคลิเอชัน ลักษณะรูปร่างและการจับตัวเป็นพันธะ การไป้อัสไปข้างหน้า ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Electron bombardment ของฟิล์ม ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการนิวคลิเอชัน อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ได้มีความไม่สมบูรณ์สูงและเกิด Secondary nucleation และ Twinning ความไม่สมบูรณ์ของฟิล์มในกรณีนี้แสดงได้ดังกราฟจากรูป 2.7 (a) สำหรับการไป้อัสแบบย้อนกลับกรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าไม่เกินค่าวิกฤติ จากสเปกตรัมของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อสาธารณะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Raman แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเพชรมีคุณภาพดีขึ้นจากรูป 2.7 (c) แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าเกินค่าวิกฤติ ฟิล์มเพชรที่ได้จะไม่สมบูรณ์ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการให้ไบอัสไปข้างหน้า สำหรับวิธีการเตรียม พื้นผิวฐานรองมีด้วยกันหลายวิธีแล้วแต่ความเหมาะสมในการทำงาน เช่น

1. การสร้างรอยขีดบริเวณพื้นผิว ด้วยการขัดหรือการอูลตราโซนิก
2. การชุบด้วยผงเพชร หรือผงเซรามิกชนิดต่าง ๆ
3. การไบอัสด้วยไฟฟ้า
4. การเคลือบฐานรองด้วยฟิล์มหรือไฟเบอร์ของแกรไฟต์
5. การเคลือบฐานรองด้วยฟิล์มโลหะบางๆ, a-C, C₇₀, cBN, SiC และ WC
6. การใช้ Ion implantation
7. การใช้เลเซอร์
8. การใช้ Carburization
9. การกัดด้วยสารเคมี

ซึ่งแต่ละวิธีมีความแตกต่างในแง่ของความหนาแน่นของการนิวเคลียชันและความยากง่ายในการเตรียม สำหรับข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการเตรียมพื้นผิวฐานรองซิลิกอนด้วยวิธีต่างๆ

Pretreatment method	Advantages	Disadvantages
No pretreatment or mirror-polished Si	Large, Separate grain No damage/impurities	Continuous film not practical
Scratching	Proven technology	Dirty, Damage surface Difficult to control
Ultrasonic scratching	Uniform, Reproducible	Dirty, Damage surface
Graphite film Graphite fiber a-C film	In situ process	sp ² and defective bonding at interface
Biasing	In situ process High N _d possible	Diamond nuclei are defective
Ion implantation	In situ process	Low N _d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

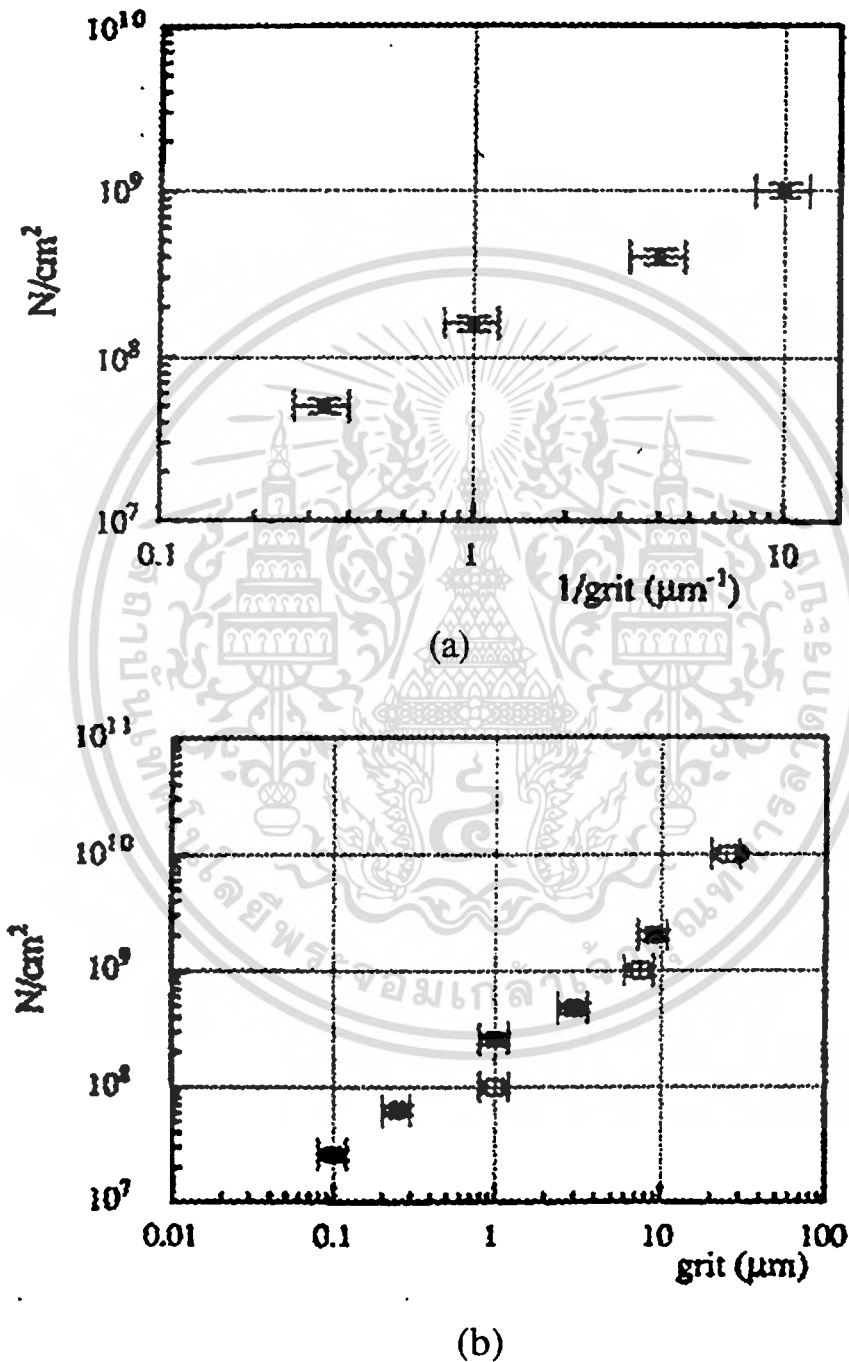
วิธีขัดให้เกิดรอยบริเวณผิวหน้าของฐานรองเป็นเทคนิคในการเพิ่มความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรที่ได้รับความนิยมมาก แม้ว่าวิธีการดังกล่าวไม่สามารถนำไปใช้กับพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อน อีกทั้งผิวหน้าของฟิล์มเพชรที่ได้มักจะไม่เรียบสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการความเรียบสม่ำเสมอของฟิล์มเพชรสูง ตัวอย่างเช่น งานด้าน Optical window วัสดุที่ใช้ขัดผิวหน้าของฐานรองอาจเป็นครีมเพชรหรือผงเพชร โบไรด์ คาร์ไบด์ ไนไตรด์ ซิลิไซด์ ออกไซด์ และแกรไฟต์ ซึ่งวิธีการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดนี้ยังรวมไปถึงการอุลตราโซนิก ฐานรองในสารผสมระหว่างผงเพชรกับเมทานอลหรืออะซิโตน ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรหลังจากผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดมีค่าตั้งแต่ 10^6 - 10^{10} cm^{-2} และหากเป็นการเตรียมโดยใช้อุลตราโซนิก ค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันสูงถึง 10^7 - 10^{11} cm^{-2} นอกจากนี้ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันจะขึ้นอยู่กับขนาดของครีมหรือผงเพชรที่ใช้ Ascarelli et al. พบว่าในการเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร ความหนาแน่นในการนิวคลีเอชันจะลดลงเมื่อขนาดของครีมเพชรที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังกราฟรูปที่ 2.8 (a) และหากใช้วิธีอุลตราโซนิกในผงเพชร ผลที่ได้จะกลับกัน คือความหนาแน่นการนิวคลีเอชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อผงเพชรที่ใช้มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังกราฟรูปที่ 2.8 (b)

การชุบผิวหน้าของฐานรองด้วยผงเพชร, Si, Al_2O_3 หรือ SiC เป็นอีกวิธีหนึ่ง que เพิ่มความหนาแน่นในการนิวคลีเอชันได้ ผงเพชรที่อยู่บนผิวหน้าฐานรองจะช่วยเร่งให้เกิดเพชรขึ้นบนตัวมันเอง โดยความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของผงเพชรที่มีอยู่ วิธีเตรียมฐานรองด้วยการชุบนี้จะมีค่าความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันตั้งแต่ 10^6 - 10^{10} cm^{-2}

วิธีการไบอัสฐานรองได้รับความนิยมที่จะนำมาใช้กับฐานรองซิลิกอนที่มีผิวเรียบ (Mirror polished Si) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวคลีเอชัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ทำลายพื้นผิวของฐานรอง ตลอดจนการไบอัสฐานรองยังช่วยลดและกำจัดการเกิดออกไซด์บนพื้นผิวฐานรอง ชนิดของการไบอัสขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์เพชร เช่น ในวิธี DC plasma CVD และ Hot filament CVD ฐานรองจะได้รับการไบอัสเป็นบวกเพื่อช่วยเพิ่มการนิวคลีเอชันของเพชร ในขณะที่วิธี Microwave plasma CVD ไม่ว่าฐานรองจะไบอัสเป็นบวกหรือลบ ก็สามารถเพิ่มการนิวคลีเอชันของเพชรได้ Katoh et al. รายงานว่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันบนฐานรองที่ไบอัสด้วยไฟลบจะมีค่าสูงกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากการไบอัสฐานรองด้วยไฟบวก อย่างไรก็ตาม ผลจากการตั้งจุดประจุในการไบอัสแบบลบทำให้เกิดรอยขรุขระบนผิวหน้าของซิลิกอนได้ ดังนั้นการไบอัสไฟบวกให้กับฐานรองซิลิกอนจึงเป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่า

นอกจากนี้ยังมีวิธีต่าง ๆ ในการสนับสนุนการนิวคลีเอชันอีกเช่น การเคลือบผิวหน้าของฐานรองด้วยฟิล์มหรือไฟเบอร์ของแกรไฟต์, ฟิล์มโลหะ (Fe, Cu, Ti, Nb, Mo, Ni), C_{60} , C_{70} , a-C, DLC, Y-ZrO₂, a-BN และ SiC หรือ Hydrocarbon oil ความหนาของการเคลือบมีค่า 2-8 nm สำหรับฟิล์มโลหะ 10-20 nm สำหรับ Hydrocarbon oil 100 nm สำหรับ C_{70} 150 nm

สำหรับ Y-ZrO₂ ถึงประมาณ 1 μm สำหรับฟิล์มคาร์บอน การเพิ่มขึ้นของกระบวนการนิวคลีเอชัน เชื่อว่าเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ที่บริเวณพื้นผิว (สารที่เคลือบจะช่วยให้เกิดการอิมตัวของคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรองและยังช่วยให้เกิดตำแหน่งที่มีพลังงานสูงหรือศูนย์กลางของการนิวคลีเอชัน)



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันกับขนาดของอนุภาคที่ใช้

(a) เตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยคริมเพชร

(b) เตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการอุตราโซนิกในผงเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

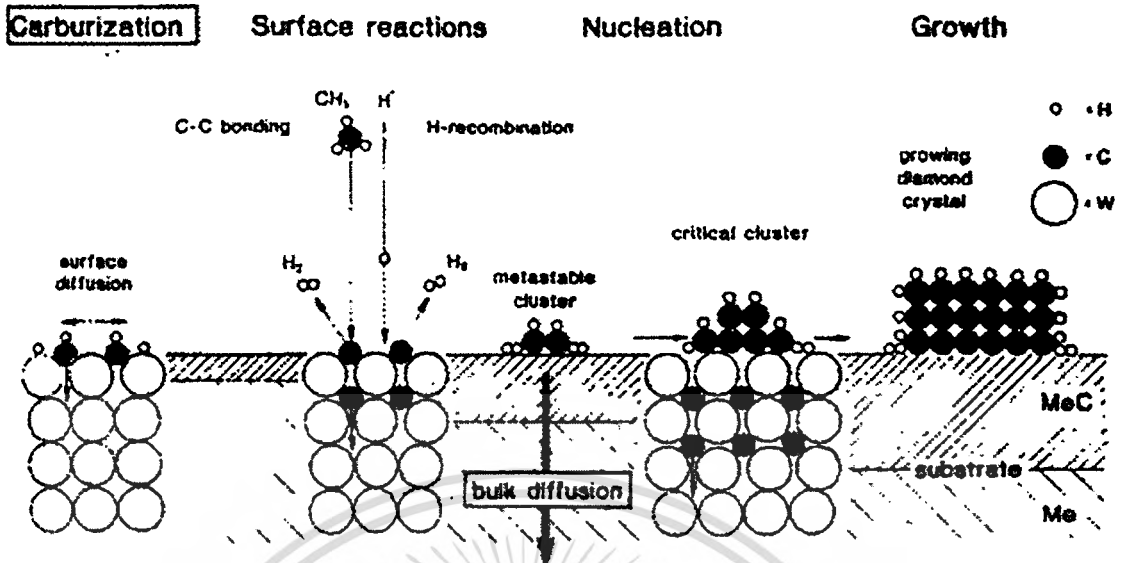
สำหรับวิธี Ion implantation ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานพื้นผิวและโครงสร้างพื้นผิวของฐานรองเพื่อช่วยสนับสนุนให้เกิดการนิวคลีเอชันของเพชร Implantation ของ C^+ (10^{18} ion/cm², 65-120 keV) บน Cu และ As^+ (10^{14} ion/cm², 100 keV) บน Si ทำให้ค่านิวคลีเอชันของเพชรเพิ่มขึ้น ในขณะที่ Implantation ของ Ar^+ (3×10^{15} ion/cm², 100 keV) จะทำให้การนิวคลีเอชันของเพชรลดลง โครงผลึกที่เสียหาย (เกิดการเคลื่อนที่ เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และซ้อนทับกัน) จากผลของ Ion implantation เชื่อว่าเป็นเหตุผลหลักสำหรับการนิวคลีเอชันที่เพิ่มขึ้น โดยการเคลื่อนที่ของ โครงผลึกน่าจะเป็นเหตุผลหลักสำหรับการเพิ่มขึ้นของการนิวคลีเอชันของเพชร

การยิงเลเซอร์ไปยังชั้นบางๆ ของ a-C, WC หรือ cBN ที่สร้างอยู่บนฐานรอง (Cu, Si, Stainless steel) แสดงให้เห็นถึงการสนับสนุนการนิวคลีเอชันและการยึดเกาะของฟิล์มบนฐานรองให้มีค่าเพิ่มขึ้น เลเซอร์ที่ยิงไปนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนองค์ประกอบของคาร์บอนบนฐานรองให้เป็นเพชรหรือผลจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช่วยให้การนิวคลีเอชันของเพชรเกิดได้ง่ายขึ้น ส่วนการ Carburization ของฐานรองต่างชนิดกัน เช่น Mo, W, Si, Fe/Si จะชักนำให้เกิดการนิวคลีเอชันเนื่องจากการเกิดของคาร์ไบด์ และการอิมตัวของคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง

2.2.2 กระบวนการเกิดนิวคลีเอชัน

ปรากฏการณ์นิวคลีเอชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อจากกระบวนการของก๊าซเฟส การนิวคลีเอชันของเพชรสามารถเกิดได้ทั้งแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน (Homogeneous nucleation) หรือ รอยต่อสารต่างชนิดกัน (Heterogeneous nucleation) ขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรองที่เลือกใช้ แต่ส่วนมากแล้วการสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรเป็นที่นิยมนมากกว่าเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

การนิวคลีเอชันของเพชรเริ่มต้นตรงที่มีการแพร่เข้าไปบนพื้นผิวฐานรองด้วยอนุมูลของก๊าซที่มีพันธะ sp^2 ดังเช่น Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่ฐานรองจนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบางๆ ที่เรียกว่า "Intermediate layer" ชั้น ชั้น Intermediate layer นี้เมื่อมีความเข้มข้นของอะตอมคาร์บอนมากพอจะทำให้เกิดขึ้นตอนสำคัญของการเกิดเพชรคือเกิดการกำจัดอนุมูลที่มีพันธะ sp^2 ออกไปบนพื้นผิวของฐานรองโดยอะตอมไฮโดรเจนหรือจากนิวเคลียสที่เสถียรทำให้มีการเปลี่ยนพันธะจาก sp^2 ไปสู่ sp^3 เกิดเป็นเพชรขึ้นบนฐานรอง แผนภาพแสดงกลไกของการนิวคลีเอชันและการเกิดชั้น Intermediate layer แสดงได้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงกลไกการนิวคลีเอชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง

2.2.3 การสร้างชั้นอีพิแทกเซียลฟิล์ม

การเกิดนิวคลีเอชันบนฐานรองสามารถแบ่งได้เป็นแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน และรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน อธิบายได้ดังนี้

1. การนิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน

ส่วนมากแล้วผู้ที่สนใจเกี่ยวกับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จะให้ความสำคัญกับการศึกษา นิวคลีเอชันและการเกิดเพชรแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดมากกว่า มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ พิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะสร้างฟิล์มเพชรที่มีรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน ในก๊าซเฟสที่ แรงดันบรรยากาศ แม้กระนั้นก็ตาม ได้มีรายงานถึงการนิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน ในก๊าซเฟส โดย Frenklach et al. สาเหตุหลักที่การนิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน ของเพชรไม่ได้รับการสนใจในกระบวนการสร้างเพชรแบบ CVD เนื่องจากอัตราการนิวคลีเอชันต่ำและเพชรที่สร้างได้มักจะไม่เกาะตัวเป็นฟิล์ม

2. การนิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน

การเกิดฟิล์มเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร สถานะเริ่มต้นของการเกิดนิวคลีเอชันจะ ช้ามากอีกทั้งค่าความหนาแน่นในการนิวคลีเอชันยังต่ำ แต่ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดย การเตรียมพื้นผิวฐานรองให้มีความเหมาะสม เพื่อเร่งอัตราการนิวคลีเอชันและความหนาแน่น ของการนิวคลีเอชันให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วการเกิดฟิล์มเพชรชนิดผลึกกระนาบรวม

(Polycrystalline diamond) จะแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนย่อยๆ ดังนี้คือ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มีช่วงเวลาที่ใช้ในการก่อตัวระยะหนึ่งซึ่งช่วงเวลานี้จะเกิดการแพร่ของอะตอมคาร์บอนเข้าไปในฐานรอง ทำให้เกิดชั้น Intermediate layer ขึ้น

2. เกิดการนิวคลีเอชันของผลึกเดี่ยวๆ บนพื้นผิวฐานรอง

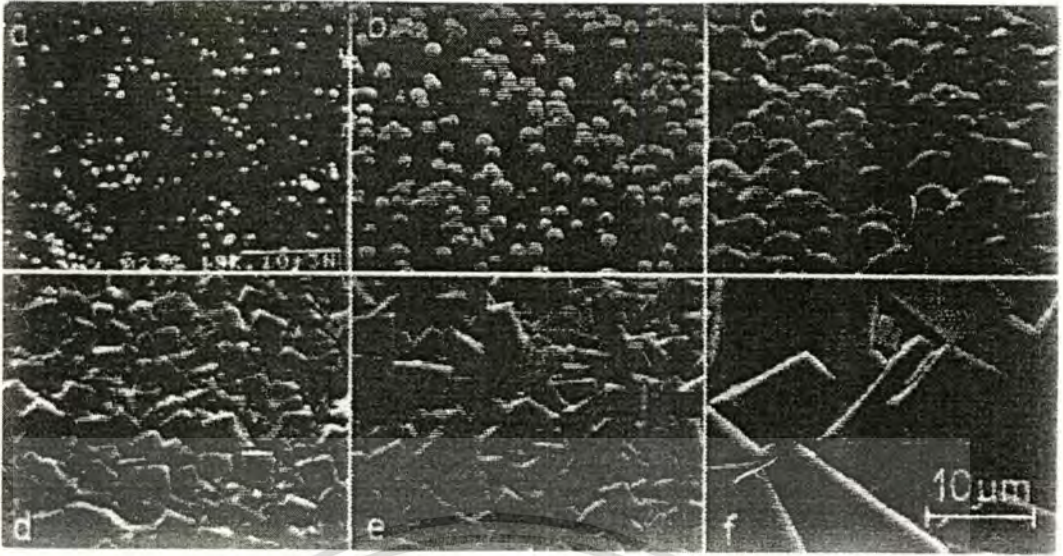
3. เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและผลึกเดี่ยวๆ มีความหนาแน่นมากขึ้น การนิวคลีเอชันของฐานรองจะสิ้นสุดลงและเริ่มเกิดผลึกเพชร

4. มีการเชื่อมต่อกันระหว่างผลึกเพชรเดี่ยวๆ กับผลึกเพชรข้างเคียง

5. เกิดการจับตัวเป็นฟิล์มเพชรอย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแสดงในรูปที่ 2.9 ก่อนที่จะเริ่มต้นการนิวคลีเอชัน ระบบจะต้องใช้เวลาในการก่อตัวค่าหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาที่ใช้นี้อาจมีค่าตั้งแต่ไม่กี่นาที่จนถึงชั่วโมง ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง การเตรียมพื้นผิวฐานรอง และเงื่อนไขในการสร้างผลึกเดี่ยวๆ ขนาดเล็กที่เกิดขณะที่มีการนิวคลีเอชันแสดงได้ในรูป 2.10(a) เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการนิวคลีเอชันจะเพิ่มขึ้น รูป 2.10 (b) และ 2.10(c) หลังจากการนิวคลีเอชันที่บริเวณพื้นผิวเสร็จสิ้นลง ผลึกเดี่ยวแต่ละอันจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและผิวหน้าของผลึกเริ่มเปลี่ยนไป โดยจะเกี่ยวข้องกับอัตราการแพร่ของคาร์บอนจากพื้นผิวของฐานรองบริเวณรอบ ๆ จนกระทั่งผลึกมีขนาดใหญ่พอและชิดติดกับผลึกข้างๆ ดังรูป 2.10(d) จากนั้นเพชรที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นฟิล์มและแสดงระนาบที่ได้อย่างเด่นชัด ดังรูป 2.10(e) และ 2.10(f) หลังจากเพชรเกาะตัวเป็นฟิล์มเพชรแล้ว เพชรที่เกิดขึ้นภายหลังจะมีทิศทางการเกิดตามแนวตั้งฉากกับฐานรองเร็วกว่าการเกิดในทิศทางด้านข้าง และซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ตามแนวดิ่ง

นอกจากนี้การนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรจะทำให้เกิดชั้น Intermediate layer ขึ้นมา ดังที่กล่าวมาข้างแล้วในตอนต้นจากการศึกษาพบว่าชั้น Intermediate layer นี้ อาจจะเป็น DLC, Metal carbide หรือ แกรไฟต์ โดยจะเกิดที่บริเวณผิวหน้าของฐานรองเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างอนุมูลของก๊าซที่ถูกกระตุ้นและพื้นผิวขณะเกิดช่วงเวลาก่อตัว ชั้น Intermediate layer นี้จะนำไปสู่การนิวคลีเอชันของผลึกเพชรและยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นในการนิวคลีเอชันบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร อีกทั้งยังเหมาะสมสำหรับควบคุมลักษณะรูปทรงและความละเอียดของผลึกเพชร ความหนาของชั้น Intermediate layer นี้มีค่าขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างเช่น แกรไฟต์บน Pt หนา 6 Å แกรไฟต์บน Ni หนา 8 nm a-C บน Si หนา 20 nm SiC บน Si หนา 1-10 nm DLC บน Cu หนา 8-14 nm และ Mo₂C บน Mo หนา 1.5-3 μm ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของการนิวคลีเอชันบนชั้น Intermediate layer สามารถอธิบายได้ดังนี้



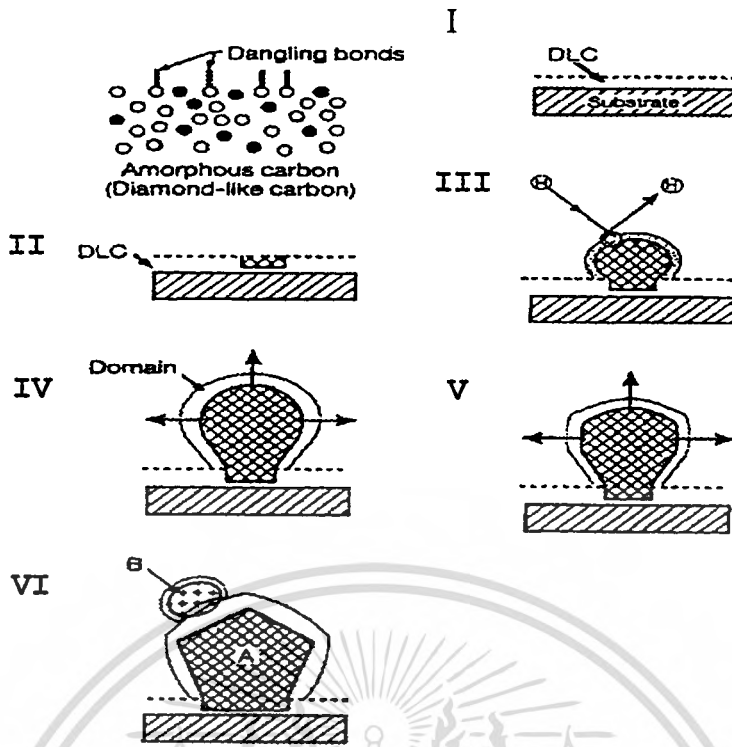
รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการเกิดเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร

- (a) เริ่มเกิดผลึกเดี่ยวๆขนาดเล็กขึ้น
- (b,c) เมื่อเวลาผ่านไปความหนาแน่นของผลึกเดี่ยวๆบนฐานรองจะเพิ่มขึ้น
- (d) เริ่มเกิดผลึกเพชรขึ้นและมีการเชื่อมต่อกับผลึกเพชรข้างๆ
- (e,f) เกิดฟิล์มเพชรอย่างต่อเนื่อง

การนิวคลีโอเซชันบน Intermediate layer ของ DLC

จากการใช้ HRTEM ศึกษาการนิวคลีโอเซชันและการเกิดของเพชรบนทองแดง ด้วยวิธี Hot filament CVD พบว่ามีการเกิดขึ้นของ DLC หนาประมาณ 8-14 nm อย่างชัดเจน ผลึกเพชรขนาดเล็กประมาณ 2-5 nm จะถูกฝังอยู่เป็นแนว และมีผลึกขนาดใหญ่เกิดอยู่บนผลึกขนาดเล็ก นั่นคือ ผลึกเพชรขนาดเล็ก ๆ นั้นจะเกิดจากผลการเปลี่ยนรูปของ a-C ไปสู่เพชร รูปที่ 2.11 อธิบายถึงกลไกการนิวคลีโอเซชันจากการทดลองดังกล่าว ในขั้นตอนที่ I กลุ่มของคาร์บอนจะเกิดการก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองและเปลี่ยนโครงสร้างพันธะภายในจาก sp^1 เป็น sp^2 ต่อมาขั้นตอนที่ II พันธะ sp^2 จะเปลี่ยนไปเป็นพันธะแบบ sp^3 โดยการแตกตัวอย่างต่อเนื่องของไฮโดรคาร์บอนและอะตอมไฮโดรเจนบนพื้นผิวฐานรองจะช่วยให้การเปลี่ยนจาก $sp^1 \rightarrow sp^2 \rightarrow sp^3$ ในขณะเดียวกัน การกำจัดเฟสที่ไม่เสถียร (sp^1 และ sp^2) จะมีค่าเร็วกว่าการกำจัดเฟสที่เสถียร (sp^3) ถึง 10 เท่า นั่นคือช่วยให้การทำให้เฟส sp^3 มีความเสถียร ในขั้นตอนที่ III เป็นการเปลี่ยนของอะตอมคาร์บอนพันธะแบบ sp^3 ที่ไม่เป็นระเบียบ เป็นพันธะแบบ sp^3 ที่มีโครงสร้างแบบเพชร ขั้นตอน IV-V เป็นการเปลี่ยนรูปทรงให้เป็นเพชร และในขั้นตอนที่ VI แสดงการเกิดการนิวคลีโอเซชันลำดับที่ 2 บนผลึกเพชรที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงกระบวนการนิวคลีเอชันของเพชรบน Intermediate layer ของ DLC

การเกิดขึ้นของ DLC สามารถพบได้จากการนิวคลีเอชันบนฐานรอง Mo และ Si และยังพบอีกว่าผลึกเพชรจะไม่เกิดบนฐานรองโดยตรงแต่จะเกิดขึ้นบนชั้นของอสัณฐาน การนิวคลีเอชันของเพชรจะปรากฏบนพื้นผิวของคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบและการก่อตัวของชั้น Intermediate layer นี้ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนแรกในกลไกการนิวคลีเอชันของเพชร

การนิวคลีเอชันบน Intermediate layer ของ Metal carbide

Badzian et al. รายงานถึงการนิวคลีเอชันเพชรบน Si ว่าพบชั้นของ β -SiC เกิดขึ้นมาก่อน จากนั้นจึงเกิดการนิวคลีเอชันบนพื้นผิวของคาร์ไบด์ รายงานดังกล่าวได้จากการสังเกตการทดลองสร้างเพชรบนฐานรอง Si ด้วยวิธี Hot filament CVD และ Microwave plasma CVD ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของซิลิกอนจะเปลี่ยนรูปเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ก่อนที่จะเกิดเพชร นอกจากนี้การก่อตัวของชั้น Mo_2C ในสถานะเริ่มต้นของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี DC plasma jet CVD และ Microwave plasma CVD ในการทดลองสร้างเพชรบน Mo และ Si โดยใช้ Microwave plasma CVD โดย Meilunas et al. พบว่าเกิดขึ้นของ Mo_2C และ SiC หนาประมาณ 1.5 μm และ 10 nm ตามลำดับ ความหนาวัดจาก SEM เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที และ 5 นาที ตามลำดับ อัตราการเกิดของซิลิกอนคาร์ไบด์จะมีค่าน้อยกว่า Mo_2C ผลึกเพชรขนาดเล็กมากถูกพบหลังจากเวลาผ่านไปเพียง 1 นาที และไม่พบชั้นของคาร์ไบด์เกิดขึ้นอีกหลังจากพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ Lux et al. ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของความหนาแน่นการนิวคลีเอชันบนฐานรองชนิดต่าง ๆ กัน เช่น Ti, Hf, Nb, Ta, Mo และ W พบว่าการแตกต่างกันในความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันจะสัมพันธ์กับการละลายหรือการแพร่ของคาร์บอนในฐานรองแต่ละชนิด ค่าเวลาที่ใช้ก่อตัวสำหรับการนิวคลีเอชันบนโลหะจะมีค่าน้อยและพื้นผิวฐานรองจะมีการอิมิตัวอย่างยิ่งของอะตอมคาร์บอนอย่างรวดเร็ว

การนิวคลีเอชันบน Intermediate layer ของแกรไฟต์

Angus et al. ได้ศึกษาการนิวคลีเอชันของเพชรบน Pt และพบว่าขณะอยู่ในช่วงเวลาการก่อตัวจะเกิดแกรไฟต์ขึ้น ซึ่งในเวลาต่อมาหลังจากการสังเคราะห์เพชรเสร็จสิ้นลงจะเหลือเพียงเพชรเท่านั้น การทดลองอย่างเดียวกันนี้ได้กระทำบน Ni ด้วยวิธี Hot filament CVD และบน Si, Cu ด้วยวิธี Microwave plasma CVD ซึ่งได้ผลอย่างเดียวกันคือ เกิดการก่อตัวของชั้นแกรไฟต์ขึ้นก่อนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง และเกิดเพชรขึ้นในภายหลัง โดยแกรไฟต์จะถูกกำจัดออกในขณะที่เกิดการนิวคลีเอชันของเพชร

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าการเกิดชั้น Intermediate layer เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเพชรตามมา จึงเกิดข้อสงสัยว่าการเกิดชั้น Intermediate layer ต่าง ๆ กัน นอกจากขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาเป็นฐานรอง วิธีเตรียมฐานรองและเงื่อนไขการสร้างแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องอีกหรือไม่ Belton et al. ได้ทดลองให้เห็นว่าเกิดชั้นของแกรไฟต์บนฐานรอง Pt และ Ni ก่อนที่จะเกิดเพชร การเกิดชั้น Intermediate layer จะขึ้นกับองค์ประกอบของก๊าซและอุณหภูมิฐานรอง แม้ว่าฐานรองที่ใช้จะเป็นชนิดเดียวกัน เช่น ในการสร้างเพชรด้วยวิธี Microwave plasma CVD บนฐานรองซิลิกอนที่มีการเตรียมพื้นผิวด้วยการขัดคริมเพชร Williams et al. พบว่ามีชั้นของ β -SiC เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ CH_4 ต่อ H_2 เปลี่ยนไปเป็น 2 % vol. และหรืออุณหภูมิฐานรองต่ำกว่าที่เงื่อนไขการสร้างแบบเดิมจะเกิดชั้นของ a-C หรือ DLC ขึ้นมาแทนซิลิกอนคาร์ไบด์ นั่นคือการเกิดชั้น Intermediate layer จะเป็นไปโดยธรรมชาติขึ้นอยู่กับกระบวนการนิวคลีเอชันของเพชร

กระบวนการนิวคลีเอชัน สามารถอธิบายได้จากปริมาณสองค่า คือ

1. ค่าความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันที่บริเวณพื้นผิว (Nucleation density, Nd), cm^{-2}
2. อัตราการนิวคลีเอชันที่บริเวณพื้นผิว (Nucleation rate, Nr), $\text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$

ความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันคือจำนวนของการเกิดนิวคลีโอต่อนี่หน่วยพื้นที่ และอัตราการนิวคลีเอชันคือจำนวนของนิวคลีโอต่อนี่หน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลานั่นเอง โดยค่าความหนาแน่นขึ้นอยู่กัจำนวนของตำแหน่งที่เหมาะสมกับการกระตุ้นให้เกิดนิวคลีเอชัน ดังนั้นการนิวคลีเอชันบนฐานรองจะสิ้นสุดลง เมื่อตำแหน่งที่เหมาะสมถูกยึดครอง หรือผลึกที่เกิดขึ้นคลุมบริเวณผิวเหนือฐานรองโดยสมบูรณ์ ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันยังเป็นตัวกำหนด

ความหนา ขนาดของผลึก การเชื่อมต่อระหว่างผลึกเพชร การยึดเกาะกับฐานรอง ผิวหน้า และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสม่ำเสมอของฟิล์มที่ได้ โดยทั่วไปแล้วถ้าความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันมีค่าจะสูงทำให้ผิวหน้าของฟิล์มที่ได้มีความเรียบ

จากการศึกษาเกี่ยวกับการนิวคลีเอชันของเพชร เป็นที่ยอมรับว่ากระบวนการนิวคลีเอชันของเพชรที่บริเวณพื้นผิวเป็นปัจจัยที่ควบคุมการเกิดและก่อตัวอย่างต่อเนื่องของฟิล์มเพชร การทดลองที่ผ่านมาของการนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรทั้งชนิดผลึก เช่น Au, Cu, Si, Mo, W, Pt, Ni เป็นต้น สามารถสรุปผลที่ได้ดังนี้คือ

1. อัตราการนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรอง ที่ไม่ใช่เพชรมีค่าตั้งแต่ 10^3 ถึง $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ โดยค่าดังกล่าวจะขึ้นกับวิธีการเตรียมพื้นผิวฐานรองและเงื่อนไขในการสร้าง
2. การนิวคลีเอชันของผลึกเพชรจะเกิดบนฐานรองที่มีจุดบกพร่อง (เช่น รอยขีด) แสดงว่าการนิวคลีเอชันของเพชรเกิดขึ้นโดยมีกลไกแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน
3. อัตราการนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองชนิดผลึกเดี่ยวมีค่าน้อยกว่าอัตราการนิวคลีเอชันบนฐานรองชนิดผลึกรวมภายใต้เงื่อนไขการเตรียมฐานรองและเนื้อสารของฐานรองเหมือนกัน
4. อัตราการนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองที่เกิดคาร์ไบด์ (Si, Mo, W) จะมีค่าสูงกว่า 1 หรือ 2 เท่าของอัตราการเกิดบนฐานรองที่ไม่เกิดคาร์ไบด์ (Cu, Au)
5. อัตราการนิวคลีเอชันบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรมีค่าลดลงเมื่อฐานรองถูกปกคลุมและขนาดของผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น

การเตรียมพื้นผิวของฐานรองมีส่วนสนับสนุนอย่างมากในการเพิ่มค่าความหนาแน่นและอัตราการนิวคลีเอชันให้สูงขึ้น จากการทดลองศึกษาถึงผลจากการนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรด้วยวิธีการเตรียมพื้นผิวฐานรองต่างๆ กัน พบว่าความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันมีค่าตั้งแต่ 10^5 cm^{-2} (บนฐานรองที่ไม่มีการเตรียมพื้นผิว) จนถึง 10^{11} cm^{-2} (บนฐานรองที่เตรียมพื้นผิวด้วยการขัดหรือไปอัดฐานรอง) ซึ่งผลของการนิวคลีเอชันบนพื้นผิวดังกล่าวน่าสนใจเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ ในการเตรียมพื้นผิวดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชรจากการเตรียมพื้นผิว
ฐานรองด้วยวิธีต่าง ๆ

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

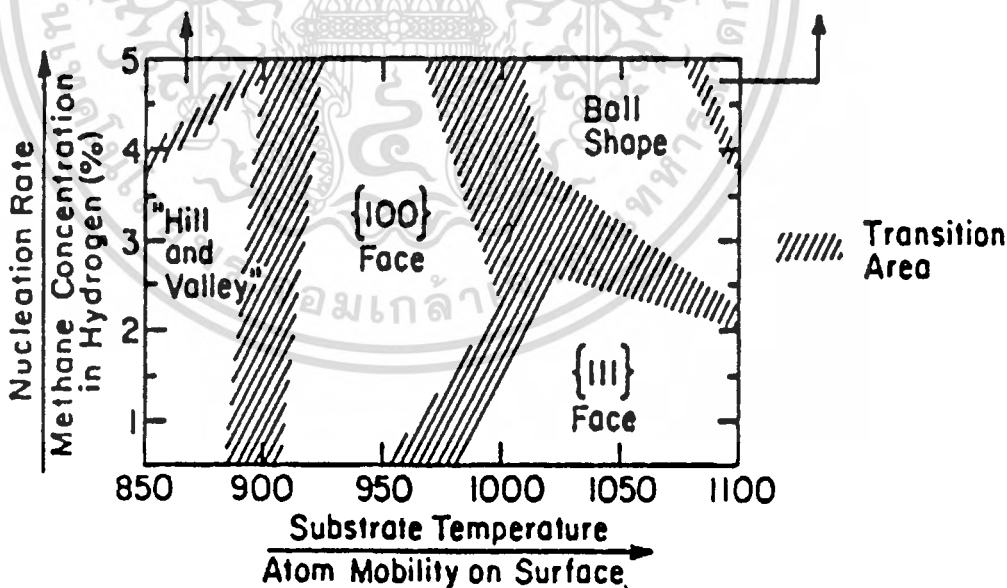
2.2.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร

โดยทั่วไปแล้วผลึกเพชรที่เกิดจากการสร้างด้วยวิธี CVD ส่วนมากมักพบในรูปของ Octahedral, Cubo-octahedral Cubic และ Multiply twinned particles ปัจจัยที่ทำให้เพชรเกิดเป็นรูปทรงต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิฐานรอง ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรเจนที่ใช้ มีการรายงานเกี่ยวกับพฤติกรรมการเกิดผลึกเพชรที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน ตัวอย่างเช่น ในปีค.ศ. 1987 Haubner et al. ได้ศึกษาลักษณะรูปทรงของผลึกเพชรที่สร้างด้วยวิธี Microwave plasma CVD บนฐานรอง SiAlON พบว่ารูปทรงของผลึกเพชรที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพลาสมาที่เปลี่ยนไปตลอดจนรวมไปถึงตัวแปรต่างๆในการสังเคราะห์ เช่น แรงดันก๊าซ อัตราการไหลของก๊าซ ความเข้มข้นของมีเทน และอุณหภูมิฐานรอง พวกเขาพบว่าที่ความหนาแน่นของพลาสมาและอุณหภูมิฐานรองสูง ผลึกเพชรจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ {111} แต่หากพลาสมามีความหนาแน่นต่ำและอุณหภูมิฐานรองต่ำ ผลึกเพชรที่ได้จะมีระนาบ {100} Haubner et al. ได้เสนอแนะว่าการเกิดของผลึกเพชรที่มีระนาบต่างๆ กัน น่าจะเป็นผลมาจากการอิมพัลส์ของคาร์บอนในก๊าซเฟส ความคล่องตัวของคาร์บอนบนพื้นผิวและพลังงานพื้นผิวของผิวหน้าผลึกขณะเกิด

นอกจากนี้ในปี ค.ศ.1990 Zhu et al. ได้ศึกษาถึงลักษณะการเกิดรูปทรงต่าง ๆ ของผลึกและฟิล์มเพชรที่สร้างด้วยวิธี Microwave plasma CVD Zhu et al. พบว่าการเปลี่ยนไปของอุณหภูมิฐานรอง ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจน และอัตราการไหลของก๊าซ มีผลอย่างยิ่งกับการเกิดผลึกเพชรเป็นระนาบ {111} หรือ {100} การทดลองได้นำการเพิ่มค่าอุณหภูมิฐานรองหรืออัตราการไหลของก๊าซ ตามลำดับ (อุณหภูมิฐานรองตั้งแต่ 850°C ถึง 1,150°C อัตราการไหลของก๊าซจาก 0 ถึง 400 sccm) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มเพชรจะเปลี่ยนจากระนาบ {100} เป็นระนาบ {111} และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจนจาก 0.5%vol. เป็น 2% vol. รูปทรงของฟิล์มเพชรจะเปลี่ยนจากระนาบ {111} เป็นระนาบ {100} หากเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซมีเทนขึ้นไปถึง 5 %vol. ผลที่ได้จะเป็นฟิล์มเพชรที่มีผลึกขนาดเล็ก (น้อยกว่า 1 μm) ซึ่งมีเกรไฟต์เป็นองค์ประกอบเกิดขึ้น ผลจากการทดลองที่ได้นี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.12 แผนภาพดังกล่าวเรียกว่า “แผนภาพการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชร” ซึ่งใช้ทำนายการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชรได้ในกระบวนการสร้างแบบ CVD



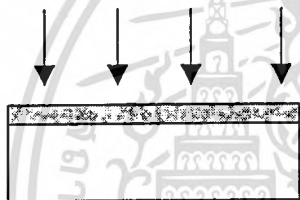
รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพการเกิดรูปทรงของฟิล์มเพชร ในฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในไฮโดรเจน และอุณหภูมิฐานรอง

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

2.2.5 แบบจำลองการเกิดฟิล์มเพชร

จากการศึกษาการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค CVD สามารถสรุปขั้นตอนการเกิดตั้งแต่แรกจนเกิดเป็นฟิล์มเพชรได้ดังรูปที่ 2.13

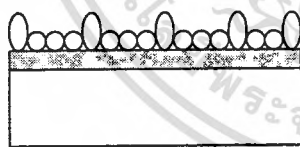
Gas phase $\text{CH}_4 + \text{H}_2$



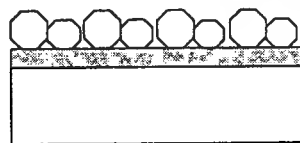
1. มีช่วงเวลาที่ใช้ในการก่อตัวระยะหนึ่งซึ่งช่วงเวลานี้ จะเกิดการแพร่ของอะตอมคาร์บอนเข้าไปในฐานรอง ทำให้เกิดชั้น Intermediate layer ขึ้น



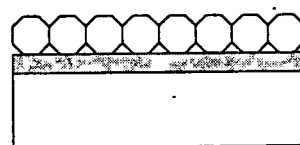
2. เกิดการนิวเคลียชันของผลึกเดี่ยวๆบนพื้นผิวฐานรอง



3. เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและผลึกเดี่ยวๆมีความหนาแน่นมากขึ้น การนิวเคลียชันของฐานรองจะสิ้นสุดลงและเริ่มเกิดผลึกเพชร



4. มีการเชื่อมต่อกันระหว่างผลึกเพชรเดี่ยวๆ กับผลึกเพชรข้างเคียง



5. เกิดการจับตัวเป็นฟิล์มเพชรอย่างต่อเนื่อง

รูปที่ 2.13 แผนภาพการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค CVD

2.3 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion Activation

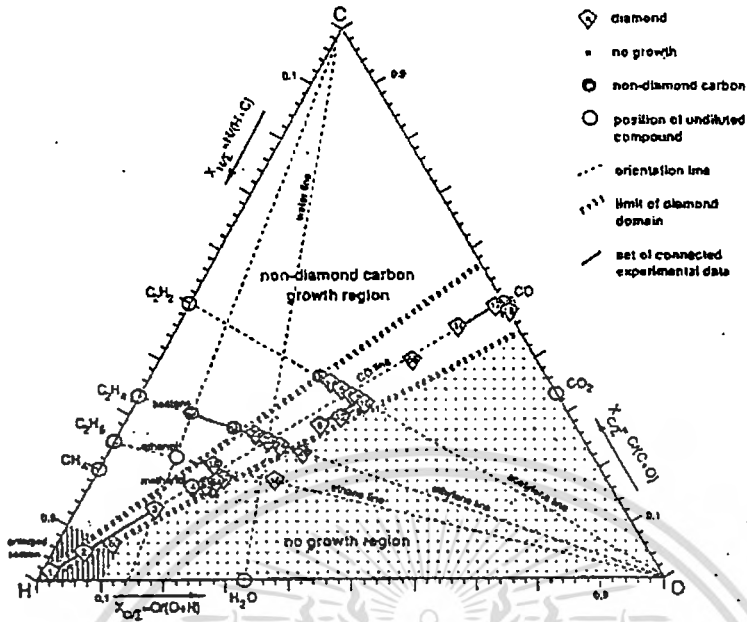
การสังเคราะห์วิธีนี้เป็นส่วนหนึ่งของเทคนิค CVD ด้วยก๊าซออกซิเจนกับไฮโดรคาร์บอนเป็นกระบวนการสังเคราะห์ภายใต้บรรยากาศ การสังเคราะห์ผลึกเพชรโดยทั่วไปจะต้องมีปัจจัยสำคัญของการสังเคราะห์ดังนี้คือ แหล่งกำเนิดธาตุคาร์บอนและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนในโครงสร้างเพชร ลักษณะผิวฐานรองและการควบคุมการเกิดอริบายได้ดังนี้

2.3.1 แหล่งกำเนิดธาตุคาร์บอน

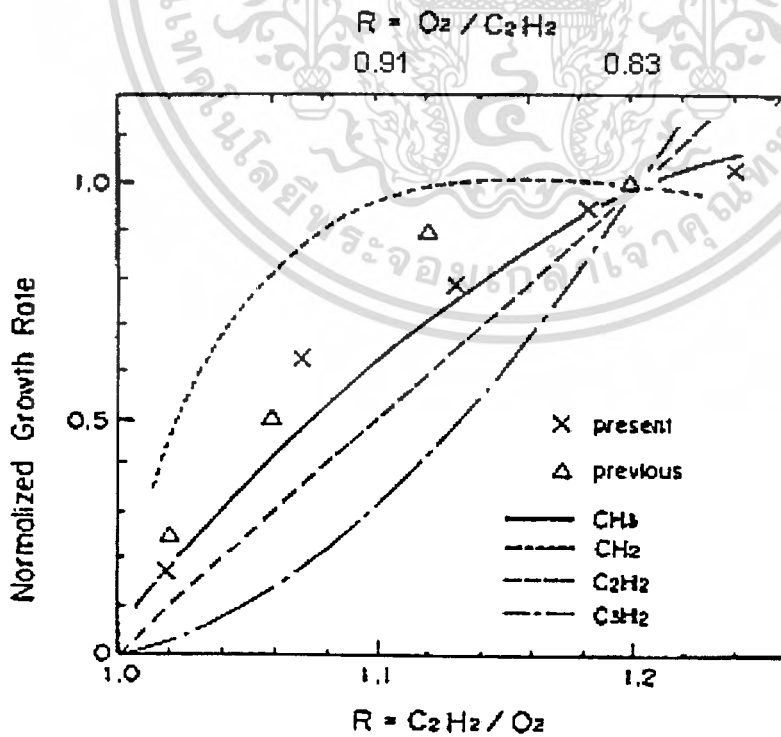
การสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation ก็เช่นเดียวกันเป็นการใช้หลักการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ระหว่างออกซิเจนกับอะเซทิลีนซึ่งเป็นก๊าซที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเงื่อนไขของการสังเคราะห์คือทำให้เหลือก๊าซไฮโดรคาร์บอนและการเผาไหม้เนื่องทำให้เกิดความร้อนสามารถทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวออกเป็นอนุภาคคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดการเผาไหม้ครั้งที่สองกับออกซิเจนทำให้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำตามลำดับ

เมื่อทราบเงื่อนไขแล้วจึงพิจารณาก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ใช้ในการสังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น อะเซทิลีน เอทิลีน อีเทน การสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD จะใช้ธาตุเพียงสองชนิดคือไฮโดรเจนและคาร์บอนเท่านั้น แต่การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะใช้แตกต่างกันคือจะมี ออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย Bachmann et al. ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ธาตุทั้งสามชนิดด้วยการทดลองปรับอัตราส่วนเพื่อหาอัตราการเกิดของเพชร และสามารถสรุปเป็นแผนภาพสามเหลี่ยมเพื่อทำนายการเกิดของเพชรดังรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงความสำคัญของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นรูปสามเหลี่ยมแคบๆ จะเป็นบริเวณที่ทำนายการเกิดของเพชร ก๊าซออกซิเจนจะมีบทบาทต่อการเกิดคือเมื่อก๊าซออกซิเจนมีจำนวนมากจะทำให้ไม่เกิดเพชรขึ้น และถ้ามีปริมาณน้อยไปจะทำให้เกิดคาร์บอนในรูปแบบอื่นเช่น แกรไฟต์ DLC หรือ คาร์บอนอสถฐานแทนเพชร

เมื่อพิจารณาก๊าซไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดจะมีจำนวนอะตอมคาร์บอนไม่เท่ากันจึงมีผู้ศึกษาผลของก๊าซไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดต่ออัตราการเกิดซึ่งเปรียบเทียบกับก๊าซมีเทน โดยก๊าซมีเทนนี้จะได้จากการคำนวณ ผลที่ได้นั้นแสดงให้เห็นว่า ก๊าซอะเซทิลีนมีอัตราการเกิดที่สูงกว่าก๊าซชนิดอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.15



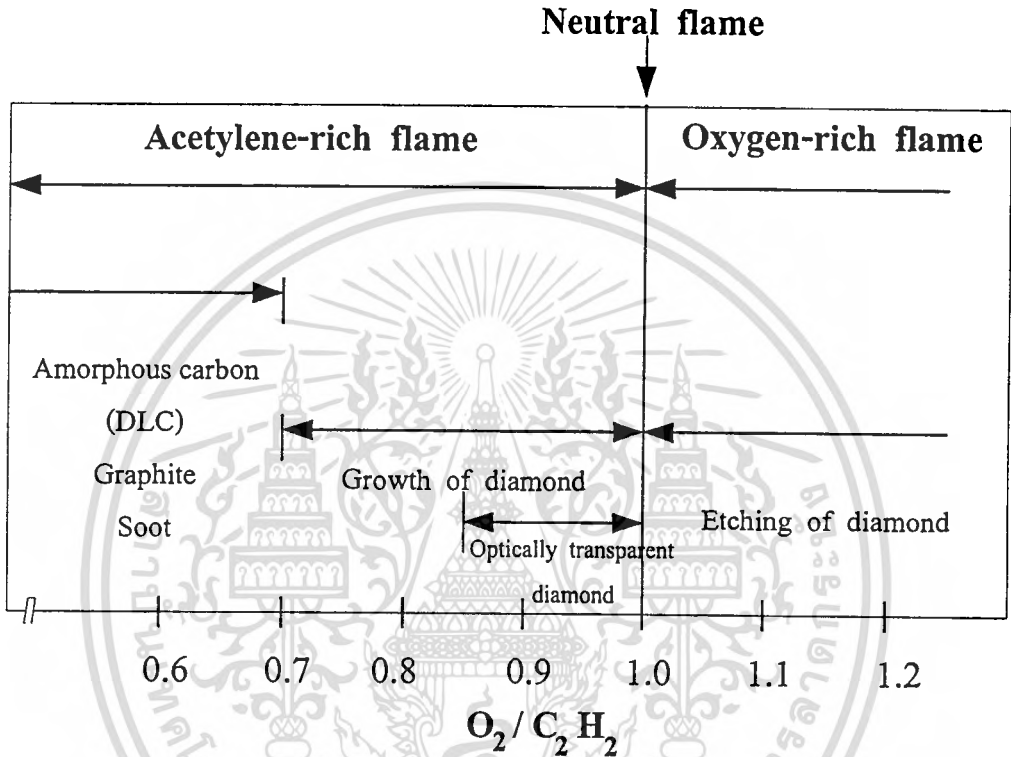
รูปที่ 2.14 แผนภาพความสัมพันธ์ของ คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน ของการเกิดเพชร



รูปที่ 2.15 แผนภาพเปรียบเทียบอัตราการเกิดของเพชรด้วยก๊าซอะเซทิลีนกับก๊าซต่างๆ

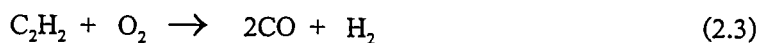
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันก๊าซอะเซทิลีนนั้นก็ใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อนสูง สามารถจุดไฟได้ ซึ่งมีผู้ทำการศึกษา คือ Hirose et al. ได้ทำการเสนอกระบวนการสังเคราะห์จากวิธี Combustion activation จากการศึกษาพบว่าเกิดเป็นผลึกเพชรขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนของออกซิเจนกับอะเซทิลีนระหว่าง 0.70 – 1.0 ในสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.16 ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรต่ำกว่า 0.70 จะเกิดเป็นอสัณฐาน DLC หรือเขม่า และอัตราส่วนโดยปริมาตรมากกว่า 1 จะไม่เกิดเพชร



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีน

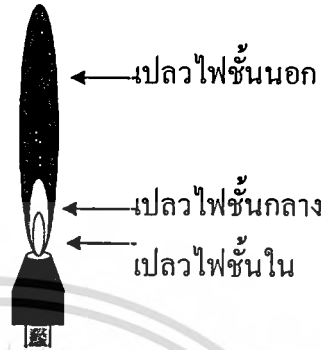
เมื่อศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนที่หัวเชื่อมทองเหลืองเกิดการเผาไหม้ตามสมการเผาไหม้ดังนี้



จากสมการ (2.3) พบว่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนเป็นเท่ากับ 1 จะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อทำการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเพื่อดูลักษณะของเปลวที่เหมาะสมในการทดลอง เมื่อปรับอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเล็กน้อยเปลวไฟของก๊าซจะเป็นดังนี้คือ

1. อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนระหว่าง 0.70– 0.98

เมื่อปรับอัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนระหว่าง 0.70 - 0.98 จะพบว่าเปลวไฟของก๊าซจากหัวเชื่อมทองเหลืองจะปรากฏเปลวแบ่งออกเป็น 3 ชั้นคือ เปลวไฟชั้นนอก กลาง และ ในดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีน 0.70-0.98

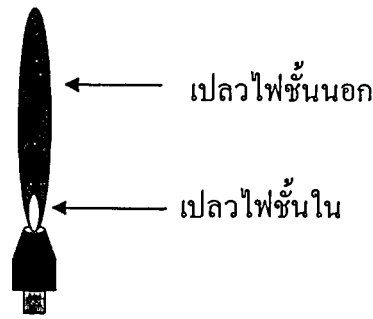
จากรูปที่ 2.17 เปลวไฟชั้นในเป็นการเผาไหม้ระหว่างก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนในอัตราส่วน 1:1 ตามสมการ (2.3) จะได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นบริเวณที่อุณหภูมิสูงประมาณ $3,000^{\circ}\text{C}$ ส่วนของเปลวไฟชั้นกลางก๊าซอะเซทิลีนที่เหลืออยู่จะแพร่ออกไปจากเปลวไฟชั้นในและเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจนตามสมการ (2.4) และคาร์บอนจะเผาไหม้กับออกซิเจนภายนอกเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตามสมการที่ (2.5) ในขณะที่เปลวไฟชั้นนอกจะเกิดการเผาไหม้ของคาร์บอนมอนอกไซด์กับก๊าซออกซิเจนจากบรรยากาศภายนอกได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการ (2.6) รวมทั้งก๊าซไฮโดรเจนเกิดการเผาไหม้กับก๊าซออกซิเจนภายนอกเช่นกันได้เป็นน้ำตามสมการ (2.7)



2. อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนเท่ากับ 1

เมื่อปรับอัตราส่วน โดยปริมาตรดังกล่าวพบว่าเปลวไฟของก๊าซจากหัวเชื่อมทองเหลืองจะปรากฏเปลวไฟแบ่งออกเป็น 2 ชั้นดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

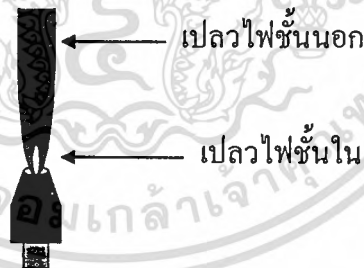


รูปที่ 2.18 แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนเท่ากับ 1

เปลวไฟชั้นใน เป็นการเผาไหม้ระหว่างก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนในอัตราส่วน 1:1 ตามสมการ (2.3) โดยเปลวไฟนี้มีอุณหภูมิสูงกว่าเปลวไฟชั้นในของอัตราส่วนโดยปริมาตร 0.7 – 0.98 ส่วนของเปลวไฟชั้นนอกเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ตามสมการ (2.6) และ (2.7)

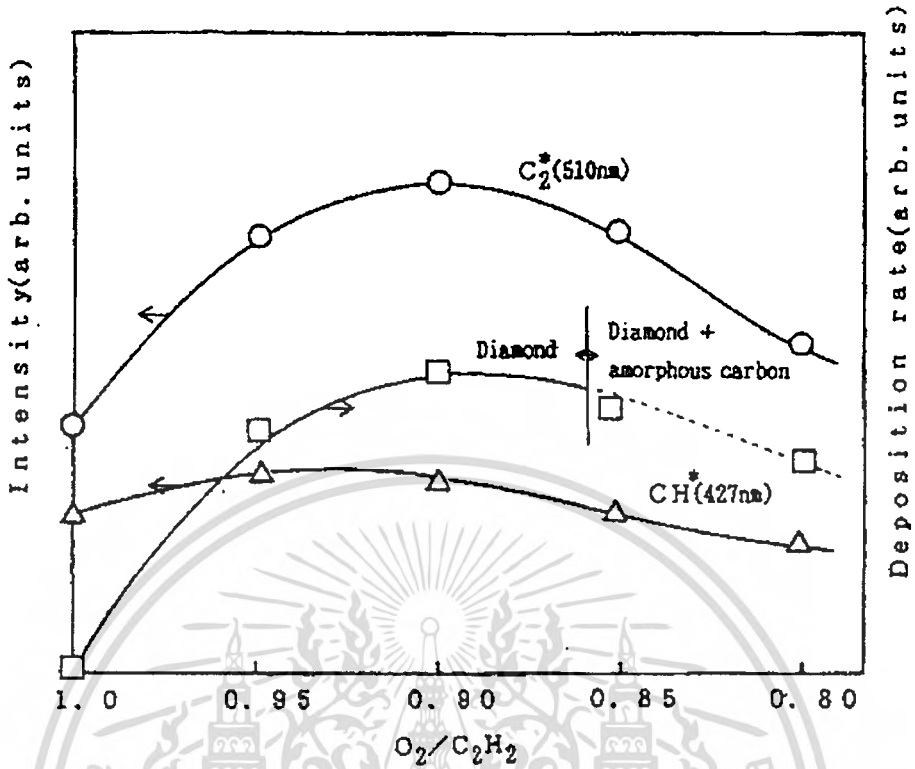
3. อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนมากกว่า 1

เมื่อปรับอัตราส่วน โดยปริมาตรดังกล่าวพบว่าเปลวไฟของก๊าซจากหัวเชื่อมทองเหลืองจะปรากฏเปลวแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยที่รัศมีเปลวไฟชั้นในจะสั้นกว่ารัศมีของเปลวไฟชั้นนอก ประมาณ 1/5 เท่า



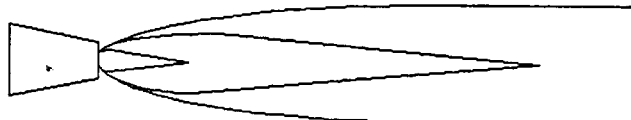
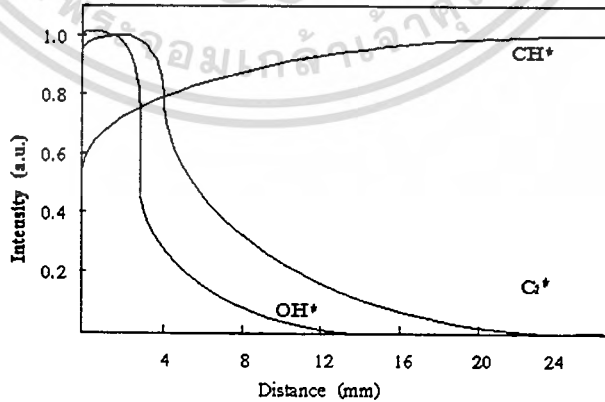
รูปที่ 2.19 แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนมากกว่า 1

ส่วนของเปลวไฟชั้นในเป็นการเผาไหม้ระหว่างก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนในอัตราส่วน 1:1 ส่วนของเปลวไฟชั้นนอกเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ระหว่างอะเซทิลีนกับออกซิเจนภายนอกเล็กน้อยจากแรงดันก๊าซที่หัวทองเหลือง การเผาไหม้ในบริเวณนี้มี คาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งหมดนี้คือปัจจัยสำคัญของการเรียงตัวของคาร์บอนในโครงสร้างเพชรเมื่อพิจารณาที่เปลวไฟชั้นกลางพบว่ามีความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งมีความสำคัญมากในการเกิดเป็นฟิล์มเพชรดังรูปที่ 2.17 เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดและปริมาณของ C_2^* และ CH^* จะพบว่าอัตราการเกิดเพชรจะมีค่าสูงสุดเมื่อ C_2^* มีค่าสูงสุดเช่นกันแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผนภาพอัตราการเกิดเพชรที่ปริมาณสารต่างๆ

ฉะนั้นเมื่อจำนวน C_2^* มากขึ้นด้วย ในขณะที่ตำแหน่งของเปลวไฟต่างๆจะมีปริมาณของ C_2^* , CH^* และ OH^* ต่างกันคือที่บริเวณใกล้กับเปลวไฟชั้นในจะเป็นบริเวณที่เหมาะสมกับการสังเคราะห์มากเพราะมีปริมาณของ C_2^* , CH^* และ OH^* แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แผนภาพการกระจายของอนุภาคต่างๆในเปลวไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการแจ้งสิทธิแก่ผู้จัดทำขึ้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคืออุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสม อุณหภูมิของฐานรองนี้เป็นผลจากการเผาไหม้ของเปลวไฟดังนี้

2.3.2 อุณหภูมิของฐานรอง

ในการทดลองนี้อุณหภูมิของเปลวไฟของก๊าซประมาณ $3,000^{\circ}\text{C}$ แต่อุณหภูมิที่จะทำการทดลองอยู่ระหว่าง $500-1,350^{\circ}\text{C}$ จึงต้องมีระบบระบายความร้อนให้กับฐานรองให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนกับอะเซทิลีนกับอุณหภูมิแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

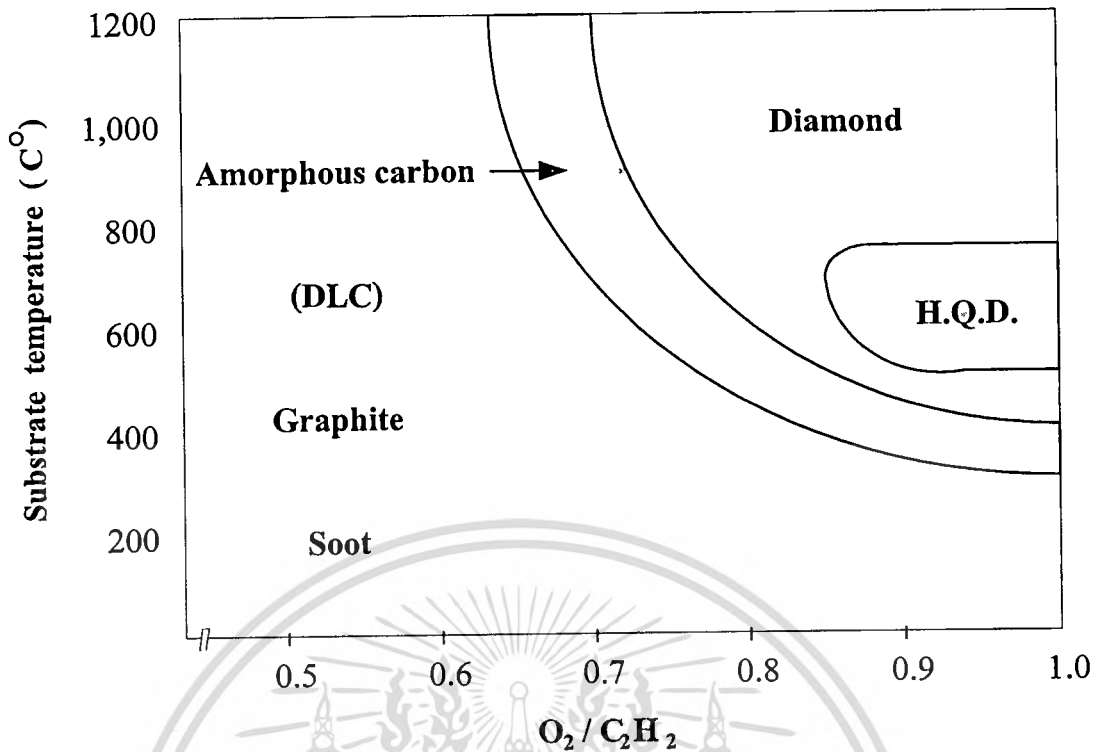
ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนกับอะเซทิลีน

อัตราส่วนโดยปริมาตร $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2$	ชนิดของเปลวไฟเชื่อม	อุณหภูมิ	
		องศาฟาเรนไฮต์	อาศาเซลเซียส
0.8:1.0	Carbonizing	5,550	3,066
0.9:1.0	Carbonizing	5,700	3,149
1.0:1.0	Neutral	5,850	3,232
1.5:1.0	Oxidizing	6,200	3,427
1.8:1.0	Oxidizing	6,300	3,428
2.0:1.0	Oxidizing	6,100	3,371
2.5:1.0	Oxidizing	6,000	3,316

อุณหภูมิที่เปลวไฟนี้จะให้ความร้อนกับฐานรองขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเปลวไฟชั้นในและฐานรองซึ่งเมื่อเปลวไฟนี้อยู่ใกล้จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมและคงที่เป็นสำคัญ

2.3.3 การควบคุมการเกิดของฟิล์มเพชร

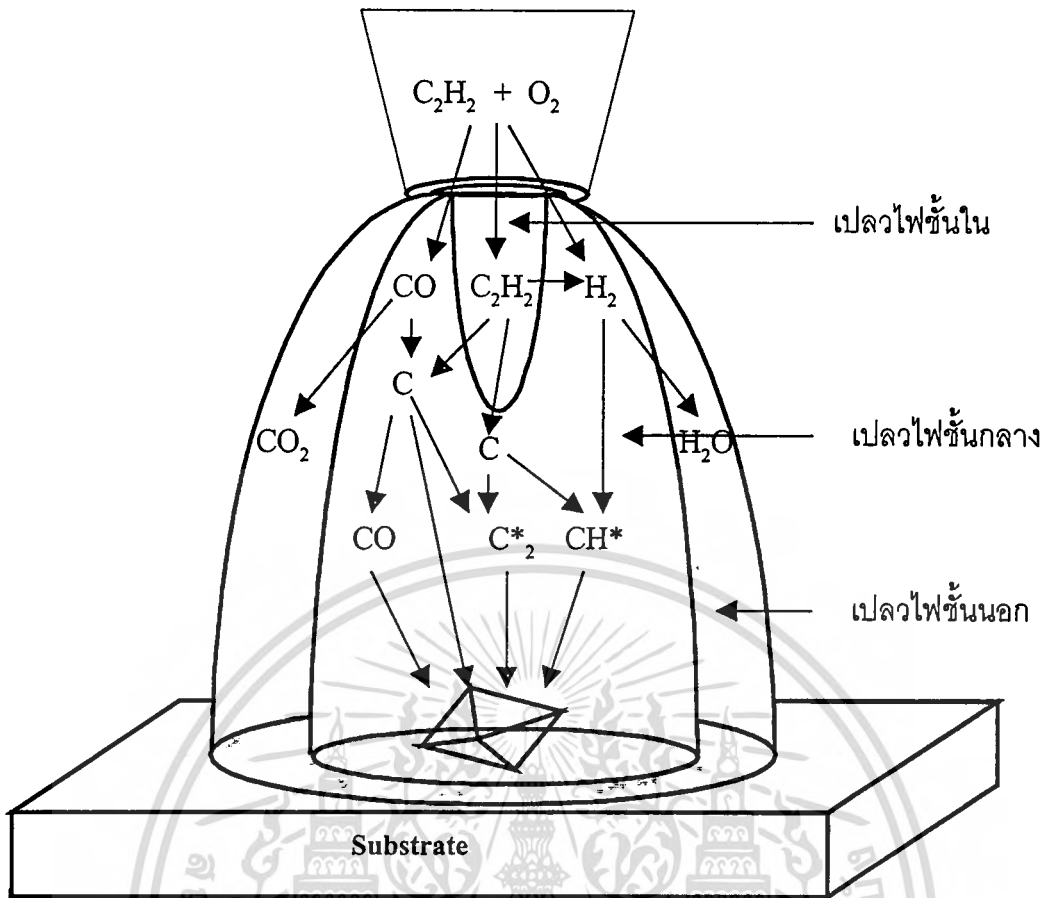
เมื่อทราบพารามิเตอร์ทั้งหมดในการสังเคราะห์แล้วนั้นการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Combustion activation แล้วนั้น จะมีขอบเขตการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซค่าต่างๆ ซึ่งจะมีอุณหภูมิของเปลวไฟแสดงดังตารางที่ 2.4 การเกิดเป็นฟิล์มเพชรได้นั้นจะต้องทำการสังเคราะห์ให้ได้ผลึกเพชรเสียก่อนซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 2.22 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยปริมาตรและอุณหภูมิของฐานรองอยู่ในช่วง 0.70–0.98 และ $400-1,200^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซและอุณหภูมิของการเกิดผลึกเพชร

2.3.4 แบบจำลองการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation

การสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation นั้นมีความแตกต่างจากเทคนิค CVD อื่น คือใช้ก๊าซออกซิเจนในการผสมแทนไฮโดรเจน ทำให้ขั้นตอนการสังเคราะห์มีเฉพาะสามารถสรุปเป็นรูปได้ดังนี้



รูปที่ 2.23 แผนภาพจำลองการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation

2.4 รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะ

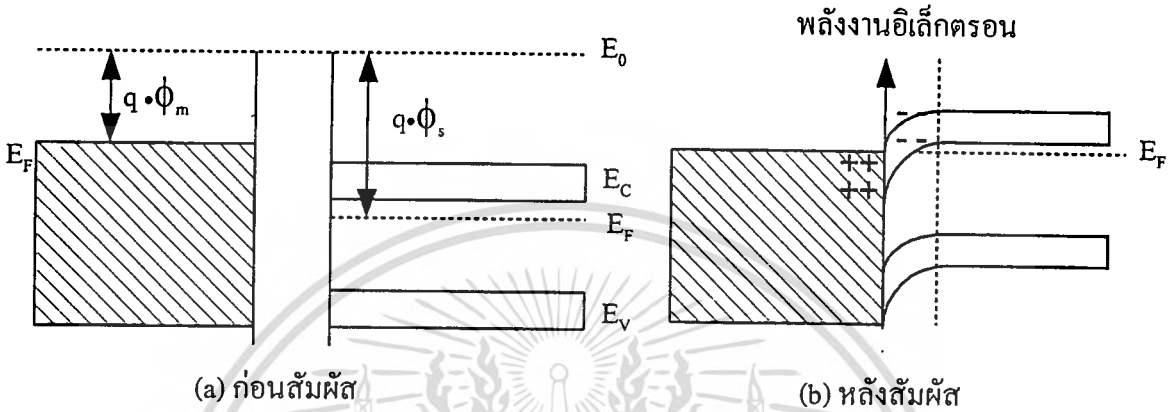
การสร้างรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นการเชื่อมต่อภายในอุปกรณ์แต่ละตัวเป็นวงจรและจากวงจรสู่ขั้วอุปกรณ์ จุดประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้มีการแบ่งรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำ 2 กรณีคือ แบบโอห์มมิก และแบบเร็คตีไฟ

2.4.1 รอยต่อโอห์มมิก

การสร้างรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะพิจารณาความแตกต่างของฟังก์ชันงาน (Work function) ของโลหะ (ϕ_m) และของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) ซึ่งค่าฟังก์ชันแสดงในภาคผนวก ก เมื่อพิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นโดยเลือกโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานน้อยกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ($\phi_m < \phi_s$) โดยอธิบายด้วยทฤษฎีแถบพลังงานก่อนและหลังสัมผัสดังรูปที่ 2.24 (a) เมื่อนำวัสดุทั้งสองสัมผัสกันทำให้เกิดการถ่ายเทประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากค่าฟังก์ชันงานทั้งสองไม่เท่ากัน จนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุล การถ่ายเทประจุพาหะจะหยุดลงในสภาวะที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy) ของสารทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกันตลอดรอยต่อ ภายหลังจาก

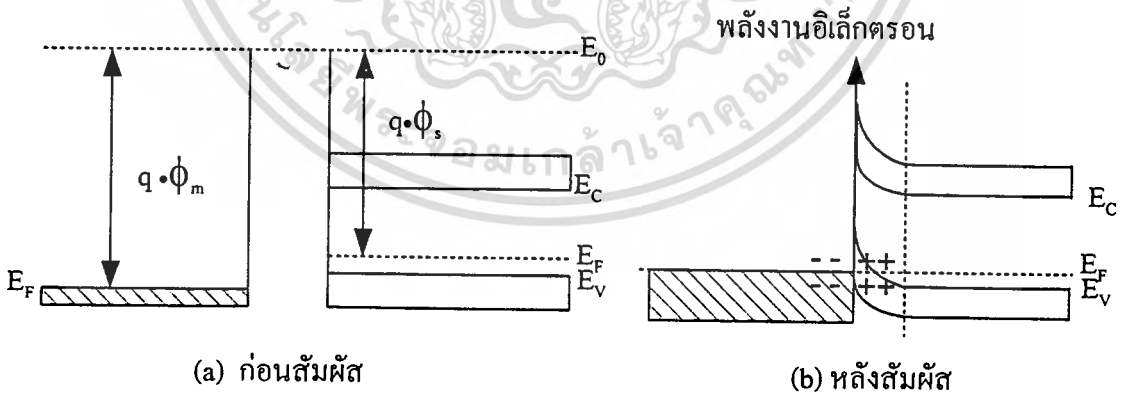
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าประจุพาหะอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดประจุบวกขึ้นที่ด้านโลหะและประจุลบที่ด้านโลหะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในต่อต้านการเคลื่อนที่ เมื่อรอยต่อสัมผัสกัน จะเกิดการโค้งงอของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะ ทำให้ไม่มีกำแพงศักย์เกิดขึ้นกับรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเหมือนกับไม่มีความต้านทานดังรูปที่ 2.24 b



รูปที่ 2.24 แผนภาพแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแบบรอยต่อโอมห์มิก

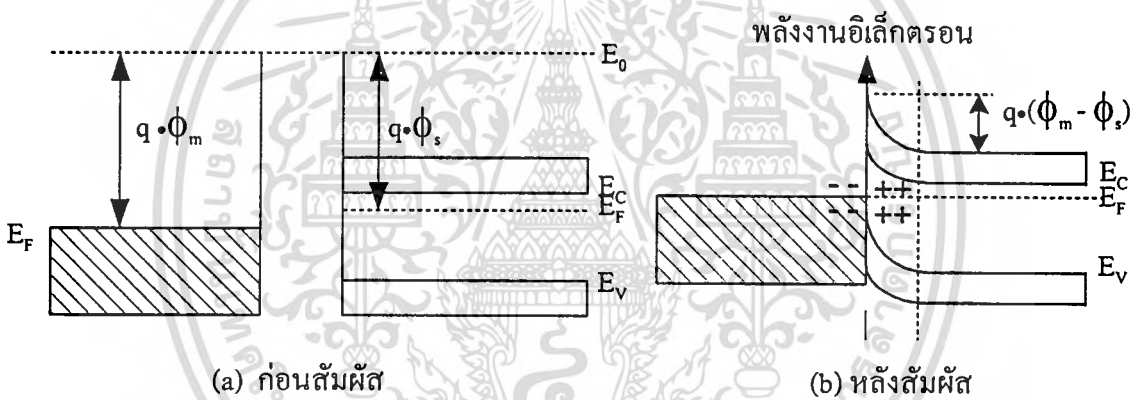
สำหรับรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะต้องเลือกโลหะที่มีฟังก์ชันงานน้อยกว่าฟังก์ชันงานสารกึ่งตัวนำ ($\phi_m < \phi_s$) ซึ่งอธิบายด้วยทฤษฎีแถบพลังงานดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แผนภาพแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีแบบรอยต่อโอมห์มิก

2.4.2 รอยต่อแบบเรกติไฟ

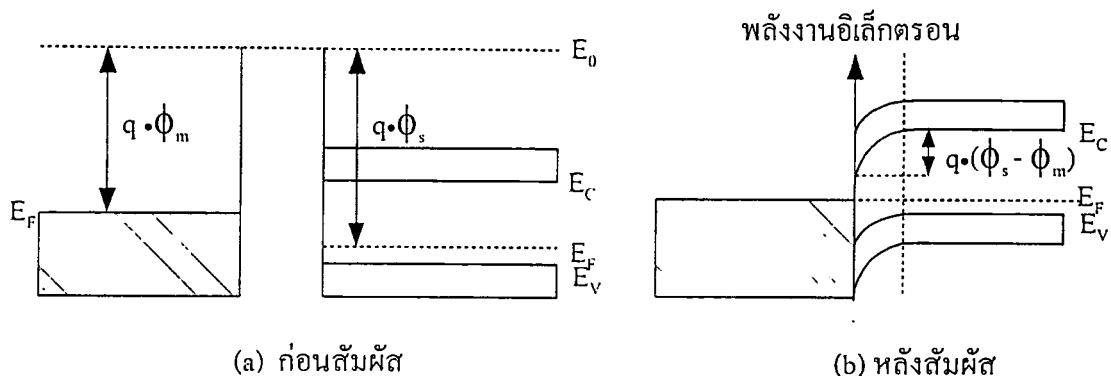
การสร้างรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะพิจารณาความแตกต่างของฟังก์ชันงาน (Work function) ของโลหะ (ϕ_m) และของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) ซึ่งค่าฟังก์ชันงานของสารต่างๆ แสดงในภาคผนวก ข เมื่อพิจารณารอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ($\phi_m > \phi_s$) โดยอธิบายด้วยทฤษฎีแถบพลังงานก่อนและหลังสัมผัสดังรูปที่ 2.26 (a) เมื่อนำวัสดุทั้งสองสัมผัสกันทำให้เกิดการถ่ายเทประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากค่าฟังก์ชันงานทั้งสองไม่เท่ากัน จนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุล การถ่ายเทประจุพาหะจะหยุดลงในสภาวะที่ระดับพลังงานเฟอร์มีของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกันตลอดรอยต่อ ภายหลังเกิดการถ่ายเทประจุจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะทำให้เกิดประจุบวกขึ้นที่ด้านสารกึ่งตัวนำและประจุลบที่ด้านโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายใน เป็นเหตุให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะ โดยค่าแพนซ์กีย์มีค่าเท่ากับ $(\phi_m - \phi_s) \cdot q$



รูปที่ 2.26 แผนภาพแถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแบบรอยต่อเรกติไฟ

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reversed bias) กล่าวคือจ่ายไฟกระแสบวกกับสารกึ่งตัวนำเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะ ทำให้ระดับพลังงานของในสารกึ่งตัวนำลดลง เท่ากับ $q \cdot V$ (V คือแรงดันไบอัสที่จ่าย) ทำให้ความสูงของกำแพงศักย์สูงขึ้น อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังด้านโลหะได้ และในกรณีที่จ่ายแรงดันไบอัสตรง คือจ่ายศักย์ลบแก่ด้านสารกึ่งตัวนำเมื่อเทียบกับด้านโลหะ ทำให้ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นเป็นผลให้กำแพงศักย์ลดลงอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ คุณสมบัติของรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำนี้จะมีสมบัติเหมือนรอยต่อของสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น เรียกว่ารอยต่อซ็อคกี

สำหรับรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะต้องเลือกโลหะที่มีฟังก์ชันงานน้อยกว่าฟังก์ชันสารกึ่งตัวนำ ($\phi_m < \phi_s$) ซึ่งอธิบายด้วยทฤษฎีแถบพลังงานดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แผนภาพแถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดพีแบบรอยต่อเร็คติไฟ

2.4.3 การสร้างรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะ

การสร้างรอยต่อระหว่างโลหะและฟิล์มเพชรเป็นสิ่งจำเป็นต่อการนำอุปกรณ์ไปใช้ โดยรอยต่อโอห์มมิกต้องมีความต้านทานที่รอยต่อต่ำเพื่อสามารถทำการไบอัสด้วยกระแสต่ำได้ ส่วนมากในการทำรอยต่อจะต้องทำการเจือสารเจือแก่ฟิล์มเพชร เมื่อทำการเจือสารเจือโบรอนที่ความหนาแน่นสูง (มากกว่า $10^{19} / \text{cm}^3$) ทำให้มีความต้านทานของฟิล์มต่ำสามารถทำการเคลือบรอยต่อได้โดยไม่ต้องเพิ่มกระบวนการ และ อีกวิธีหนึ่งคือการเลือกโลหะที่จะนำมาทำรอยต่อดังตารางที่ 2.5 ดังนี้

ตารางที่ 2.5 โลหะที่นำมาเป็นรอยต่อสัมผัส

โลหะ	ϕ_M (eV)	ชนิดรอยต่อ
Pt	5.65	Ohmic
Ni	5.15	Schottky
Au	5.10	Ohmic
Cu	4.65	Ohmic
Sn	4.42	Schottky
Zn	4.33	Schottky
Ti	4.33	Schottky
Al	4.28	Schottky
Ag	4.26	Ohmic
Ta	4.25	Schottky
In	4.12	Schottky

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสังเคราะห์

การสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation นั้นเป็นการใช้การเผาไหม้ด้วยหัวเชื่อมก๊าซธรรมชาติใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่โดยเริ่มการสังเคราะห์ผลึกเพชรเพื่อเป็นเงื่อนไขการสังเคราะห์ก่อนแล้วจึงทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จากทฤษฎีในบทที่ 2 ที่กล่าวมานั้นนำมาเป็นเงื่อนไขในการออกแบบชุดเครื่องมือ และเลือกทำการศึกษาเงื่อนไขหลายๆ อย่างเช่น อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ อัตราการไหล ระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้นในกับฐานรอง และอุณหภูมิฐานรอง เงื่อนไขเหล่านี้จะถูกออกแบบเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมในการศึกษา

3.1 การเตรียมชุดเครื่องมือในการสังเคราะห์

การสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation ก็เช่นเดียวกันเป็นการใช้หลักการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ระหว่างออกซิเจนกับอะเซทิลีนซึ่งเป็นก๊าซที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เงื่อนไขของการสังเคราะห์คือทำให้เหลือก๊าซอะเซทิลีน และการเผาไหม้เองทำให้เกิดความร้อนจนสามารถทำให้ก๊าซอะเซทิลีนแตกตัวออกเป็นธาตุคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดการเผาไหม้ครั้งที่สองกับก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำตามลำดับ เมื่อทราบเงื่อนไขของการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธีนี้จึงมีปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมปัจจัยของวิธีการสังเคราะห์นี้ให้เป็นไปตามเงื่อนไขโดยพิจารณาจากคุณสมบัติของหัวเชื่อมและการปรับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนดังนี้

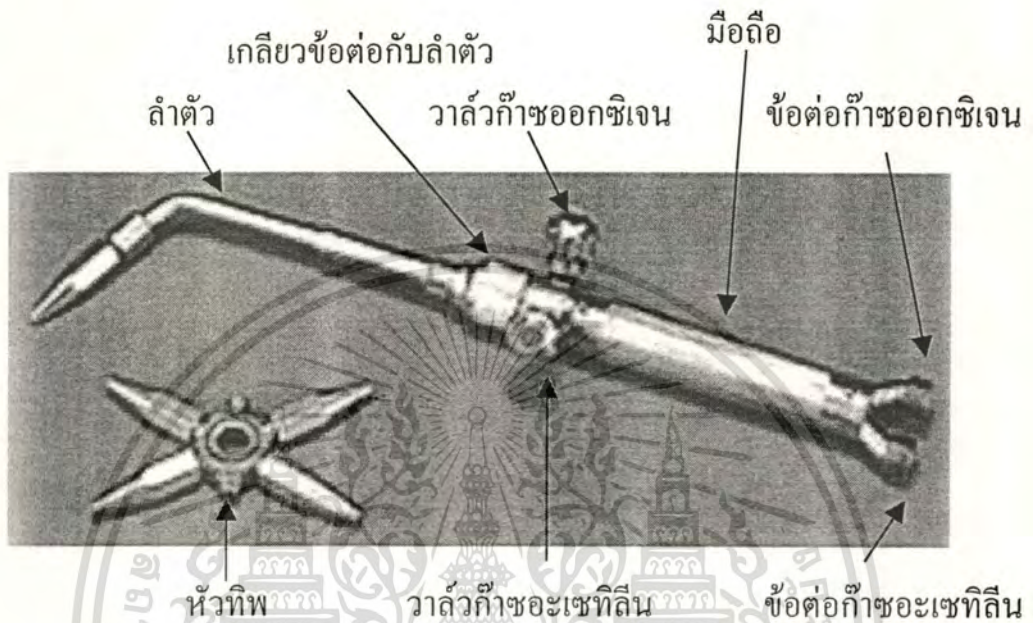
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์จะแบ่งออกเป็นส่วนของหัวเชื่อม และส่วนควบคุมอุณหภูมิเป็นหลักซึ่งจะอธิบายดังนี้

1. หัวเชื่อม

หัวเชื่อมคืออุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้รวมก๊าซออกซิเจนกับก๊าซอะเซทิลีนเพื่อให้ผสมกันภายในห้องผสมก๊าซ สามารถควบคุมการไหลของก๊าซทั้งสองให้ได้สัดส่วนที่ถูกต้องเหมาะสมตามความต้องการ จนกระทั่งก๊าซผสมนั้นไหลพุ่งออกที่ปลายหัวเชื่อมและเกิดการสันดาปภายนอกหัวเชื่อมทำจากโลหะผสมเช่น ทองเหลือง เพื่อมีน้ำหนักเบาสะดวกใช้งาน

หัวเชื่อมจะประกอบด้วยส่วนใหญ่สองส่วนคือ ส่วนแรกที่เป็นมือถือจะประกอบด้วยวาล์วควบคุมการไหลของก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนอย่างละหนึ่งตัว ส่วนที่สองจะประกอบด้วยเป็นลำตัวและหัวทิพซึ่งสามารถแยกออกจากกัน โดยหัวเชื่อมนี้จะประกอบด้วยส่วนต่างๆแสดงดังรูปที่ 3.1 ดังนี้

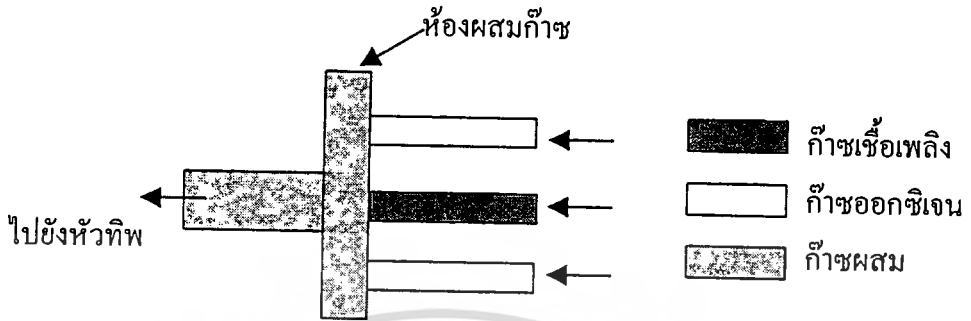


รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของหัวเชื่อม

เมื่อพิจารณาชนิดของหัวเชื่อมจะแยกตามลักษณะตามเทคนิคการผสมก๊าซในห้องผสมก๊าซ โดยที่เนื้อดัดของก๊าซอะเซทิลีนจะเป็นเกลียว หัวเชื่อมจะแยกตามลักษณะการผสมก๊าซภายในได้เป็นสองชนิดคือ ชนิดผสมอุณหภูมิสูง และชนิดผสมอุณหภูมิต่ำหรือชนิดหัวฉีค

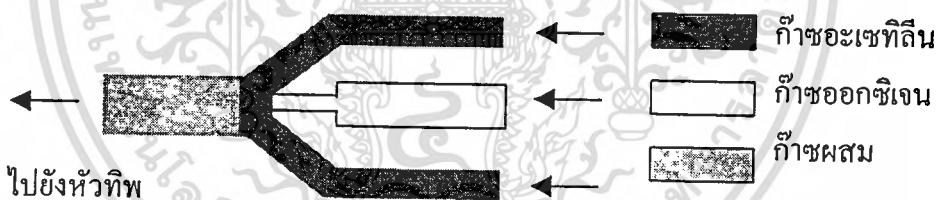
- หัวเชื่อมชนิดผสมอุณหภูมิสูงหรือความดันสูง

หัวเชื่อมชนิดนี้มีหลักการดังนี้คือ ก๊าซทั้งสองชนิดไหลมาผสมด้วยแรงดันที่จ่ายจากท่อก๊าซโดยตรง จึงเหมาะที่จะใช้กับแหล่งก๊าซเชื้อเพลิงที่มีความดันสูงพอสมควร ความดันของก๊าซทั้งสองจะต้องไม่แตกต่างกันมาก โดยการผสมในห้องผสมก๊าซแสดงดังรูปที่ 3.2 เมื่อผ่านก๊าซออกซิเจนและก๊าซอะเซทิลีนยังห้องผสมก๊าซ ความดันก๊าซที่ต่ำสุดที่ใช้ในหัวเชื่อมแบบนี้มีค่าประมาณ 760 torr เมื่อก๊าซผสมทั้งสองไหลผ่านไปยังลำตัวและหัวทิพเกิดการสันดาปภายนอกหัวทิพ



รูปที่ 3.2 การทำงานของห้องผสมก๊าซแบบสมดุลความดันก๊าซหรือความดันสูง

- หัวเชื่อมชนิดสมดุลความดันต่ำหรือชนิดหัวฉีด
 หัวเชื่อมชนิดหัวฉีดมีลักษณะภายนอกคล้ายกับแบบสมดุลความดันสูง จะแตกต่างกันที่ห้องผสมและลักษณะการทำงานภายในเท่านั้น การทำงานของห้องผสมก๊าซแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การทำงานของห้องผสมก๊าซแบบสมดุลความดันต่ำหรือชนิดหัวฉีด

ก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความดันเท่ากัน ก๊าซออกซิเจนที่ใช้ต้องมีความดันสูงประมาณ 1,900-2,280 torr ส่วนก๊าซอะเซทิลีนที่ใช้มีความดันต่ำกว่าก๊าซออกซิเจนมาก ประมาณ 72-228 torr เท่านั้น หัวเชื่อมชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปเพราะสามารถใช้กับแหล่งจ่ายก๊าซอะเซทิลีนจากแหล่งก๊าซได้ทั้งความดันสูงและต่ำ

การที่สามารถใช้ก๊าซอะเซทิลีนซึ่งมีความดันต่ำกว่าก๊าซออกซิเจนได้เป็นเพราะที่ห้องผสมของหัวเชื่อมชนิดนี้ใช้หลักการ โดยให้ก๊าซออกซิเจนดูดก๊าซอะเซทิลีนออกมาด้วยซึ่งเป็นหลักการของหัวฉีดนั่นเองจากรูปจะเห็นว่าห้องผสมแบ่งเป็นสองส่วน คือท่อตรงกลางเป็นทางออกของก๊าซออกซิเจนและท่อด้านข้างซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวนรอบนอกนั้นเป็นทางออกของอะเซทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

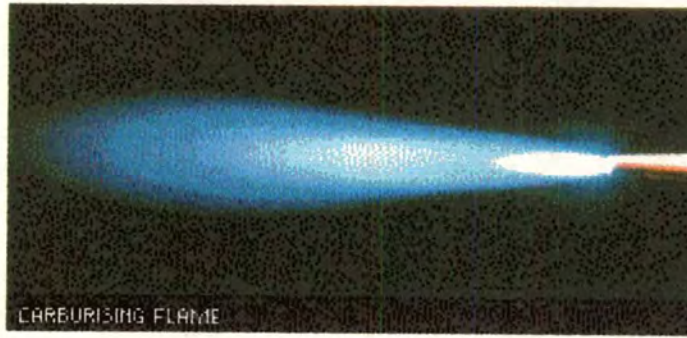
ก๊าซออกซิเจนซึ่งมีความดันสูงมากจะไหลออกจากห้องผสมด้วยความเร็วสูง เนื่องจากการลดขนาดของท่อมีผลให้ความเร็วในการไหลเพิ่มมากขึ้น เมื่อผ่านที่นี้จะทำให้ก๊าซออกซิเจนมีความเร็วประมาณ 80–150 m/s ขณะเดียวกันทำให้ความดันในช่องข้างๆ ลดลงจึงเกิดแรงดูดให้นำก๊าซอะเซทิลีนผสมออกมาที่กระแสก๊าซออกซิเจนกลายเป็นก๊าซผสม พุ่งผ่านหัวเชื่อมออกมาสันดาปภายนอก ข้อดีของหัวเชื่อมนี้คือ หัวเชื่อมนี้สามารถปรับแต่งเปลวไฟได้ง่ายเพราะใช้ความดันของก๊าซไม่สูงมาก และขณะที่ปฏิบัติการเชื่อม โอกาสที่ก๊าซจะสันดาปภายในห้องผสมหรือก่อนที่จะถึงห้องผสมได้ยากซึ่งเรียกว่าไฟย้อนกลับเป็นไปได้ยาก

ห้องผสมก๊าซทั้งสองแบบนี้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้แตกต่างกันคือ หัวเชื่อมแบบสมดุลความดันหรือความดันสูงเหมาะสำหรับการสังเคราะห์ที่ใช้หัวทิพขนาดใหญ่หรือต้องการพื้นที่ฟิล์มมากๆ แต่จะอันตรายจากการสันดาปย้อนกลับ ส่วนหัวเชื่อมแบบหัวฉีดจะเหมาะกับงานที่ใช้หัวทิพขนาดเล็ก อีกทั้งยังปลอดภัยในการเกิดไฟย้อนกลับและประหยัดก๊าซด้วย ส่วน หัวทิพนั้นคือส่วนปลายหัวเชื่อม ทำด้วยโลหะจำพวกทองแดงก็เพราะเป็นส่วนที่ร้อนกว่าส่วนอื่นๆ ของหัวเชื่อมทั้งหมด หัวทิพจะแสดงตัวเลขที่ใช้อธิบายได้ดังนี้คือปลายทิพประทับเลข 75 แสดงว่าปริมาณของก๊าซที่ไหลผ่านในหนึ่งชั่วโมงเท่ากับ 75 ลิตร เป็นต้น

ในการสังเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ห้องผสมแบบหัวฉีดหรือความดันต่ำเพราะมีความปลอดภัยพร้อมทั้งเลือกหัวทิพขนาด 75, 100, 140 และ 200 เมื่อทำการจุดหัวเชื่อมจะปรากฏเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการสันดาประหว่างก๊าซออกซิเจนกับก๊าซอะเซทิลีนมีหลายลักษณะและอุณหภูมิแตกต่างกันตามอัตราส่วนผสมระหว่างก๊าซทั้งสอง เพราะก๊าซทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติและหน้าที่ต่างกัน ก๊าซอะเซทิลีนเป็นก๊าซเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติติดไฟแต่ต้องอาศัยก๊าซออกซิเจนร่วมด้วย ก๊าซออกซิเจนช่วยให้ไฟติดทำให้การสันดาปดีขึ้นแต่ตัวเองไม่ติดไฟเพราะไม่ใช้ก๊าซเชื้อเพลิง การสันดาปจะเกิดขึ้นได้จึงต้องใช้ก๊าซทั้งสองชนิด ถ้าก๊าซทั้งสองมีความบริสุทธิ์มากจะทำให้การสันดาปของเปลวไฟยิ่งสมบูรณ์และอุณหภูมิสูงด้วย การสันดาประหว่างก๊าซทั้งสองชนิดของหัวเชื่อมแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ เปลวคาร์บูไรซิง (Carborizing flame) เปลวนิวทรัล (Neutral flame) และ เปลวออกซิไดซิง (Oxydizing flame) เปลวไฟแต่ละลักษณะมีคุณสมบัติค่าความร้อนและการใช้งานต่างกันดังจะได้บรรยายถึงรายละเอียดดังนี้

- เปลวคาร์บูไรซิง

เกิดจากการสันดาประหว่างก๊าซทั้งสองแต่มีก๊าซอะเซทิลีนมากกว่าออกซิเจน การสันดาปของเปลวไฟลักษณะนี้จะมีก๊าซอะเซทิลีนที่สันดาปไม่หมดเหลืออยู่จำนวนหนึ่ง

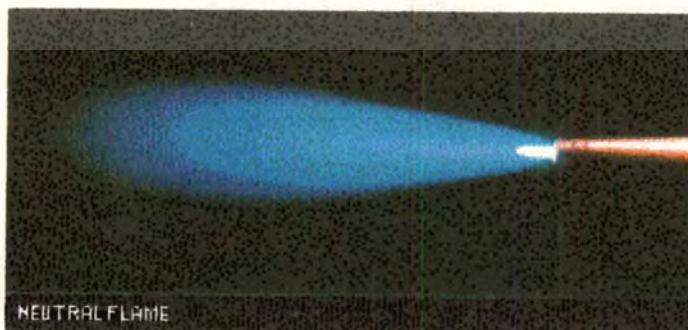


รูปที่ 3.4 ลักษณะเปลวคาร์บูไรซิง

ลักษณะเปลวไฟแบ่งเป็นสามชั้นอย่างชัดเจน ชั้นในสุดมองเห็นสีขาวนวลอมฟ้าเกิดจากก๊าซอะเซทิลีนรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนเกิดการเผาไหม้ เปลวไฟชั้นกลางซึ่งยาวต่อจากเปลวไฟชั้นในเป็นเปลวของก๊าซอะเซทิลีนที่เหลือแตกตัวออกเป็นธาตุคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจน โดยจะเกิดการรวมตัวระหว่างธาตุคาร์บอนเป็นอนุมูลคาร์บอนต่างๆ และเปลวไฟชั้นนอกมีลักษณะเป็นกรวยแหลมขาวล้อมรอบเปลวทั้งสอง ซึ่งเป็นเปลวของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนที่เหลือรวมกับก๊าซออกซิเจนจากบรรยากาศเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำตามลำดับ ความร้อนที่ได้จากเปลวไฟนี้จะต่ำกว่า $3,200^{\circ}\text{C}$

- เปลวนิวทรัล

เป็นการสันดาประหว่างก๊าซออกซิเจนและก๊าซอะเซทิลีนจากหัวเชื่อมในอัตราส่วน 1:1 เท่ากัน สังเกตได้ว่าเปลวไฟมีสองชั้น เปลวไฟชั้นในมีสีขาวนวลอมฟ้าสุดต่อจากปลายหัวทิพ และมีเปลวไฟชั้นนอกล้อมรอบเป็นรูปกรวยแหลมขาวจะไม่มีเขม่าควันอันเกิดจากการสันดาปเหลืออยู่ เปลวไฟนี้ให้ความร้อนสูงสุด $3,200^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งร้อนที่สุดของเปลวไฟห่างจากเปลวไฟชั้นในประมาณ 2–10 mm

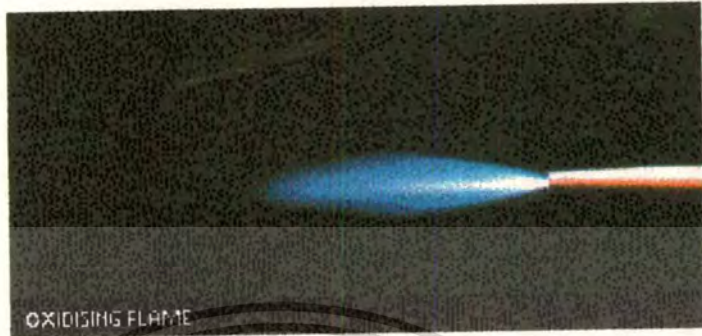


รูปที่ 3.5 ลักษณะเปลวนิวทรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปลวออกซิไดซิง

เป็นเปลวไฟที่มีก๊าซออกซิเจนมากกว่าก๊าซอะเซทิลีน การสันดาปของเปลวไฟชนิดนี้ยังมีก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการสันดาปตกค้างอยู่



รูปที่ 3.6 ลักษณะเปลวออกซิไดซิง

เปลวไฟชนิดนี้สังเกตได้ชัดเจนว่ามีเพียงสองชั้น เปลวไฟชั้นในเล็กและหดสั้นติดกับปลายหัวทิฟ เปลวไฟชั้นนอกล้อมรอบเปลวไฟชั้นในมีสีฟ้าอ่อน ความร้อนที่ได้จากเปลวไฟนี้มีอุณหภูมิต่ำกว่าแบบนิวทรัลเล็กน้อยตามอัตราส่วนผสมของก๊าซ

เมื่อทำการทดลองหาเงื่อนไขอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างก๊าซทั้งสอง สามารถทำการทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อยู่ในช่วง 0.80–0.95 เนื่องจากอัตราส่วนระหว่าง 0.70–0.80 จะเกิดเขม่าขึ้นจำนวนมาก อัตราส่วน 0.95–0.98 นั้นเปลวไฟชั้นกลางจะหดสั้นติดกับเปลวไฟชั้นในเป็นผลให้ทำการสังเคราะห์นั้นทำให้อัตราการเกิดนิวเคลียสชันช้ามาก ซึ่งอัตราส่วนช่วง 0.80–0.95 นี้เหมาะสมกับหัวทิฟขนาด 75, 100, 140 และ 200 ปัจจัยอีกอย่างนอกเหนือจากอัตราส่วนโดยปริมาตรก็คืออัตราการไหลของก๊าซทั้งสองชนิด จึงได้เพิ่มอุปกรณ์ควบคุมการไหลสามารถควบคุมอัตราการไหลได้ระหว่าง 200–2,500 cc/min พบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมนั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 อัตราการไหลจะแตกต่างกันตามขนาดของหัวทิฟ โดยขอบเขตของอัตราการไหลต่ำสุดขึ้นกับความสามารถในการจุกหัวเชื่อมทองเหลืองได้ ส่วนขอบเขตอัตราการไหลสูงนั้นจะขึ้นการปรับอัตราส่วนนั้นเป็นไปได้ยากและสิ้นเปลือง อุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้นในกับฐานรอง

ตารางที่ 3.1 แสดงการเลือกอัตราไหลของก๊าซที่เหมาะสมกับหัวทิพขนาดต่างๆ

อัตราไหลก๊าซ อะเซทิลีน (cc/min)	ก๊าซออกซิเจน (cc/min)				ขนาดของหัวทิพ			
	0.70	0.80	0.90	1.00	75	100	140	200
200	140	160	180	200	✓	✓	✗	✗
300	210	240	270	300	✓	✓	✓	✗
400	280	320	360	400	✗	✓	✓	✓
500	350	400	450	500	✗	✓	✓	✓
600	420	480	540	600	✗	✗	✓	✓
700	490	560	630	700	✗	✗	✓	✓
800	560	640	720	800	✗	✗	✗	✓
900	630	720	810	900	✗	✗	✗	✓
1,000	700	800	900	1,000	✗	✗	✗	✓

จากตารางแสดงอัตราการไหลที่เหมาะสมกับหัวทิพขนาดต่างๆ อุณหภูมิของฐานรองจะขึ้นอยู่กับระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้นในกับฐานรอง การปรับอัตราส่วนของก๊าซเพียงเล็กน้อย เช่น ประมาณ 0.80-0.95 นั้นความยาวของเปลวไฟชั้นในจะประมาณได้เท่ากับความยาวของเปลวไฟชั้นในของอัตราส่วนเท่ากับหนึ่ง จึงทำการวัดความยาวของเปลวไฟชั้นในสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงความยาวของเปลวไฟชั้นในที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเท่ากับ 1

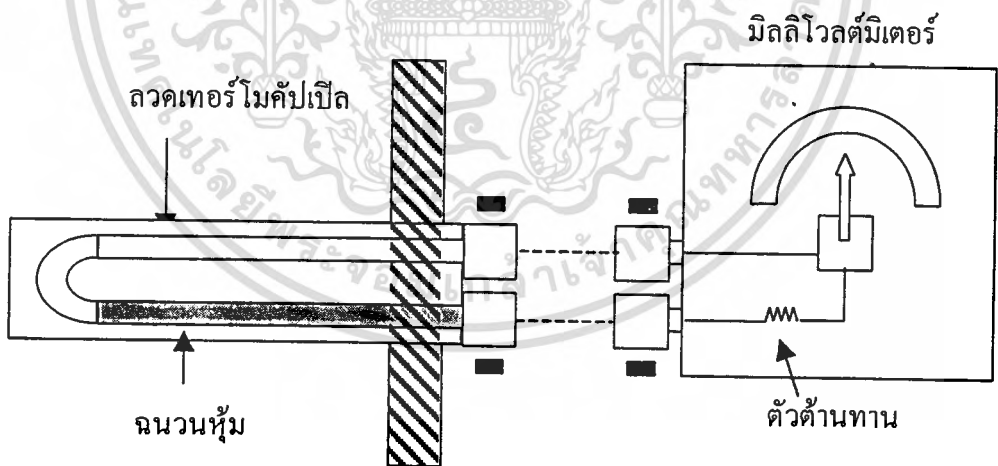
อัตราไหลก๊าซออกซิเจน และอะเซทิลีน (cc/min)	ความยาวเปลวไฟชั้นในที่ขนาดของหัวทิพ (mm)			
	75	100	140	200
200	2.06	1.90	-	-
300	2.49	2.33	2.20	-
400	3.05	2.63	2.56	2.20
500	3.54	3.18	2.95	3.05
600	4.12	3.60	3.40	3.25
700	4.78	4.45	3.82	3.45
800	5.37	4.58	4.02	3.83
900	6.12	5.10	4.60	4.22
1,000	6.40	5.60	5.02	4.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล

การวัดอุณหภูมิของการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้วิธีที่เหมาะสมที่สุดในการวัดอุณหภูมิในขณะการสังเคราะห์ทำการวัดนั้นจะใช้ Thermo - electric ดังรูปที่ 3.7 เป็นเครื่องมือวัดโดยติดไว้กับท่อทองแดงใต้ฐานรอง หลักการทำงานของ Thermo - electrical pyrometer ก็คือเมื่อโลหะสองชนิดเชื่อมต่อกันเข้าด้วยกันจนเกิดเป็นวงจรปิด และอุณหภูมิที่รอยต่อทั้งสองแตกต่างกัน จะมีความดันไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในวงจร ความดันที่เกิดขึ้นกับชนิดของขดลวดที่นำมาต่อเชื่อมกันและจะขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อทั้งสอง ถ้าควบคุมอุณหภูมิที่รอยต่อด้านที่เย็นกว่าให้คงที่ ความดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรก็จะเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิรอยต่อด้านที่ร้อนกว่าได้ Thermo - electrical pyrometer จะประกอบด้วยส่วนสำคัญสามส่วนคือ

1. ส่วนที่เป็นลวดโลหะสองชนิดเชื่อมต่อกันเข้าด้วยกัน ลวดลักษณะนี้จะมีฉนวนหุ้ม และมีแผ่นโลหะ หรือแผ่นซิลิกาหุ้มปลอกกันไว้อีกชั้นหนึ่ง ส่วนดังกล่าวนี้เรียกว่าเทอร์โมคัปเปิล
2. ส่วนที่เชื่อมระหว่างปลายทั้งสองข้างเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิ
3. ตัวเครื่องวัดอุณหภูมิ ปกติจะใช้มิลลิโวลต์มิเตอร์ จะสามารถปรับให้อ่านอุณหภูมิได้โดยตรงเนื่องจากตัวมิลลิโวลต์มิเตอร์ จะมีลวดซึ่งมีความต้านทานสูงมากประกอบอยู่กับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานภายในมิลลิโวลต์มิเตอร์จึงนับได้ว่ามีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้มีอยู่สองแบบคือ แบบ Base metal และแบบ Rare metal แบบ Base metal นั้นจะมีราคาถูกกว่าและวัดความถูกต้องได้น้อยกว่า เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้มีค่าความดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิหนึ่งมากกว่าแบบ Rare metal นอกจากนี้ยังไม่สามารถวัด

อุณหภูมิสูงมากนักและเกิดออกซิเดชัน สำหรับเทอร์โมคัปเปิลแบบ Rare metal มีราคาแพงและวัดอุณหภูมิได้ถูกต้องแน่นอนกว่า และวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ Base metal จะไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รายละเอียดของเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองแบบได้แสดงดังตารางที่ 3.3 นี้

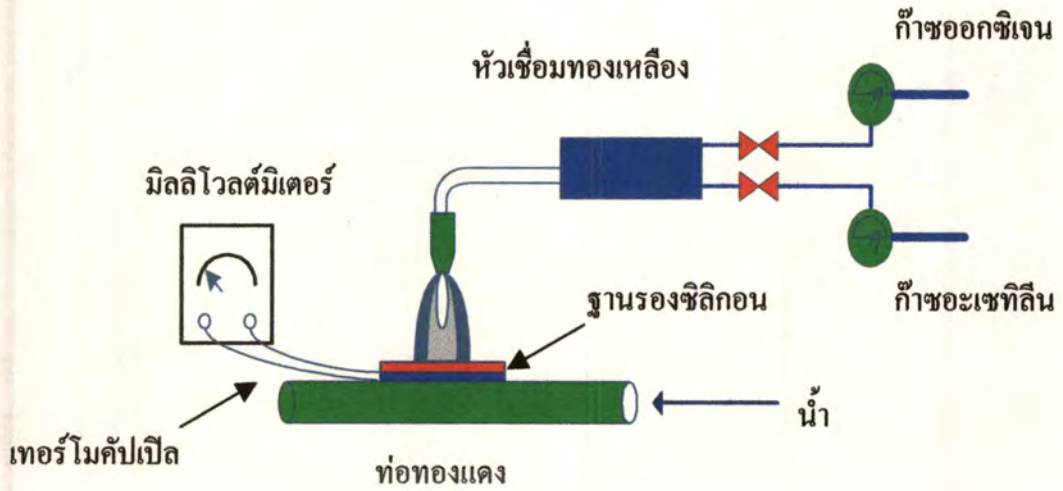
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของเทอร์โมคัปเปิลแบบ Base metal และแบบ Rare metal

เทอร์โมคัปเปิล		อุณหภูมิ °C		หมายเหตุ
		วัดตลอด เวลา	วัดบางขณะ	
แบบ Base metal	ทองแดง – คอนสแตนแตน	400	500	ประมาณ 5 mV/100°C
	เหล็ก- คอนสแตนแตน	900	1,100	ประมาณ 5 mV/100°C
	โครเมิล – อลูเมิล	1,100	1,300	ประมาณ 4 mV/100°C (เหมาะใช้กับบรรยากาศ)
แบบ Rare metal	ทองคำขาว-โลหะผสม 87% ทองคำขาว/โลหะผสม 13 % โรเดียม	1,400	1,600	ประมาณ 1 mV/100°C

การเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิล อาจทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าความดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิคงที่ต่างๆ เช่น อุณหภูมิที่โลหะบริสุทธิ์ต่างๆ แข็งตัว หรืออุณหภูมิที่สารประกอบบริสุทธิ์ต่างๆ แข็งตัว เป็นต้น

การวัดอุณหภูมิของฐานรองในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ Base metal ชนิด โครเมิล - อลูเมิล (Type - K) เพราะสามารถทำการวัดได้ในสภาวะที่เกิดออกซิไดซ์ โดยสามารถเปรียบเทียบได้ในภาคผนวก ข นอกจากนี้แล้วอุณหภูมิของฐานรองที่ทำการสังเคราะห์ได้มีการระบายความร้อนด้วยน้ำจะต้องควบคุมให้อัตราการไหลของน้ำคงที่ด้วยการเพิ่มมาตรวัดอัตราการไหลของน้ำ ทำให้สะดวกในการปรับอัตราการไหล รวมทั้งได้ทำการเพิ่มชุดเลื่อนตำแหน่งของหัวเชื่อมให้เคลื่อนที่ในแนวนอนและแนวตั้งเพื่อให้สามารถทำการทดลองได้อย่างต่อเนื่องและมั่นคง

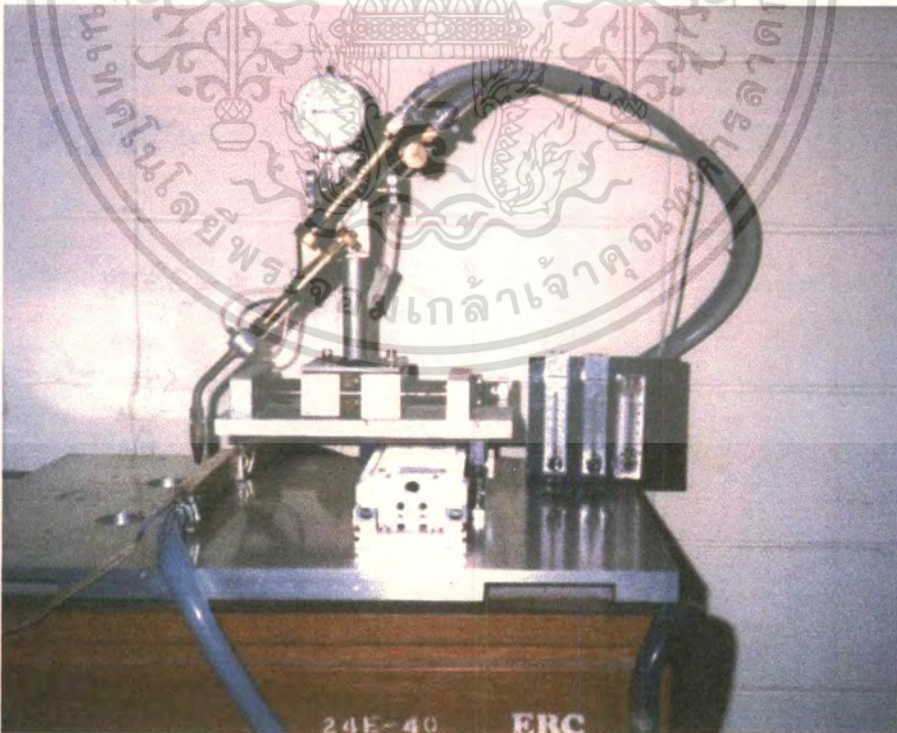
จากปัจจัยทั้งหมดทำการออกแบบชุดอุปกรณ์ในการสังเคราะห์ประกอบด้วยแหล่งจ่ายก๊าซออกซิเจน 99.95 % และ อะเซทิลีน 99.5% ทำให้ออกแบบชุดเครื่องมืออย่างง่ายดังรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าชุดเครื่องมือนี้ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี Combustion activation

3.1.2 การประกอบชุดเครื่องมือ

จากเครื่องมือที่ได้ทำการเลือกแต่ละส่วนซึ่งเหมาะสมกับการสังเคราะห์ ทำการประกอบชุดเครื่องมือโดยเลือกฐานรองที่มีขนาดกว้างและมีความยาวพอที่จะทำการยึดฐานรองได้หลายชั้น เพื่อขณะทำการสังเคราะห์ชิ้นงานแต่ละชิ้นจะใช้เปลวไฟเคมในการทดลองซ้ำหรือทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ เมื่อประกอบเครื่องมือแต่ละส่วนแล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการเตรียมฐานรอง

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถทำบนฐานรองได้หลายชนิดเช่น Si, SiC, WC, W, Mo, Cu และ Al_2O_3 เป็นต้น แต่สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ฐานรองเพียงชนิดเดียวคือซิลิกอน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีใช้อยู่แล้วในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งกระบวนการและอุปกรณ์ที่ใช้ได้มาตรฐาน เมื่อนำแผ่นฐานรองซิลิกอนไปใช้ในการทดลองนั้นต้องมีกระบวนการเตรียมแผ่นฐานรองด้วยกระบวนการต่อไปนี้

3.2.1 การทำความสะอาดฐานรอง

- ล้างในน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water ; DI) ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic)
- ล้างด้วยน้ำ DI
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อนำฐานรองซิลิกอนผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วนั้น จะนำแผ่นฐานรองไปทำการตัดเมื่อทำการสังเคราะห์ผลึกเพชร และทำการเตรียมผิวฐานรองเพื่อเพิ่มการเกิดนิวเคลียสของเพชรให้เร็วขึ้น การเตรียมฐานรองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เพียงสองวิธีคือ การขัดฐานรองด้วยครีมเพชร และอัลตราโซนิกในผงเพชร ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.2 การขัดฐานรองด้วยครีมเพชร

การเตรียมพื้นผิวฐานรองวิธีนี้จะใช้ครีมเพชรขนาด $5 \mu m$ ขัดที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน ซึ่งมีลักษณะเรียบและขัดมันเป็นกระจกเงา (Mirror polished) ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมง ลักษณะตัวอย่างของครีมเพชรจะแสดงในรูปที่ 3.10 ผลจากการขัดด้วยครีมเพชรจะทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดรอยขีดเล็ก ๆ ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน โดยขนาดของรอยขีดที่เกิดจะขึ้นอยู่กับขนาดของครีมเพชรที่ใช้ ภายหลังจากขัดแผ่นซิลิกอนเรียบร้อยแล้วต้องนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาด โดยกระบวนการขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ล้างแผ่นซิลิกอนในไตรคลอโรเอทิลีนด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที
- ล้างในอะซิโตนด้วยอัลตราโซนิก 10 นาที
- ล้างในน้ำ DI ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที
- เป่าแผ่นซิลิกอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

นำแผ่นซิลิกอนไปตรวจสอบรอยขีดด้วยกล้องจุลทรรศน์ ในกรณีที่รอยขีดที่เกิดมีจำนวนมากน้อยต้องนำแผ่นซิลิกอนไปขัดอีกครั้ง โดยรอยขีดที่ดีจะต้องมีขนาดรอยเท่าๆ กัน มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอเพื่อเป็นการกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสของฟิล์มเพชร

3.2.3 การขัดฐานรองด้วยอัลตราโซนิกในผงเพชร

การเตรียมพื้นผิวของแผ่นซิลิกอน โดยวิธีนี้มีขั้นตอนดังนี้คือ

- นำผงเพชร $0.5 \mu\text{m}$ ผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ประมาณ 2-3 นาที เพื่อให้ผงเพชรกระจายตัวผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์
- นำแผ่นซิลิกอนใส่ลงไปในสารผสมระหว่างผงเพชรกับเอทิลแอลกอฮอล์ นำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 1-2 ชั่วโมง
- ล้างแผ่นซิลิกอนในอะซิโตนด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที
- ล้างในน้ำ DI ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที
- เป่าแผ่นซิลิกอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทดลองนี้จะทำการสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวด้วยเงื่อนไขต่างกัดังนี้

- แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการขัดมันเป็นกระจกเงา
 - แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชรขนาด $0.5 \mu\text{m}$
 - แผ่นฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการอัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด $0.5 \mu\text{m}$
- โดยเวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรจะแปรค่าตั้งแต่ 10, 15, 20 และ 25 นาที

3.3 การสร้างรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชร

การสร้างรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชรในการศึกษานี้จะสร้างรอยต่อชนิดโอห์มมิกและรอยต่อชนิดช็อคกีส์ ฟิล์มเพชรที่ได้นี้มีระดับช่องว่างแถบพลังงาน 5.5 eV โดยใช้พื้นฐานการสร้างรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเช่นเดียวกัน การเลือกชนิดของโลหะซึ่งมีฟังก์ชันงานต่างกันเป็น

เงื่อนไขการสร้างนั้นว่าจะได้รอยต่อชนิดใด ก่อนที่จะทำการสร้างรอยต่อนั้นจะต้องนำฟิล์มที่ได้ไปทำความสะอาด เพื่อกำจัดส่วนของคาร์บอนที่ไม่ใช่โครงสร้างเพชรออกดังนี้

- ดั้มในสารละลายอิมตัวของ CrO_3 กับ H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 170°C 3 นาที
- ล้างด้วยสารละลายเค็ด H_2O_2 และ 30 % NH_4OH ในอัตราส่วน 1:1
- ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI
- เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อทำความสะอาดฟิล์มเพชรแล้ว นำฟิล์มเพชรมาทำขั้วโลหะโดยการเคลือบในสุญญากาศ ซึ่งเลือกโลหะดังตาราง 2.5 ได้ดังนี้

- เคลือบบอลูมิเนียม เพื่อทำรอยต่อซ็อคเก็ต
- เคลือบทองเพื่อทำรอยต่อโอห์มมิก
- นำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 890°C 12 นาที

จากกระบวนการสามารถนำฟิล์มเพชรไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป



บทที่ 4

การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ผลึกเพชรหรือฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์จะทำการศึกษาขั้นพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 - 400 เท่า เพื่อดูลักษณะการเกิดของผลึก ขนาดของผลึก พื้นที่การเกิด รวมทั้งความหนาแน่นของผลึกว่าเกิดเป็นฟิล์มหรือไม่ ซึ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์สามารถประมาณผลการสังเคราะห์ได้เท่านั้น ส่วนการวิเคราะห์อย่างละเอียดจะต้องใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งเครื่อง SEM นี้ สามารถตรวจสอบลักษณะผิวของผลึกและฟิล์มเพชร ขนาดของผลึกเพชร ความหนาของฟิล์มเพชรได้อย่างแม่นยำ ส่วนการศึกษาคือความเป็นระเบียบของฟิล์มเพชรนั้นจะใช้ Atomic Force Microscope (AFM) โดยสามารถวิเคราะห์ความสูงต่ำของผิวฟิล์มเพชรได้ในระดับนาโนเมตร จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ เครื่อง SEM และเครื่อง AFM เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างภายนอกเท่านั้น อีกประการหนึ่งจะสามารถบอกถึงกลุ่มระนาบที่เกิดได้โดยพิจารณาจากที่ 2.4 ในการศึกษาการระนาบที่เกิดขึ้นนั้นจะต้องใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) สามารถแสดงระนาบของฟิล์มเพชรได้อย่างละเอียด ต่อจากนั้นจะเป็นการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติว่าฟิล์มเพชรที่ได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น พี หรืออินทรินซิก และการวิเคราะห์จะใช้ Raman spectroscopy ศึกษาฟิล์มเพชรว่ามีรูปของคาร์บอนใดบ้างเช่น แกรไฟต์ ออสถูนาคาร์บอน และ DLC เป็นต้น

การวิเคราะห์นั้นยังมีอีกหลายเทคนิคแต่สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร 5 วิธีคือ

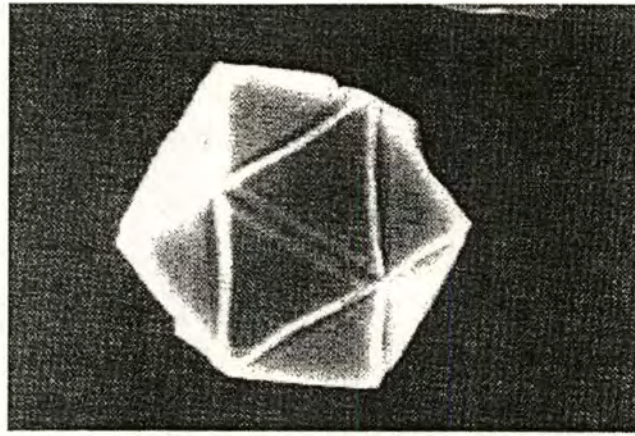
1. การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
2. การวิเคราะห์ด้วย Atomic Force Microscope (AFM)
3. การวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
4. การวิเคราะห์ด้วย Seebeck effect
5. การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscope

การใช้เทคนิคทั้ง 5 เทคนิคนี้เพื่อเป็นการเสนอว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation นี้สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้จริง และแสดงคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ โดยรายละเอียดของแต่ละเทคนิคมีดังต่อไปนี้

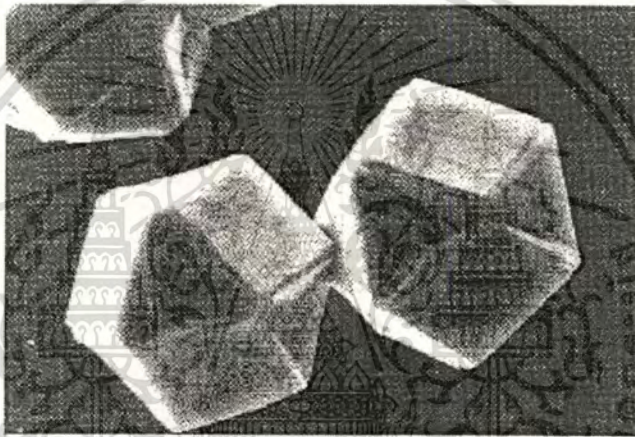
4.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการศึกษาลักษณะของผิวชิ้นงานโดยมีกำลังขยาย 50 – 40,000 เท่า สามารถแสดงผลเป็นภาพสามมิติ มีความคมชัดสูงถึง 2.5 – 10 nm โดยหลักการทำงานของ SEM ทำให้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน (μm) หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโพกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโพกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-Ray Tube) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่น ๆ คือ SEM มีกำลังขยายสูง ความคมชัดของภาพสูง ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเปรียบเทียบกับ TEM (Transmission Electron Microscopy) ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะต้องมีความบางมาก ๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับชิ้นงานตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้าสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านการเตรียมก่อน แต่ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่มีความนำไฟฟ้าก่อนการวิเคราะห์ต้องนำไปเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าก่อน ทั่วไปนิยมใช้ทองคำหรือคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง Si สามารถที่จะวิเคราะห์วัดด้วย SEM ได้โดยมีต้องนำไปเคลือบชั้นบางทองคำหรือคาร์บอน ข้อควรระวังในการวิเคราะห์คือควรใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำ ๆ จะช่วยลดการสะสมประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น AFM และ Raman spectroscopy

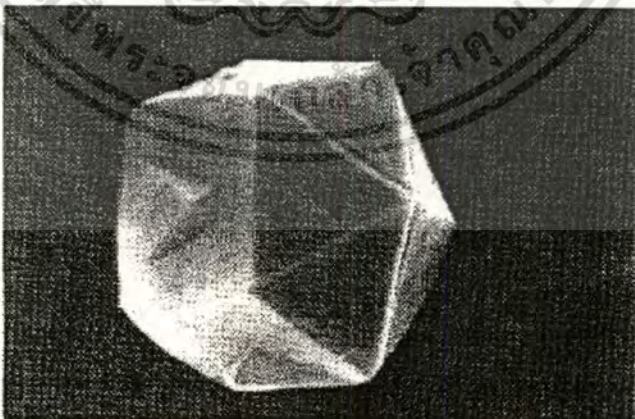
การวิเคราะห์ผลึกและฟิล์มเพชรจากวิธีต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันออกไป จะเป็นไปตามเงื่อนไขในการสร้าง ตัวอย่างของผลึกเพชรที่สังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นผลึกในรูปแบบต่างๆ โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นบนฐานรองที่ Si บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่พบส่วนมากจะมี 4 แบบคือ 1. ระนาบ {111} 2. ระนาบ {100} 3. ระนาบรวม (Polycrystalline) และ 4. Cauliflower-like หรือ Microcrystalline ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้าง โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองจะมีผลต่อพื้นผิวชิ้นงานมาก



1 μ m



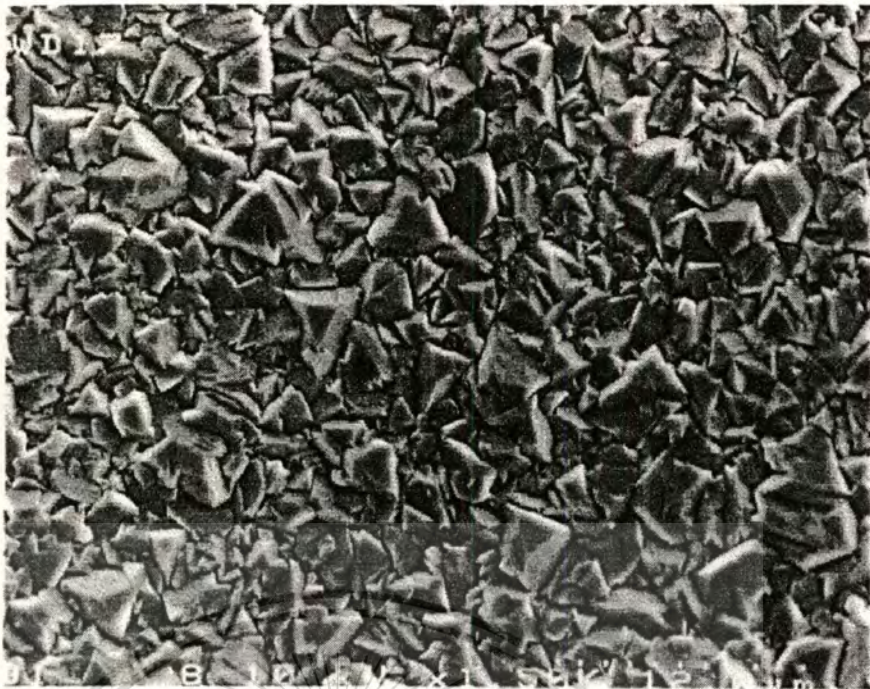
5 μ m



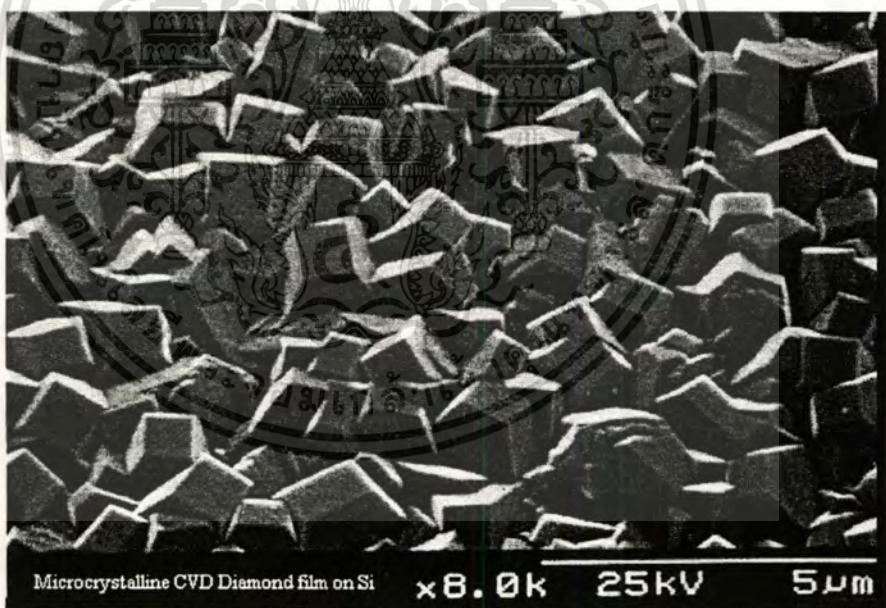
1 μ m

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะรูปร่างของผลึกเพชรแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) $\{111\}$ Triangular faces

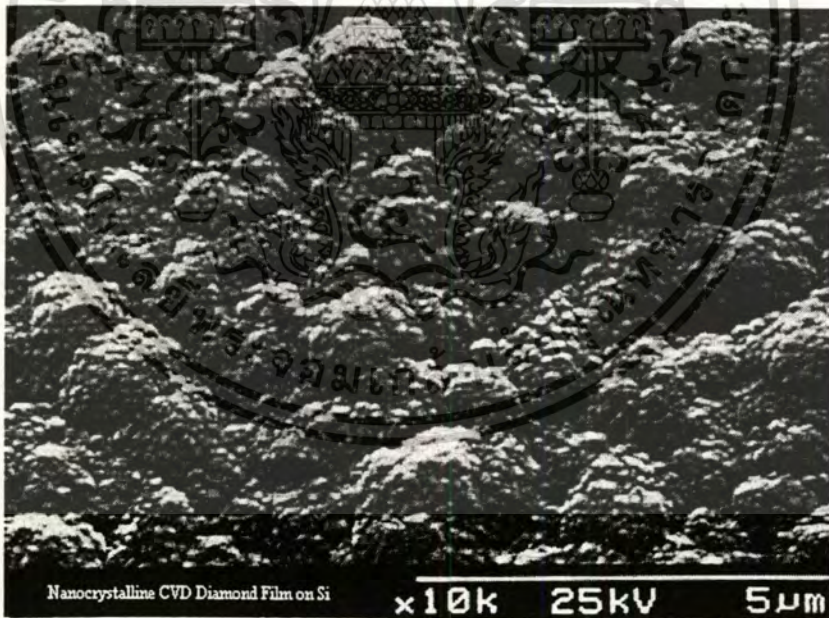


(b) $\{100\}$ Square faces

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ



(c) Polycrystalline faces

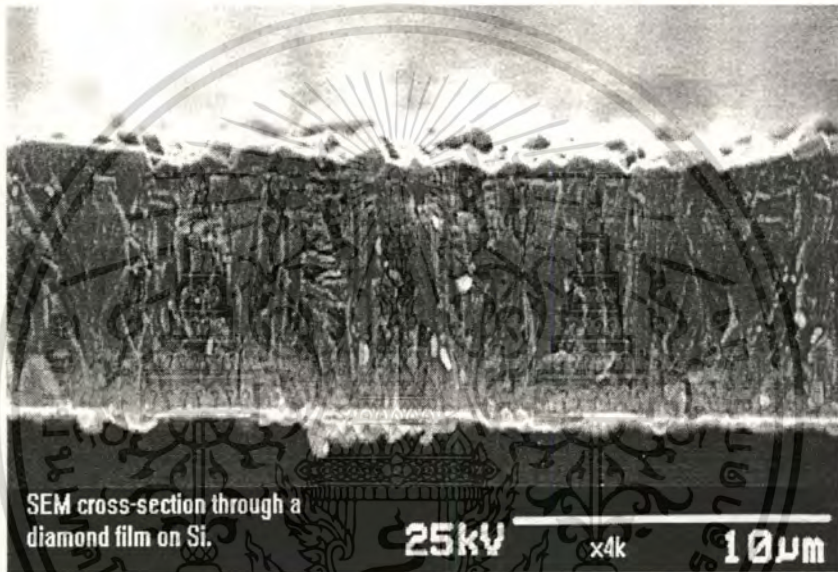


(d) Cauliflower-like or microcrystalline

รูปที่ 4.2 (ต่อ) แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ซึ่งหากใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy จะช่วยให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น Raman spectrum ที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่มีผิวหน้าแบบ Cauliflower-like ในรูปที่ 4.2d จะมียอดกราฟลดลง และเกิดยอดของแกรไฟต์ขึ้นมา เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจสอบพื้นผิวของเพชรรูปอื่น ๆ (4.2a ถึง 4.2c) พบว่าฟิล์มเพชรที่มีลักษณะพื้นผิวแบบรูปที่ 4.2d แสดงคุณสมบัติของเพชรน้อยกว่าชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ SEM หาความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นได้ ดังตัวอย่างจากรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM

4.2 การวิเคราะห์ด้วย Atomic Force Microscope (AFM)

มีเทคนิคหลายวิธีที่ใช้แสดงถึงลักษณะรายละเอียดของพื้นผิว เริ่มตั้งแต่การใช้เลนส์ขยายและการใช้กล้องจุลทรรศน์ในปลายศตวรรษที่ 18 จนกระทั่งศตวรรษที่ 20 มีการพัฒนาใช้เทคนิคของอิเล็กตรอนและลำไอออน (Ion beam) จากตารางที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบเทคนิคการขยายโดยพิจารณาจากการขยาย สิ่งแวดล้อมขณะใช้งาน ชนิดของภาพและผลเสียหายต่อชิ้นงาน สี่เทคนิคแรกในตารางขึ้นอยู่กับอนุภาคที่ใช้ในการโฟกัสเช่น โฟตอน อิเล็กตรอน และไอออนที่จะแสดงภาพออกมา และเป็นเทคนิคที่มีข้อจำกัดของความยาวคลื่นช่วงที่สามารถมองเห็นได้ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) จะทำงานเมื่ออยู่ในสุญญากาศเท่านั้น ส่วนเทคนิคสุดท้ายคือ Scanning Probe Microscope เป็นเทคนิคที่สามารถทำงานได้ในหลายสภาวะตัวกลางด้วยกำลังขยายที่สูงกว่า สามารถแสดงข้อมูลด้านความลึกได้ และทำลายผิวหน้าชิ้นงานน้อยมาก

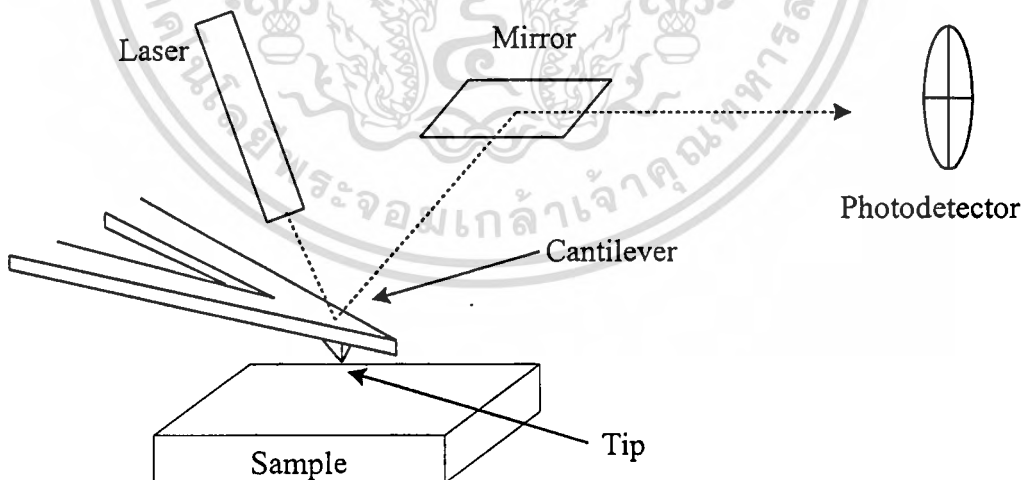
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบการใช้เทคนิคในการวิเคราะห์พื้นผิวชนิดต่าง ๆ

	กำลังขยาย	ตัวกลาง	ภาพ	ผลเสียหาย
ทางแสง	10^3	อากาศ, ของเหลว	2 มิติ	ไม่มี
เลเซอร์	10^4	อากาศ	2 มิติ	น้อย
ลำไอออน	10^5	สุญญากาศ	2 มิติ	มาก
SEM	10^6	สุญญากาศ	2 มิติ	มีบ้าง
SPM	10^9	ของเหลว, สุญญากาศ, อากาศ	3 มิติ	น้อยมาก

AFM เป็นชนิดหนึ่งของ Scanning Probe Microscope ซึ่งสามารถสร้างภาพได้ในสามมิติ และทำงานในตัวกลางที่เป็นอากาศมี Scanning probe, เปียโซอิเล็กทริกเซรามิก (piezoelectric ceramics) วงจรไฟฟ้าป้อนกลับ และคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างและแสดงภาพเป็นส่วนประกอบ

Force Sensor มีลักษณะดังรูป 4.4 วิศวกรรมการหักเหของคานกระเดื่อง (Cantilever) ซึ่งมีเข็ม (Tip) ติดอยู่ที่ปลาย เมื่อคานกระเดื่องเคลื่อนที่ลำแสงจากเลเซอร์จะเคลื่อนที่ตกคร่อมบริเวณทั้งสี่ส่วนของโฟโตดีเทคเตอร์ การเคลื่อนที่ของคานกระเดื่องนี้สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างของความเข้มแสงบนแต่ละส่วนของโฟโตดีเทคเตอร์ตามกฎของ Hooke ($F = -kx$) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของคานกระเดื่อง (x) และแรงที่ใช้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ (F)

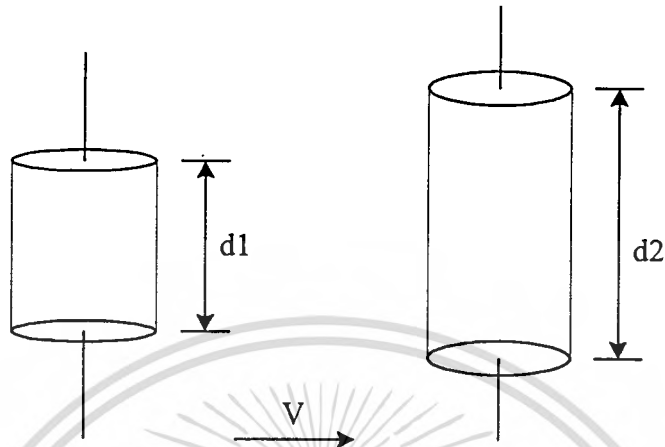


รูปที่ 4.4 แผนภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วย AFM

เป็นไปได้ที่จะให้คานกระเดื่องมีค่าคงที่ของแรง k เป็น 1 N/m สำหรับการเคลื่อนที่ที่น้อยกว่า 1 \AA ที่สามารถวัดได้จะใช้แรงน้อยกว่า 0.1 nN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

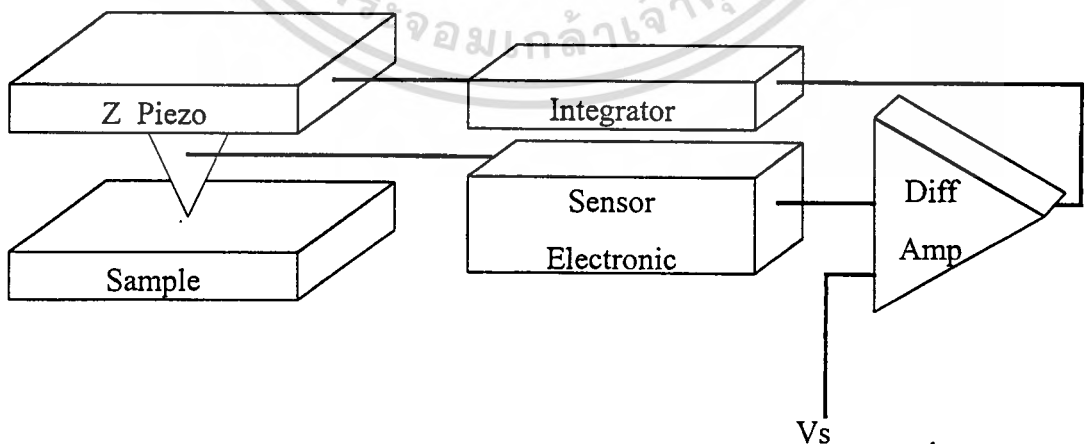
เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics) ถูกสร้างขึ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดได้เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า ยกตัวอย่างทรงกระบอกเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ในรูปที่ 4.5 จะมีขนาดยาวขึ้น แต่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (Piezoelectric ceramics)

เซรามิกที่ใช้จะมีรูปร่างต่าง ๆ โดยแต่ละชนิดจะมีสัมประสิทธิ์การขยาย (Expansion coefficient) เฉพาะตัวซึ่งจะยอมให้เกิดการผิดรูปร่างไปตามศักย์ที่ให้ สัมประสิทธิ์นี้จะอยู่ในช่วงจาก 1 ถึง 3,000 Å/V ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้เซรามิกมีตำแหน่งเข็มที่แม่นยำ ยกตัวอย่างเซรามิกที่มีสัมประสิทธิ์การขยาย 1 Å/V จะมีการเคลื่อนที่ 0.1 Å เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดศักย์ 100 mV

วงจรรีเล็คทรอนิกส์ป้อนกลับ ประกอบด้วยโพรบ/เซนเซอร์ และเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก เป็นวงจรกำหนดตำแหน่งของเซนเซอร์ ดังรูปที่ 4.6

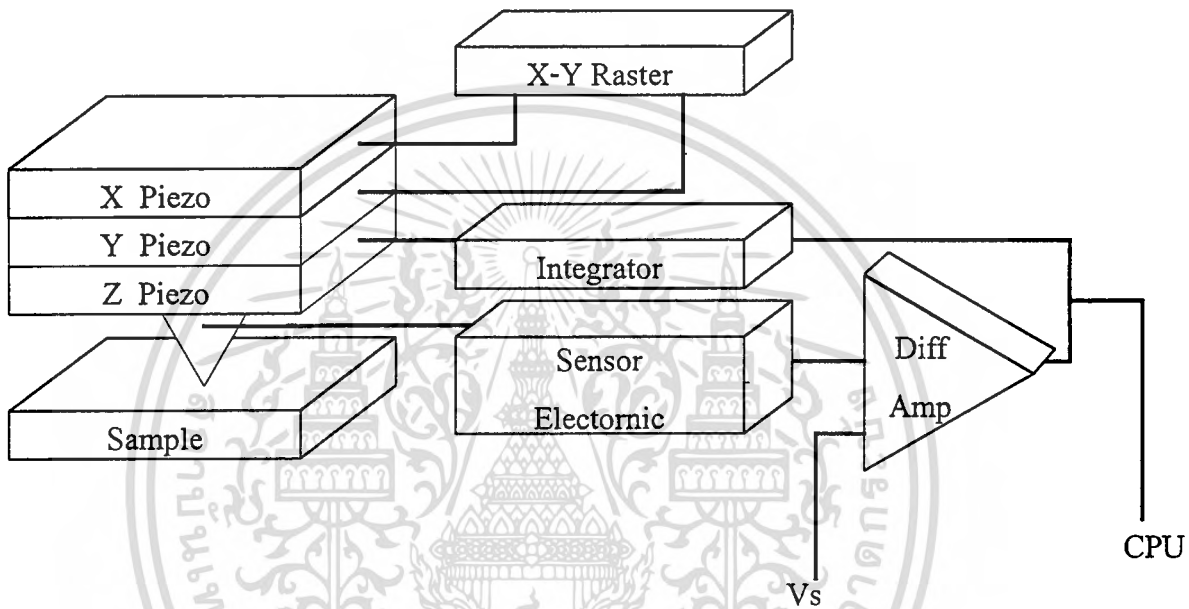


รูปที่ 4.6 วงจรป้อนกลับ (Feedback circuit) ของ AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

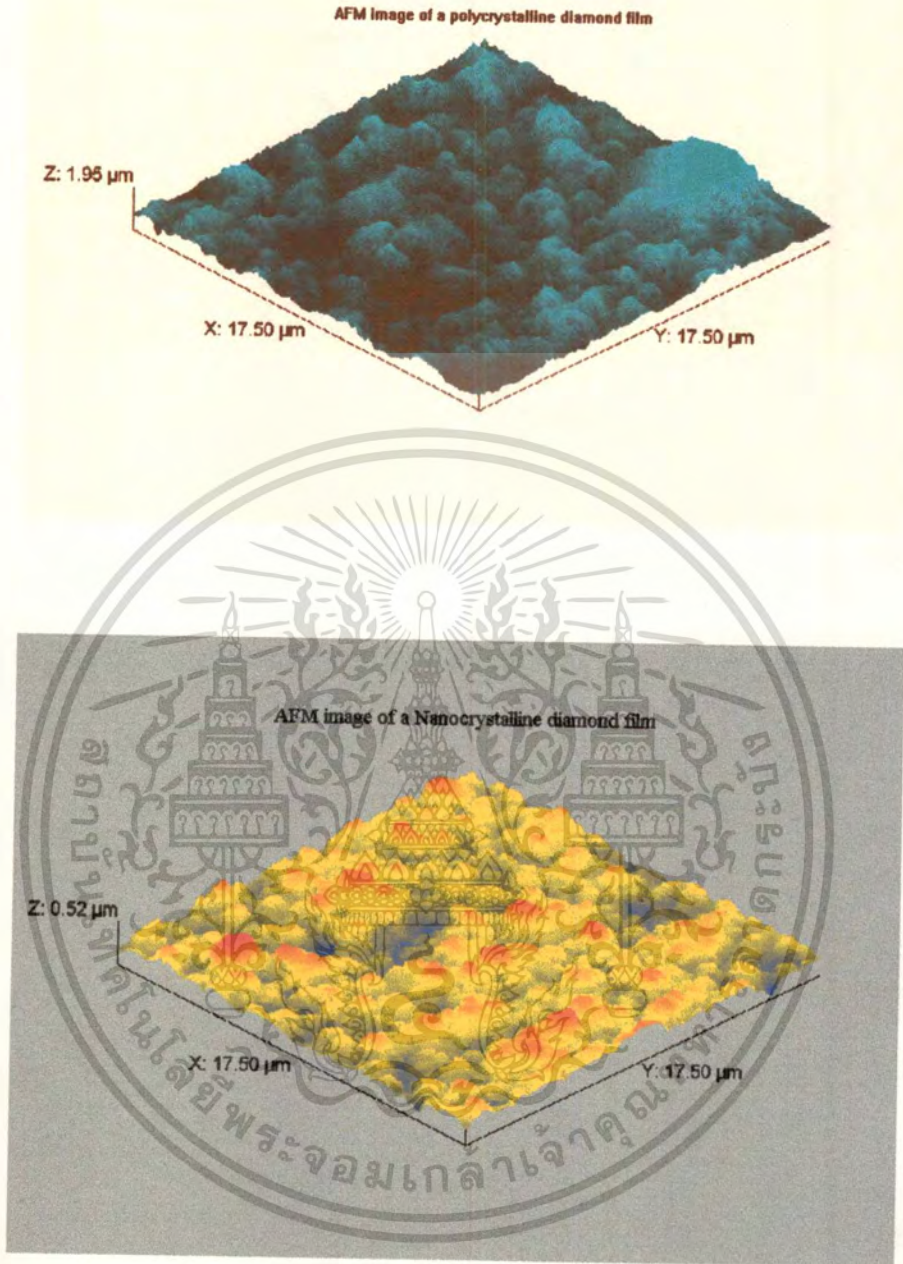
เมื่อเซนเซอร์เคลื่อนที่เข้าหาพื้นผิวชิ้นงาน สัญญาณของเซนเซอร์จะเพิ่มขึ้น differential amplifier จะเปรียบเทียบค่าที่เพิ่มจากเซนเซอร์กับค่าอ้างอิง (V_s) และได้สัญญาณที่ถูกต้องแปรตาม การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดหรือการเลื่อนเฟสจากการออสซิลเลทของโพรบใกล้ชิ้นงานซึ่งจะไป กระตุ้นเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก จนกระทั่งเซนเซอร์ถูกดึงออกจากพื้นผิว

ระบบของ AFM เป็นดังรูปที่ 4.7 มีการเพิ่มเซรามิกเข้าไปสองชิ้นเพื่อให้เซนเซอร์สแกนได้ ในระนาบ x-y ภาพของพื้นผิวเกิดจากการจับสัญญาณผิดพลาดจากเซนเซอร์เหนือพื้นผิวและ สัญญาณจาก piezodriver ที่รวบรวมจากคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.7 แผนภาพของ Scanning Probe Microscope (SPM)

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความเรียบและความหนาของฟิล์มได้อย่างแม่นยำ โดยเสนอภาพเป็นแบบสามมิติแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.8 ดังนี้ เป็นการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรในการเกิดเป็น Polycrystalline diamond film และ Nanocrystalline diamond film



รูปที่ 4.8 ภาพสามมิติจากการวิเคราะห์ด้วย AFM

4.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) จะใช้พื้นฐานจาก “Bragg’s diffraction law” ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการง่ายๆ ได้ดังสมการ 4.1 โดยคิดว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบใน โครงผลึก ซึ่งสมการของ Bragg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบในโครงผลึก P_1 และ P_2 ที่ขนานกันดังแสดงในรูปที่ 4.9

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

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (4.1)$$

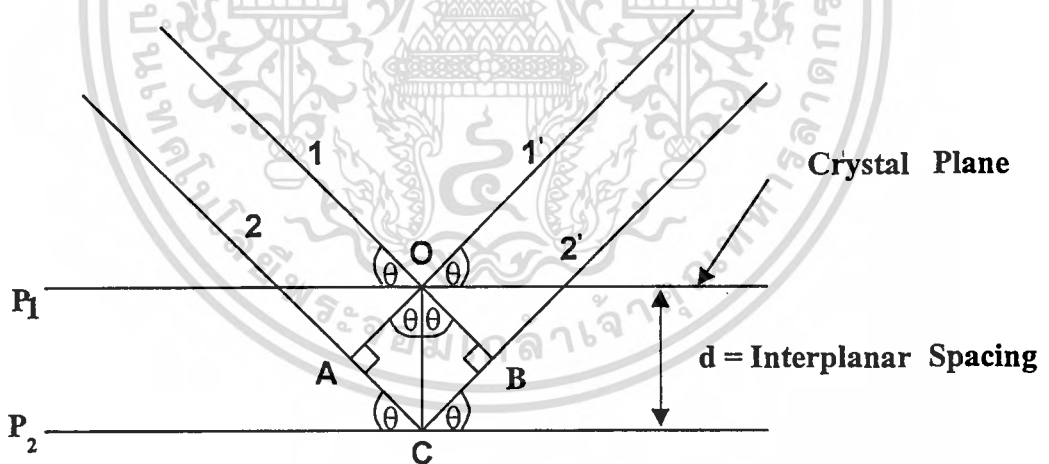
เมื่อ

d = Interplanar spacing

θ = มุม Diffraction

n = ลำดับของการเลี้ยวเบน ($n = 1, 2, 3, \dots$)

λ = ความยาวคลื่น



รูปที่ 4.9 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก

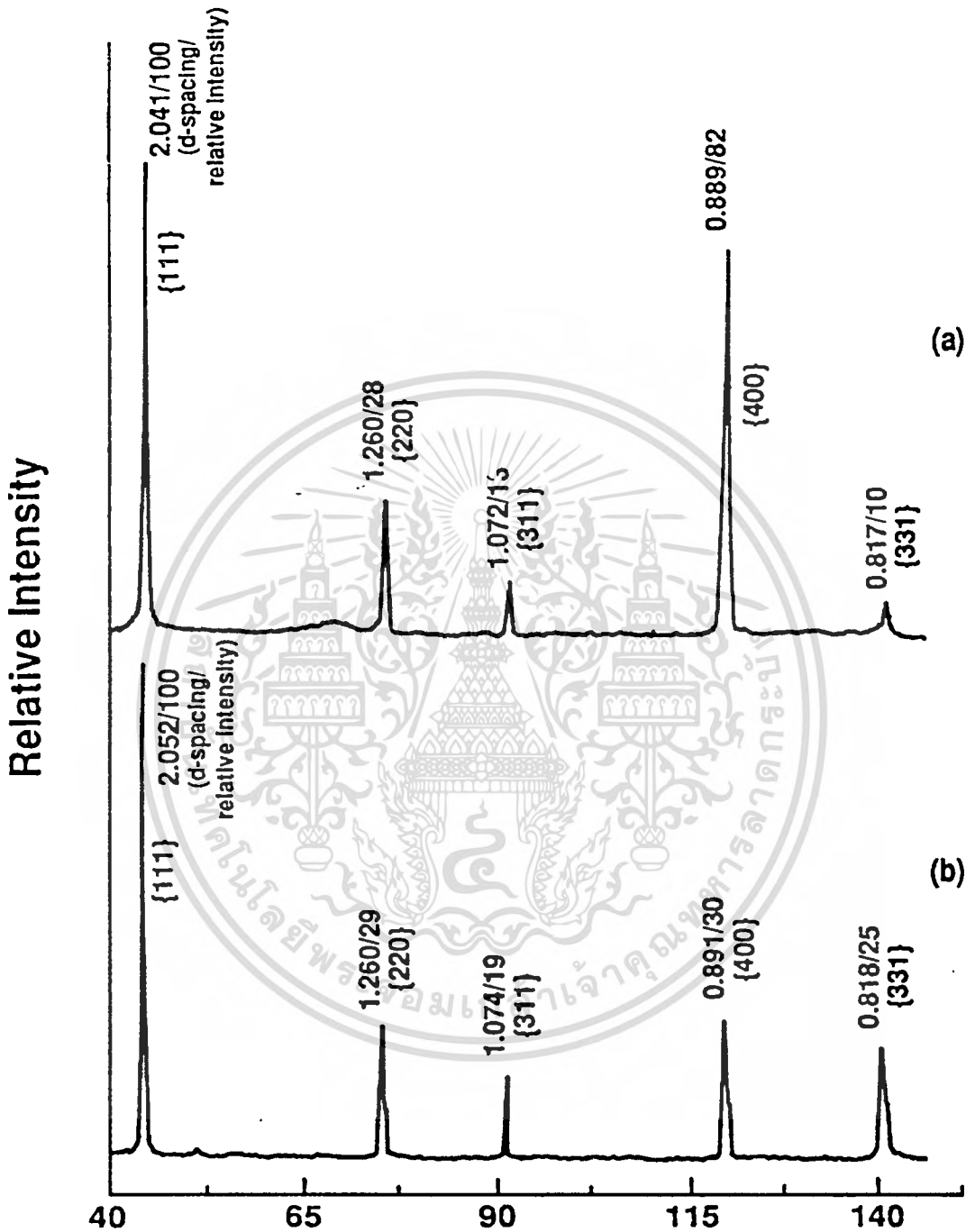
จะเห็นว่าการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จะทำมุม θ กับ Crystal plane และทำมุม 2θ เมื่อเทียบกับลำรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ

สำหรับฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้วัดหาค่าตัวแปรของโครงสร้างผลึกและพิจารณาลักษณะรูปทรงของฟิล์มได้ รูปแบบคุณลักษณะของผลึกรวมของเพชรที่ได้นั้น ผลึกเพชรต้องมีขนาดใหญ่ (ประมาณ 10 nm หรือ มากกว่านั้น) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกของเพชรเป็นแบบ Cubic ซึ่งมีความสมมาตรสูง การคำนวณแฟคเตอร์ของโครงสร้างทำให้ระนาบของการเลี้ยวเบนมีจำนวนน้อย (ระนาบของการเลี้ยวเบนที่ได้ $\{hkl\}$ คือ $\{111\}$, $\{220\}$, $\{311\}$, $\{400\}$, $\{331\}$ และอื่น ๆ โดย h, k, l จะเป็นเลขคู่ทั้งหมดหรือเลขคี่ทั้งหมด และ $h + k + l = 4n$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม) นอกจากนี้ในกรณีที่ระนาบผลึกมีรูปแบบต่าง ๆ กันพบว่า การเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ $\{111\}$ จะมีความแรงสูงสุดและการที่เส้นการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์มีการเลื่อนหรือเกิดแถบกว้างขึ้น เป็นผลมาจากตำหนิหรือขนาดของผลึกที่เล็กเกินไป รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ บนพื้นผิวฟิล์มที่มีระนาบ $\{111\}$ และ $\{100\}$ แสดงได้ในรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นถึงความแตกต่างกันของความเข้มของรูปแบบระนาบของผลึก

Kaac et al. ได้พิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มที่มีลักษณะพื้นผิวแตกต่างกันห้าชนิด เนื่องจากระนาบผลึกที่ขนานกับพื้นผิวฐานรองเท่านั้นที่จะเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้นมา จากการเปรียบเทียบความเข้มของการเลี้ยวเบนของระนาบผลึกที่มีค่าดัชนีหักเหต่อกับความเข้มของการเลี้ยวเบนของผงเพชร ความสัมพันธ์ของความเข้มของยอดที่ได้จากการทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 จากตารางพบว่ามีฟิล์มอยู่สองชนิดคือ ฟิล์ม A และ E มีความแตกต่างของความเข้มการเลี้ยวเบนที่ระนาบ $\{111\}$ กับระนาบอื่น ๆ มากกว่ากรณีของชิ้นงานตัวอย่าง ส่วนในฟิล์ม B ระนาบ $\{400\}$ จะมีความเข้มของการเลี้ยวเบนมากกว่าระนาบ $\{400\}$ ของชิ้นงานตัวอย่าง ดังนั้นฟิล์ม A และ E มีระนาบที่ขนานกับระนาบของการเคลือบเป็น $\{111\}$ และฟิล์ม B ระนาบที่ขนานกันของการเคลือบจะเป็นระนาบ $\{100\}$ ซึ่งผลดังกล่าวสามารถยืนยันได้ด้วยการดูลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรจาก SEM

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของยอดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกในฟิล์มเพชร

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



รูปที่ 4.10 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

(a) บนระนาบ {100} และ

(b) บนระนาบ {111}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ค่า Interplanar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Interplanar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติ (ASTM6-675)

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

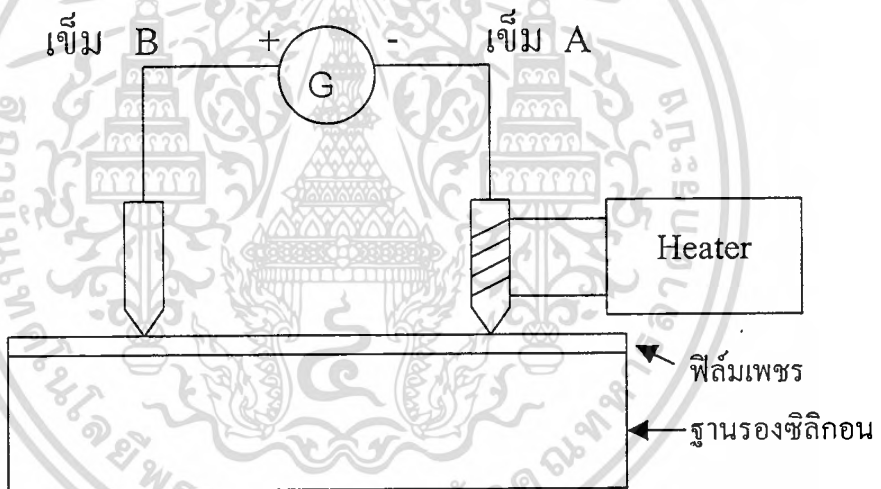
4.4 การวิเคราะห์ด้วย Seebeck effect

ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการทำให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่ปลายด้านหนึ่งซึ่งทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามแท่งวัสดุความร้อน และพบว่ามีปรากฏการณ์เกิดขึ้นคือมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุพาหะ เนื่องจากความเข้มของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความเข้มข้นของประจุพาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะในแนววัสดุขึ้น จากหลักการดังกล่าวจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรว่ามีพาหะหลักชนิดใด การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าวจะใช้อุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเข็ม 2 เล่ม จี๊ดคบนฟิล์มเพชรโดยเข็ม A ทำหน้าที่เป็นเข็มร้อน มีลวดทั้งสแตนพินอยู่โดยรอบ ส่วนเข็ม B ทำหน้าที่เป็นเข็มเย็นที่อุณหภูมิห้อง นำกัลวานอมิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกของกัลวานอมิเตอร์ต่อกับเข็ม B และที่ขั้วลบต่อกับเข็ม A เมื่อให้ความร้อนกับเข็ม A ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Seebeck effect

กัลวานอมิเตอร์	ชนิดประจุพาหะ
บวก	โฮล
ลบ	อิเล็กตรอน
ศูนย์	โฮล เท่ากับ อิเล็กตรอน

จากตารางที่ 4.4 นี้อธิบายได้ดังนี้ เมื่อประจุพาหะที่ปลายเข็มร้อนเคลื่อนที่แพร่ไปยังเข็มเย็น ซึ่งจะมีทั้งประจุพาหะส่วนมากและส่วนน้อยกัลวานอมิเตอร์จะแสดงผลของกระแสที่ไหลผ่านว่าประจุพาหะส่วนมากเป็นพาหะชนิดบวกหรือลบ เมื่อเป็นประจุพาหะโฮลซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกเคลื่อนที่ไปยังเข็มเย็นจะทำให้กัลวานอมิเตอร์ชี้ตำแหน่งบวก และเมื่อเป็นอิเล็กตรอนซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเคลื่อนที่ไปยังเข็มเย็นจะทำให้กัลวานอมิเตอร์ชี้ตำแหน่งลบ จึงสามารถสรุปได้ว่าประจุพาหะส่วนมากเป็นชนิดใด



รูปที่ 4.11 ภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วยปรากฏการณ์ Seebeck

4.5 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและแกรไฟต์สูง แม้ว่าจะมีแกรไฟต์เพียงเล็กน้อยก็ตามเนื่องจากประสิทธิภาพการกระเจิงของแกรไฟต์มีค่ามากกว่าของเพชรมาก ตำแหน่งและความกว้างของยอดกราฟจาก Raman spectrum จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่วิเคราะห์ได้

หลักการพื้นฐานของ Raman spectroscopy คือใช้การสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสารหรือผิวหนังของผลึก ทำให้สามารถแยกความแตกต่างของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนได้ การทำงานของ Raman spectroscope อาศัยปรากฏการณ์การกระเจิงทางแสง โดยหลักการของปรากฏการณ์ดังกล่าวคือการวัดการลดลงของความเข้มของลำแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน ผลของ Raman จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การกระเจิงของโมเลกุล ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการชนกันระหว่างโฟตอนกับการสั่นของโครงผลึกหรือโฟนอน ทำให้เกิดคู่ของโฟตอนและโฟนอน สนามไฟฟ้าของความเข้มลำแสงเป็นตัวบังคับให้แสงมีคลื่นไปทางเดียวในผลึก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Polarizability ดังสมการ

$$P = \alpha E \quad (4.2)$$

โดยที่ P คือ โมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

E คือ สนามไฟฟ้า

α คือ Polarizability

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

$$P = E_0 \alpha_0 \cos(2\pi \nu_0 t) + \frac{1}{2} E_0 \sum \alpha_n \left\{ \cos 2\pi(\nu_0 - \nu_n)t + \cos 2\pi(\nu_0 + \nu_n)t \right\} \quad (4.3)$$

โดยที่ E_0 คือ สนามไฟฟ้าของลำแสงที่ตกกระทบ

t คือ เวลา

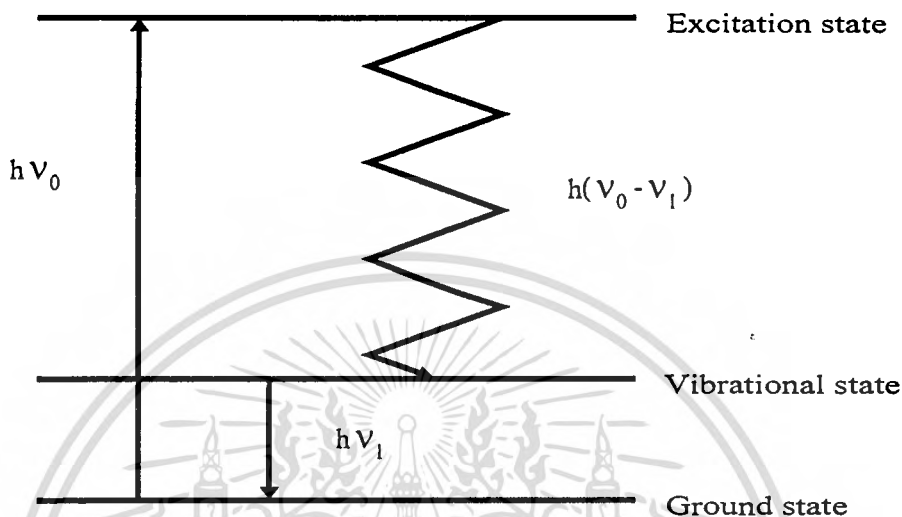
ν_0 คือ ความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ

ν_n คือ ความถี่ของโฟนอน

α_n คือ Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

ปรากฏการณ์ “Stokes scattering” เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำแสง ทำให้เกิดการสั่นของโครงผลึกขึ้น ขณะที่ปรากฏการณ์ “Anti-stokes scattering” เกิดจากการทำลายของควมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนที่กระตุ้นการสั่น โหมดของการสั่นจะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman spectrum สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็งได้เป็นอย่างดี

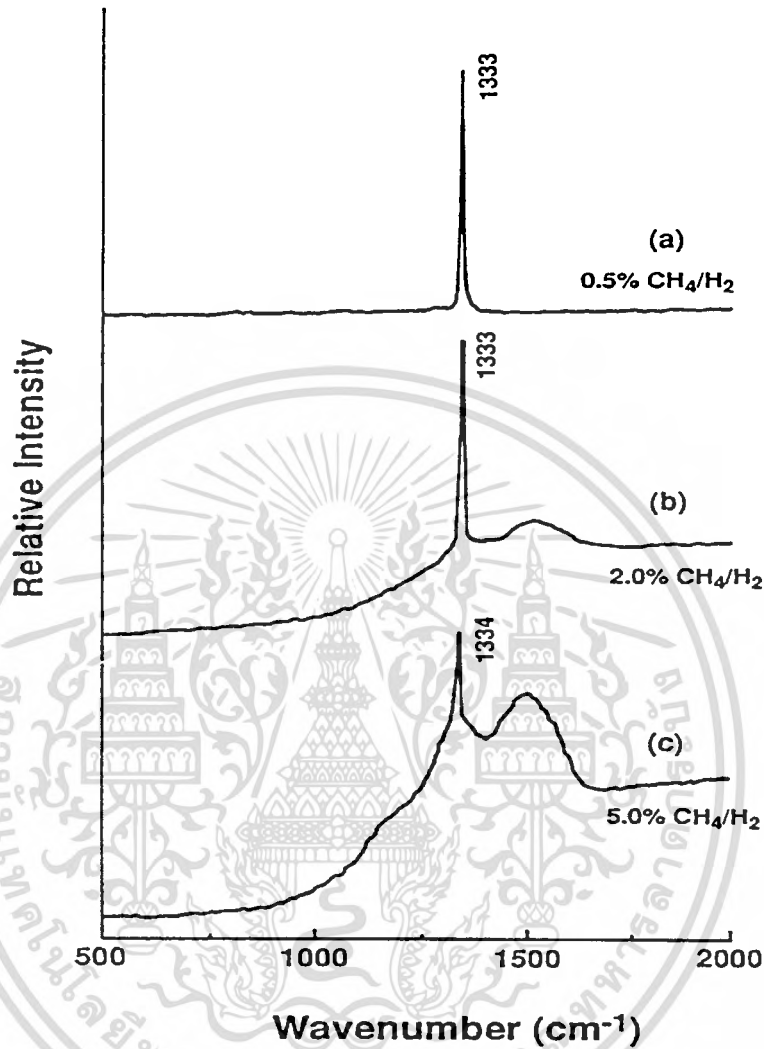


รูปที่ 4.12 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงการเกิดปรากฏการณ์ Raman scattering เมื่อยิงลำแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในชิ้นงานตัวอย่าง โฟตอนจากลำแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน $h\nu_0$ จะเข้าไปอิเล็กตรอนของอะตอมชิ้นงานตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานไปบางส่วน ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเกิดการกระโดดเข้าไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า “สถานะกระตุ้น” (Excitation state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงตกกลับมาสู่สถานะเดิม โดยมีการคายพลังงานออกมามีค่า $h(\nu_0 - \nu_1)$ ส่วนพลังงานที่สูญเสียไปคือ $h\nu_1$ ถูกใช้สำหรับทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงสร้างผลึก โดยพลังงาน $h\nu_1$ ที่สูญเสียไปนี้อยู่ในย่านอินฟราเรด พลังงานที่เหลือ $h(\nu_0 - \nu_1)$ ก็คือพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั่นเอง สำหรับสเปกตรัมของแสง ที่ได้ จะถูกเรียกว่า “Stoke line”

จากการใช้ Raman spectroscope ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร แกรไฟต์ ออสถูนาคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอน แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.5 นอกจากนี้สามารถใช้ Raman spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่าง ๆ กันเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น รูปที่ 4.13 แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่าง ๆ กันคือ (a) 0.5 % CH_4/H_2 (b) 2 % CH_4/H_2 และ (c) 5 % CH_4/H_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่าง ๆ กัน

- (a) 0.5 % CH₄ / H₂
- (b) 2 % CH₄ / H₂ และ
- (c) 5 % CH₄ / H₂

รูปที่ 4.13 (a) สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1,332 cm⁻¹ ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 4.13 (b) พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1,332 cm⁻¹ เริ่มกว้างขึ้น และเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ 1,500 cm⁻¹ อันเป็นตำแหน่งของคาร์บอนอสัณฐาน หรือ DLC แสดงว่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมีคาร์บอนอสัณฐาน หรือ DLC เจือปนอยู่ สำหรับสเปกตรัมของรูป 4.13 c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ $1,332\text{ cm}^{-1}$ ลดลงอย่างมากและมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ $1,334\text{ cm}^{-1}$ ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ $1,500\text{ cm}^{-1}$ เริ่มมียอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมีคาร์บอนอสัณฐาน หรือ DLC เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขการสร้างที่ใช้ทั้งหมด นอกจากนี้ข้อสังเกตที่สำคัญจากการเปรียบเทียบสเปกตรัมที่แตกต่างกัน พบว่าลักษณะสำคัญของพันธะแบบ sp^3 ของเพชร เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำกว่า $1,332\text{ cm}^{-1}$ ในขณะที่ยอดที่เกิดจากพันธะแบบ sp^2 ของแกรไฟต์เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความถี่สูงกว่า $1,332\text{ cm}^{-1}$ อันเป็นผลเนื่องมาจากพันธะระหว่าง sp^2 ของอะตอมคาร์บอน มีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะแบบ sp^3

ตารางที่ 4.5 แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน

Peak position	Type of carbon	Description
$\sim 1,140\text{ cm}^{-1}$	Small size ($< 0.1\ \mu\text{m}$) cubic diamond	Occasionally observed in diamond films with very small grain sizes ($< 0.1\ \mu\text{m}$)
$1,315\text{-}1,326\text{ cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	Broad band, Observed in shock wave produced diamond
$1,332\text{ cm}^{-1}$	Cubic diamond	First order peak with FWHM of 1.9 cm^{-1} for natural diamond
$1,345\text{ cm}^{-1}$	Amorphous carbon	Broad band. It becomes a shoulder of the 1550 cm^{-1} band when the material is hydrogenated
$1,355\text{ cm}^{-1}$	Microcrystalline graphite	Observed in materials with small grain sizes
$1,550\text{ cm}^{-1}$	Amorphous or DLC	Broad band
$1,580\text{ cm}^{-1}$	Graphite	First order peak
$2,458\text{ cm}^{-1}$	Cubic diamond	Second order peak
$2,710\text{ cm}^{-1}$	Microcrystalline graphite	Second order peak
$3,240\text{ cm}^{-1}$	Graphite	Second order peak

นอกจากนี้ Raman spectroscopy ยังมีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์หาปริมาณความสัมพันธ์ของพันธะ sp^3 กับพันธะ sp^2 โดยหากทราบความแรงของการกระเจิงสัมพันธ์ก็สามารถพิจารณาหาจำนวนสัมพันธ์ขององค์ประกอบของเพชรและแกรไฟต์ในฟิล์มเพชรที่ได้จากการสร้างด้วยวิธี CVD ได้ หรืออีกทางหนึ่งแกรไฟต์จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีขาวยาว แต่ในเพชรจะไม่มี การดูดกลืน ทำให้แสงสามารถผ่านเพชรได้ตลอด ดังนั้นถ้าหากฟิล์มมีแกรไฟต์เจือปนอยู่แสงที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารจะไม่ใช่ระเบียบ ปกติแล้วบริเวณที่มีการดูดกลืนจะวัดได้เฉพาะผิวหน้าเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นและขนาดของผลึกมีผลสำคัญต่อ Raman spectrum ที่ได้ สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ผลจากขนาดของผลึกสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบของ Microcrystalline graphite เจือปน แต่ถ้าฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างที่ไม่เหมาะสม เช่น ความเข้มข้นของ CH_4 / H_2 มีค่ามากกว่า 20 % ขนาดของผลึกเพชรจะมีผลต่อการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์ม สรุปได้ว่าการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มเพชรจากเปอร์เซ็นต์สัมพันธ์ของพันธะแบบ sp^3 และ sp^2 จึงมีความสำคัญและรวมถึงขนาดของผลึกเพชรที่บริเวณ sp^2 ก็มีความสำคัญเช่นกัน



บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation นั้นได้นำเสนอประวัติความเป็นมา ทฤษฎีของเทคนิค CVD รวมทั้งวิธีสังเคราะห์ไว้แล้วนั้น โดยการศึกษาการเกิดของผลึกเพชร และการเกิดอย่างต่อเนื่องของผลึกเพชรจนเกิดเป็นฟิล์มเพชร เริ่มจากศึกษาอัตราการโตของผลึก เพชรบนฐานรองซิลิกอนขัดมัน ตลอดจนการหาเงื่อนไขการเกิดของผลึกซึ่งแตกต่างจากการเกิด ของผลึกเพชรบนฐานรองที่มีการเตรียมจากการขัดด้วยครีမ်เพชร และการอุลตราโซนิกในผงเพชร ซึ่งจะแสดงผลการสังเคราะห์ด้วย ความหนาของฟิล์ม และอัตราการโตของฟิล์ม ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ ทำการสังเคราะห์นั้นได้มีการเลือกตามความเหมาะสมดังได้กล่าวไว้แล้วจะทำการใช้ชุดเครื่องมือที่ สังเคราะห์ขั้นนี้ในการสังเคราะห์ เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดจะทำการสังเคราะห์ฟิล์มและนำไป วิเคราะห์ด้วย SEM , Raman spectroscopy , AFM และ XRD แล้วจึงนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติ ทางไฟฟ้าต่อไป การทดลองมีเงื่อนไขโดยรวมดังนี้

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการสังเคราะห์โดยรวม

เงื่อนไข	การทดลอง
ความดัน	บรรยากาศ
แหล่งจ่ายก๊าซ	อัตราส่วนโดยปริมาตรก๊าซออกซิเจนกับก๊าซอะเซทิลีนระหว่าง 0.70–0.95
- ออกซิเจน	ก๊าซออกซิเจน 99.5 % อัตราการไหล 140–950 cc/min
- อะเซทิลีน	ก๊าซอะเซทิลีน 99.95 % อัตราการไหล 200–1,000 cc/min
ขนาดหัวทิฟ	75 100 140 และ 200
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดมัน ซิลิกอนขัดด้วยครีမ်เพชร และซิลิกอนอุลตราโซนิกในผงเพชร
อุณหภูมิฐานรอง	500–1,350 °C
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง และเปลวไฟชั้นนอก
เวลาในการทดลอง	10–30 นาที

การเตรียมฐานรองซีลิกอนขัดมัน ซีลิกอนขัดด้วยครีมเพชร และซีลิกอนอุตสาหกรรมในผงเพชร โดยมีลักษณะจากการเตรียมดังนี้



(b) ซีลิกอนอุตสาหกรรมในผงเพชร

รูปที่ 5.1 ลักษณะผิวที่ใช้ในการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 การทดลองสังเคราะห์ผลึกเพชร

การสังเคราะห์ผลึกเพชร เพื่อหาเงื่อนไขและขอบเขตในการสังเคราะห์ โดยศึกษาเงื่อนไขต่อไปนี้

5.1.1 ตำแหน่งของเปลวไฟ

การสังเคราะห์ผลึกเพชรนั้นจากรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคคาร์บอนจะมีความสำคัญ ฉะนั้นการเลือกบริเวณเปลวการเผาไหม้ของอัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซน้อยกว่า 1 หรือ 0.70–0.95 จะปรากฏเปลวไฟขึ้นสามเปลวดังได้กล่าวไว้แล้วนั้น เลือกการสังเคราะห์ด้วยเปลวไฟที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซที่ 0.95 เมื่อพิจารณาพบว่าจะมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้งเปลวชั้นไฟกลางและเปลวไฟชั้นนอก จึงทำการสังเคราะห์ที่ตำแหน่งเปลวไฟทั้งสองด้วยเงื่อนไขดังตารางที่ 5.2

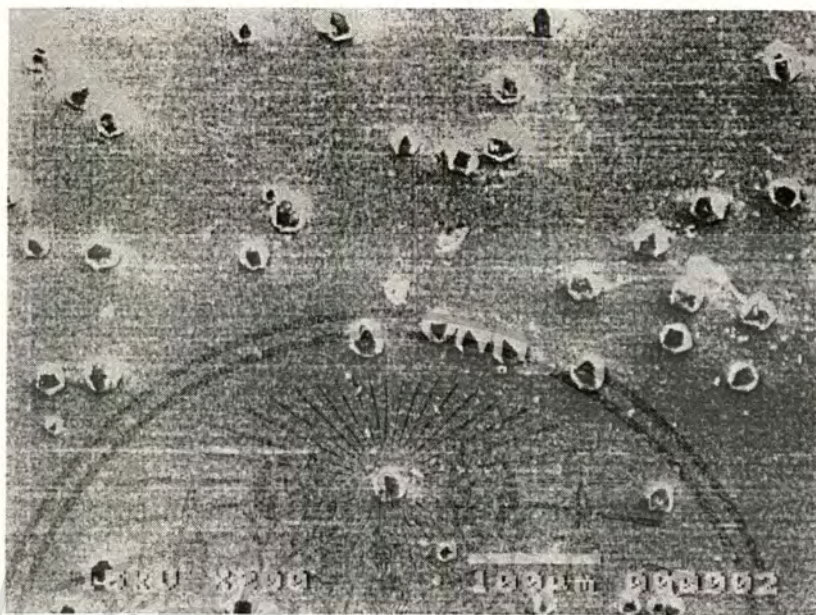
ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ตำแหน่งเปลวไฟค่าต่าง ๆ

เงื่อนไข	A	B
ความดัน	ในบรรยากาศ	
อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ	0.95	
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	270	
อัตราการไหลก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	300	
ขนาดหัวทิพ	100	
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดมัน	
อุณหภูมิฐานรอง (°C)	800	
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง	เปลวไฟชั้นนอก
เวลาในการทดลอง (min)	10	

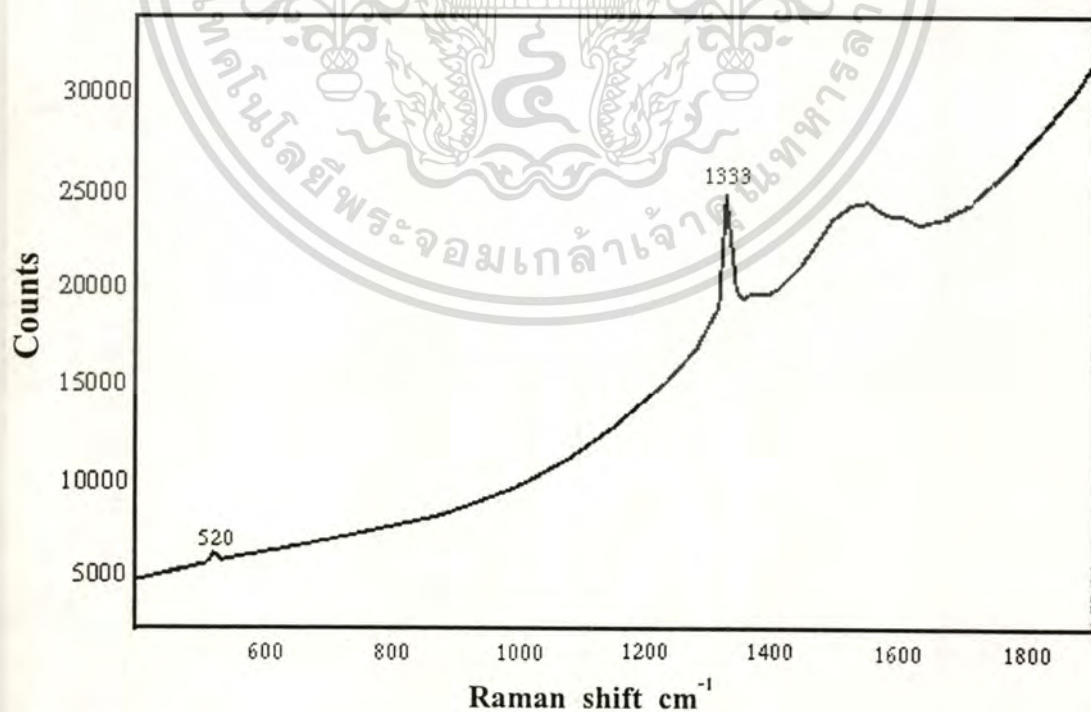
การสังเคราะห์ให้ผลดังนี้คือตัวอย่าง A จะมีผลึกเพชรเกิดขึ้นในลักษณะกระจายเป็นบริเวณประมาณเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลวไฟชั้นใน ซึ่งผลการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 5.2 ผลึกเพชรที่ได้มีขนาดประมาณ 15 μm และนำผลึกเพชรไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 5.3 จะพบว่ายอดของ Raman shift มีสองค่าคือ ยอดแรกมีค่า 520 cm^{-1} จะเป็นยอดของฐานรองซิลิกอนเนื่องจากขนาดของผลึกมีขนาดเล็กทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$1,333\text{ cm}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.5 จะมียอดของผลึกเพชรที่ $1,332\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงและเป็นที่ยอมรับว่าเป็นเพชร แต่กราฟรูปที่ 5.3 จะมีส่วนประกอบของแกรไฟต์ประกอบอยู่ด้วยในช่วง $1,550\text{-}1,580\text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 5.2 ผลึกเพชรจากเปลวไฟชั้นกลาง



รูปที่ 5.3 การวิเคราะห์ผลึกเพชรที่สังเคราะห์บริเวณเปลวไฟชั้นกลางด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าเกิดผลึกเพชรแล้วจากตัวอย่าง A ส่วนของตัวอย่าง B ทำการสังเคราะห์ที่เปลวไฟชั้นนอกจะไม่เกิดผลึกเพชร แกรไฟต์ หรือ DLC ขึ้นแต่อย่างใด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่บริเวณเปลวไฟชั้นในเท่านั้นที่เป็นบริเวณที่สามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรได้เท่านั้น สามารถอธิบายได้ว่าการเกิดของผลึกเพชรจะขึ้นกับปัจจัยของก๊าซในบริเวณเปลวไฟชั้นกลางเท่านั้น ซึ่งก๊าซที่บริเวณเปลวไฟชั้นกลางจะมีอนุภาคมูลฐานหรือจากอัตราส่วนการเผาไหม้ เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.2.1 พบว่าในเปลวไฟชั้นกลางจะมี C_2^* , CH^* และ OH^* โดย C_2^* เป็นตัวแปรสำคัญของกระบวนการสังเคราะห์

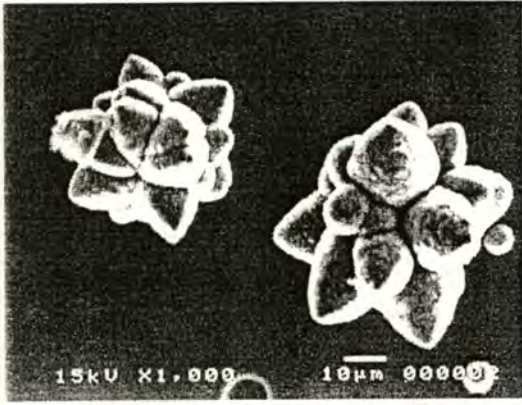
5.1.2 อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างก๊าซออกซิเจนกับอะเซทิลีน

การสังเคราะห์นี้จะหาอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซที่ให้ทั้งอัตราการโตที่ดีที่สุดและคุณสมบัติที่ดีที่สุดเช่นกัน โดยทำการคุมเงื่อนไขดังตาราง 5.3 อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.70–0.95 ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16

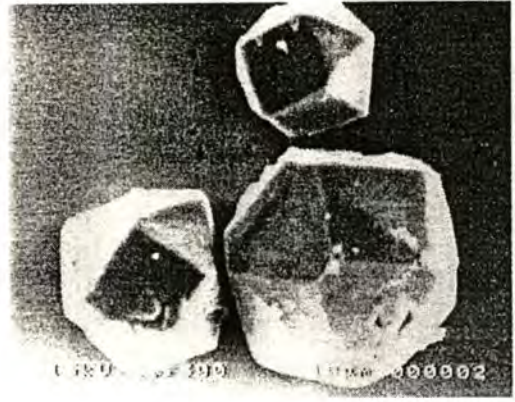
ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซค่าต่าง ๆ

เงื่อนไข	A	B	C	D	E	F
ความดัน	บรรยากาศ					
อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	210	225	240	255	270	285
อัตราการไหลก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	300					
ขนาดหัวทิพ	100					
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดมัน					
อุณหภูมิฐานรอง (°C)	800					
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง					
เวลาในการทดลอง (min)	10					

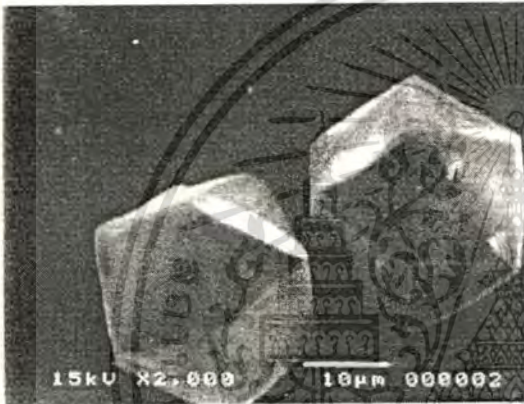
จากการทดลองตัวอย่างชิ้นงาน A, B และ C เปลวไฟที่เห็นจะมีเขม่าและบนฐานรองซิลิกอนขัดมันเกิดทั้งเขม่าและผลึกเพชร ทำให้คุณภาพของฟิล์มเพชรไม่ดีเท่ากับตัวอย่างชิ้นงาน D, E และ F ซึ่งเกิดผลึกเพชรที่ไม่มีเขม่า โดยผลการสังเคราะห์ชิ้นงานทั้งหมดนี้ แสดงดังรูปที่ 5.4



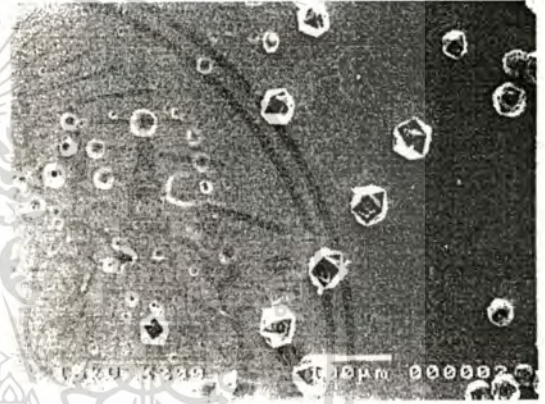
(a) ตัวอย่างชิ้นงานที่ไม่เกิดผลึกเพชร



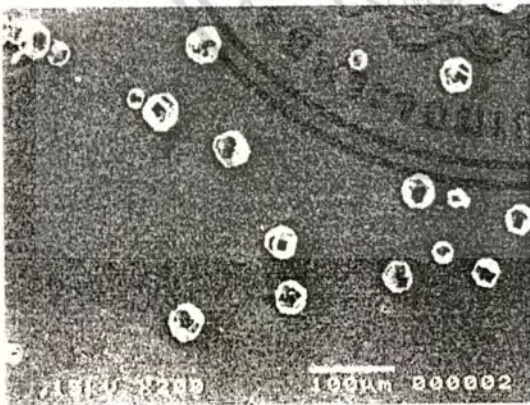
(b) ตัวอย่างชิ้นงาน A-C (0.70-0.80 % vol.)



(c) ตัวอย่างชิ้นงาน D (0.85% vol.)



(d) ตัวอย่างชิ้นงาน E (0.90 % vol.)

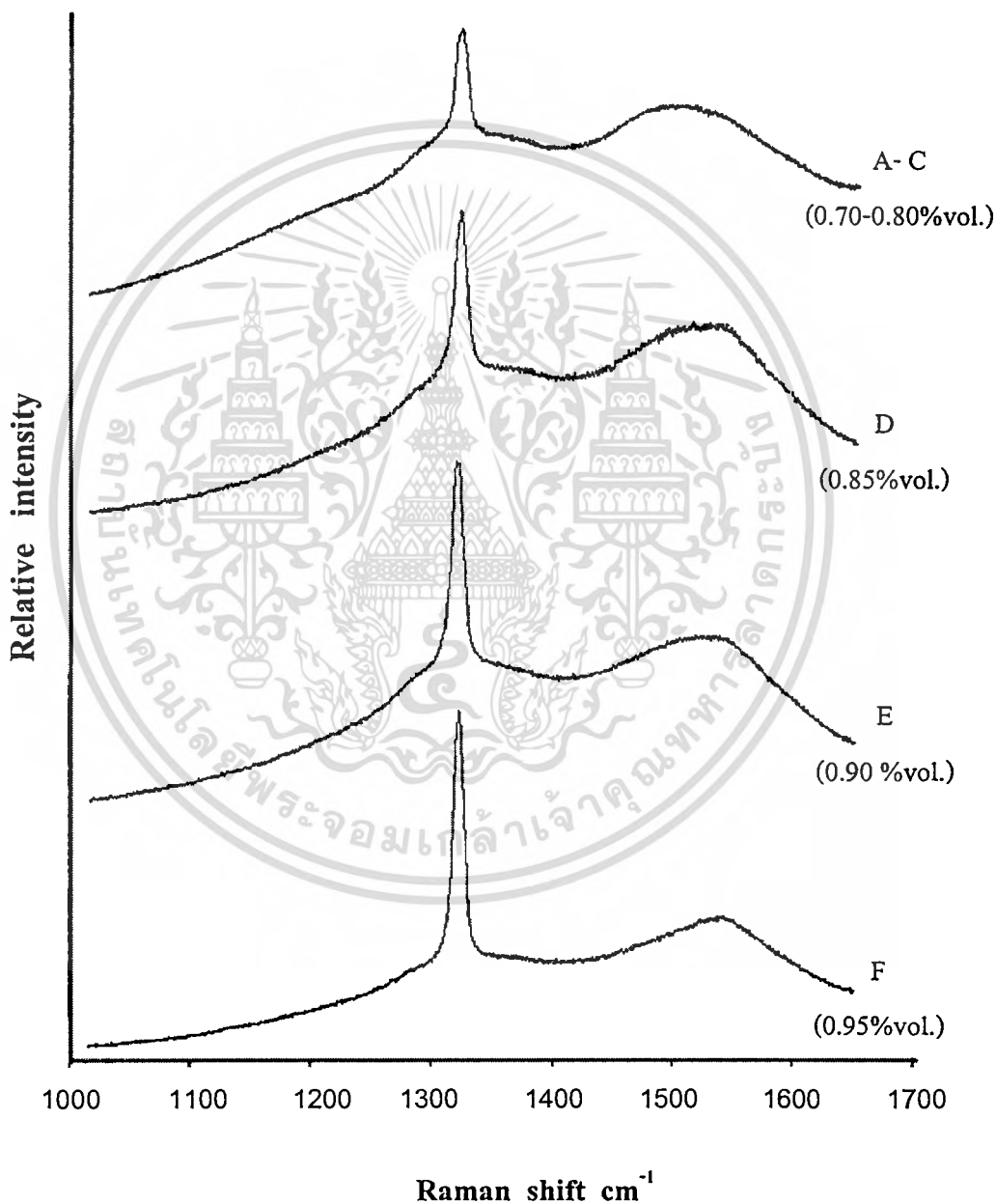


(e) ตัวอย่างชิ้นงาน F (0.95%vol.)

รูปที่ 5.4 ลักษณะผลึกที่สังเคราะห์จากอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการสังเคราะห์พบว่าที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ 0.70–0.80 เกิดเขม่าอย่างมาก เนื่องจากการสังเคราะห์ทำในบรรยากาศเปิด จึงไม่เหมาะสมกับการสังเคราะห์อีกทั้งเมื่อทำการสังเคราะห์แล้วเขม่าจะเกิดบนฐานรองทำให้ความหนาแน่นการนิวเคลียสที่ผิวฐานรองน้อยมากทำให้มีผลึกเกิดขึ้นได้น้อย อัตราส่วนโดยปริมาตรที่ 0.85–0.95 ให้ผลการเกิดที่วิเคราะห์ได้ชัดเจน เมื่อใช้เทคนิค SEM โดยให้อัตราการโตของผลึกใกล้เคียงกันประมาณ 150-170 $\mu\text{m/h}$

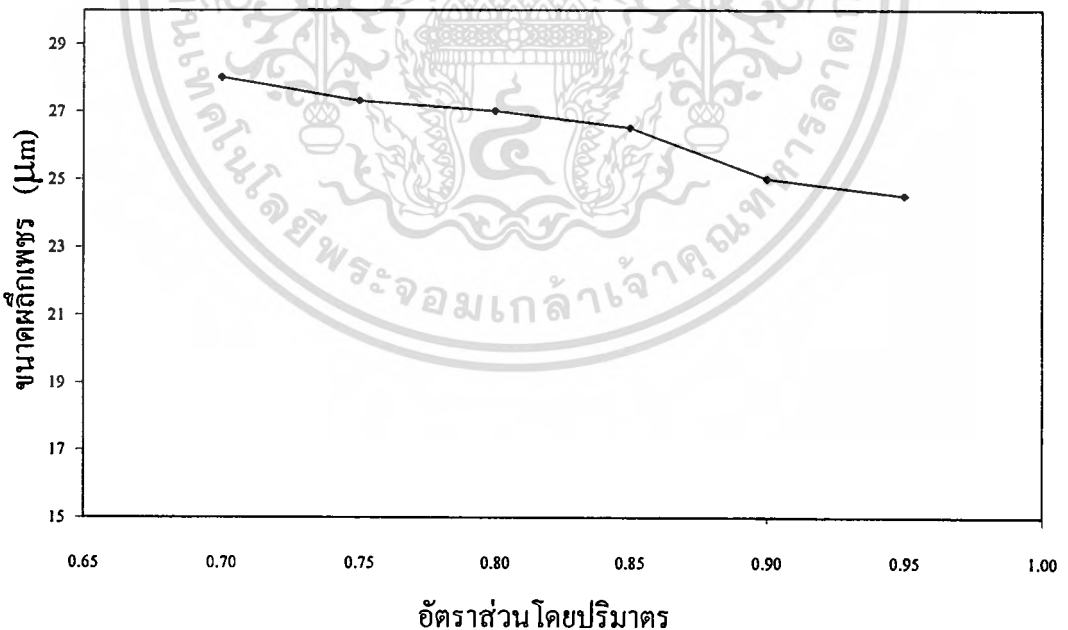


รูปที่ 5.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy แสดงดังรูปที่ 5.5 ผลการสังเคราะห์พบว่าคุณภาพของผลึกเพชรดีขึ้นเมื่ออัตราส่วน โดยปริมาตรระหว่างก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนมีค่ามากขึ้น ผลการสังเคราะห์นี้สรุปได้ว่าการเกิดของผลึกเพชรนั้นจะต้องมีอัตราส่วน โดยปริมาตรของ ไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจนอย่างเหมาะสม แสดงให้เห็นว่าก๊าซออกซิเจนมีส่วนช่วยทำให้คุณภาพผลึกเพชรมีค่าดีขึ้น เนื่องจากออกซิเจนจะช่วยในการกำจัดโครงสร้างคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชร และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น โดยออกซิเจนในรูปของ OH* สามารถกระตุ้นการเกิดของผลึกเพชรที่บริเวณผิวได้ดังสมการ 2.2 โดยทำหน้าที่ในการรวมตัวกับไฮโดรเจนซึ่งเป็นพันธะแบบ sp^3 กับอะตอมคาร์บอนให้เกิดเป็นน้ำและทำให้อะตอมคาร์บอนเกิดพันธะกับอะตอมคาร์บอนข้างเคียงเป็นแบบ sp^3 จึงเกิดเป็นผลึกเพชรที่มีคุณภาพที่ดี

จากอัตราการโตของผลึกแล้วส่วนที่สำคัญคือคุณภาพของการสังเคราะห์จากการวิเคราะห์จะพบว่าที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซ 0.95 จะให้คุณภาพผลึกที่ดีที่สุดสังเกตจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy และที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซ 0.85 จะมีอัตราการโตที่สูงที่สุดสังเกตจากขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แต่อัตราการเกิดของแต่ละอัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซจากการสังเคราะห์ก็มีค่าใกล้เคียงกันจึงเลือกคุณภาพเป็นหลัก เมื่อพิจารณาแล้วสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการโตกับอัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซได้ดังนี้



รูปที่ 5.6 แผนภาพขนาดผลึกที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซค่าต่าง ๆ

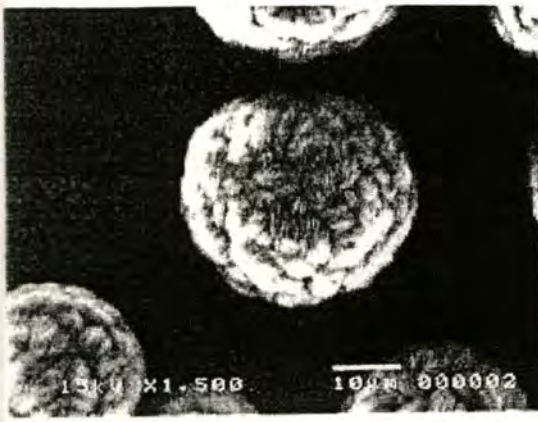
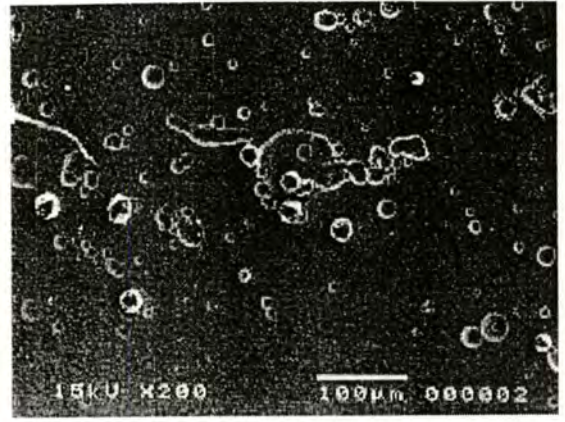
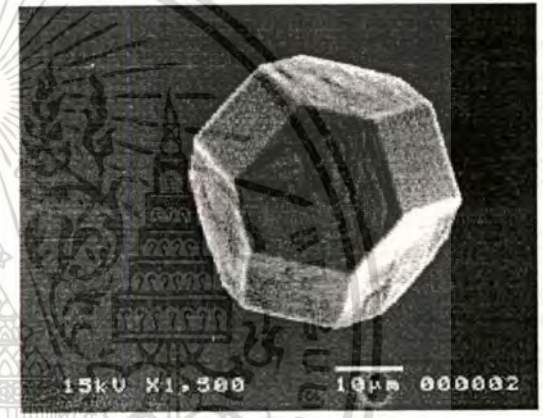
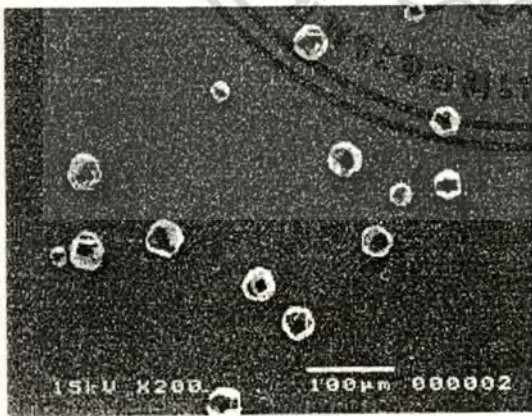
5.1.3 อุณหภูมิฐานรอง

จากการสังเคราะห์ที่ผ่านมาและจากรูปที่ 2.20 นั้นจะเป็นได้ว่าขอบเขตการสังเคราะห์ผลึกเพชรจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิฐานรองระหว่าง $500-1,200^{\circ}\text{C}$ จึงทำการสังเคราะห์ผลึกเพชรบนฐานรองที่อุณหภูมิของฐานรองต่าง ๆ ดังตาราง 5.4

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ

เงื่อนไข	A	B	C	D	E
ความดัน	บรรยากาศ				
อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ	0.95				
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	285				
อัตราการไหลก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	300				
ขนาดหัวทิฟ	100				
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดมัน				
อุณหภูมิฐานรอง ($^{\circ}\text{C}$)	500	560	1,000	1,330	1,350
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง				
เวลาในการทดลอง (min)	10				

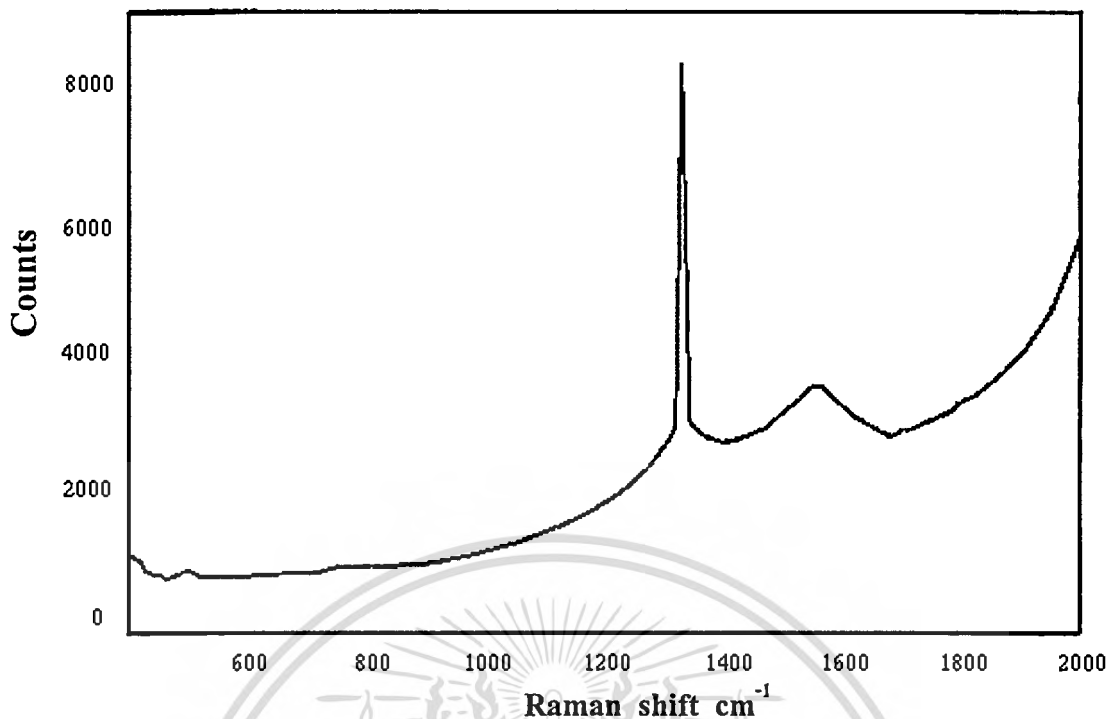
จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิระหว่าง $500-1,350^{\circ}\text{C}$ สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของฐานรองจะมีอัตราการโตของผลึกเพิ่มขึ้น อุณหภูมิฐานรองที่เกิดผลึกเพชรระหว่าง $560-1,330^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิที่ค่าประมาณ 500°C จะไม่เกิดเป็นผลึกเพชรแต่จะเป็นในรูปของ แกรไฟต์กับเขม่าคาร์บอน และที่อุณหภูมิฐานรองที่มากกว่า $1,350^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการหลอมของฐานรองซิลิกอนเนื่องจากความร้อนจากเปลวไฟของก๊าซชั้นกลางสูงประมาณ $3,000^{\circ}\text{C}$ เมื่อพิจารณาผลการสังเคราะห์ด้วยรูปถ่ายด้วยเครื่อง SEM เราสามารถทำการประมาณอัตราการโตของเพชรเฉลี่ย $180\ \mu\text{m/h}$ และเมื่อนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 โดยนำเสนอเพียงตัวอย่างเดียวเพราะในช่วงที่เกิดเป็นผลึกเพชร $560-1,330^{\circ}\text{C}$ นั้นให้กราฟในลักษณะเดียวกันเนื่องจากเลือกอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซที่ให้คุณสมบัติที่ดีที่สุด

(a) ตัวอย่างชิ้นงาน A (500°C)(b) ตัวอย่างชิ้นงาน B (560°C)(c) ตัวอย่างชิ้นงาน C ($1,000^{\circ}\text{C}$)(d) ตัวอย่างชิ้นงาน D ($1,330^{\circ}\text{C}$)

(e) ตัวอย่างการกระจายของผลึกเพชร

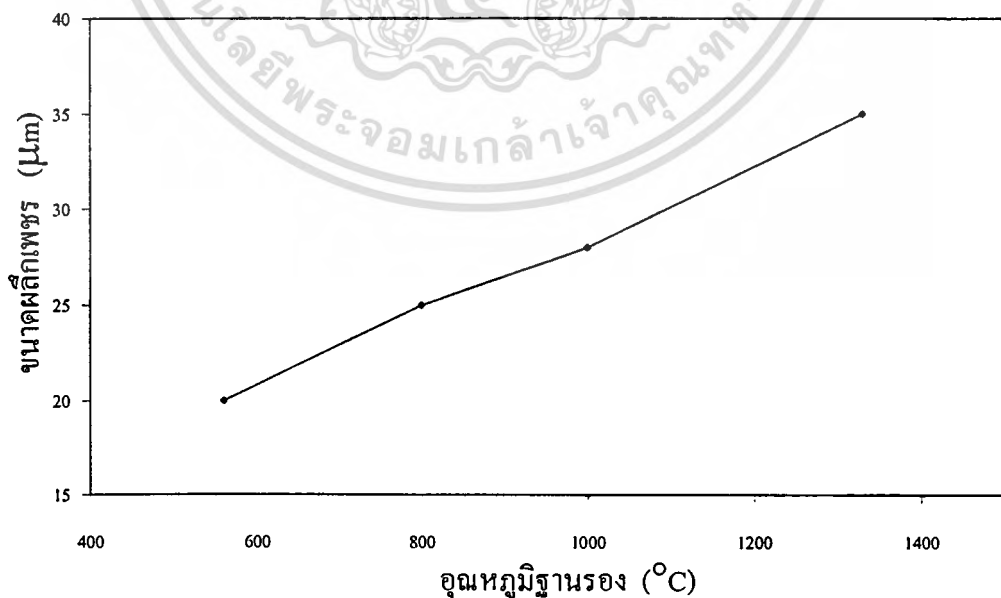
รูปที่ 5.7 ลักษณะผลึกจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ

นำผลการสังเคราะห์เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการโตกับอุณหภูมิของฐานรอง จะได้อัตราการโตสูงสุดที่อุณหภูมิฐานรอง 1,330 °C ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ขนาดของผลึกเพชรที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปการสังเคราะห์ผลึกเพชรได้ดังนี้คือ ใช้เปลวไฟชั้นกลางในการสังเคราะห์ อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซที่มีอัตราโตสูงสุดเท่ากับ 0.85 คุณภาพของผลึกดีที่สุดในอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ 0.95 อัตราการโตเฉลี่ย 180 $\mu\text{m/h}$

5.2 อัตราการเกิดและอัตราการโตของฟิล์มเพชร

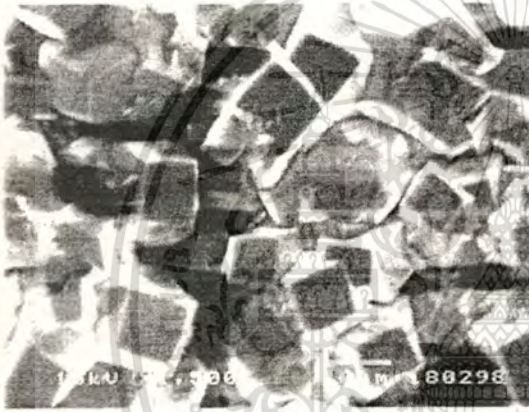
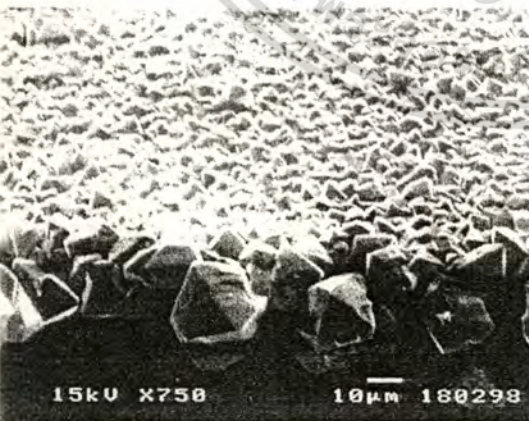
เมื่อสามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรได้แล้วนั้น ในการใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์จะต้องสังเคราะห์ผลึกเพชรจำนวนมากอย่างต่อเนื่องจนเกิดเป็นฟิล์มเพชรขึ้น โดยเพิ่มการนิวคลีเอชันจากการเตรียมพื้นผิวของฐานรองด้วยสองวิธี คือ การขัดด้วยครีมเพชร และการอุลตราโซนิกในผงเพชรแสดงลักษณะพื้นผิวดังรูปที่ 5.1

5.2.1 อุณหภูมิฐานรอง

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค CVD ในทุกวิธีนั้นพบว่าอุณหภูมิฐานรองจะมีผลต่อระนาบของฟิล์มเพชร จึงทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเงื่อนไขดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ

เงื่อนไข	A	B	C	D	E	F	G	H
ความดัน	บรรยากาศ							
อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ	0.95							
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	285							
อัตราการไหลก๊าซอะเซทีลีน (cc/min)	300							
ขนาดหัวทิฟ	100							
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดด้วยครีมเพชรและซิลิกอนอุลตราโซนิกในผงเพชร							
อุณหภูมิฐานรอง ($^{\circ}\text{C}$)	540	560	820	840	880	900	1,040	1,100
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง							
เวลาในการทดลอง (min)	20							

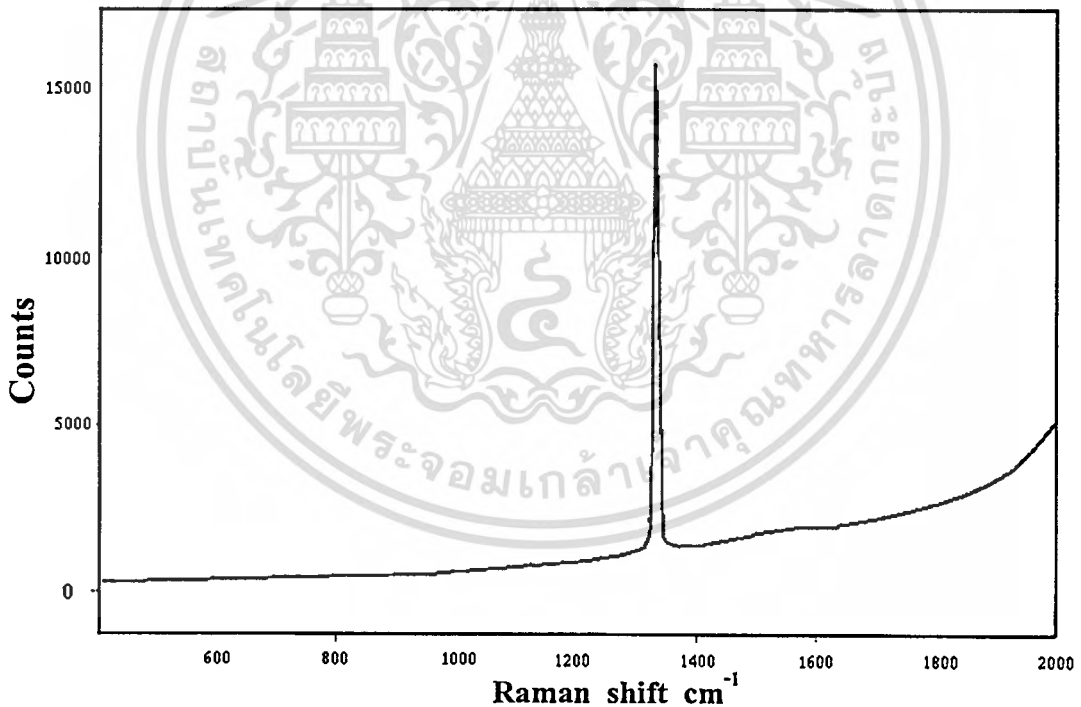
(a) ตัวอย่างชิ้นงาน A (540°C)(b) ตัวอย่างชิ้นงาน B-C ($560-820^{\circ}\text{C}$)(c) ตัวอย่างชิ้นงาน D-E ($840-880^{\circ}\text{C}$)(d) ตัวอย่างชิ้นงาน F-G ($900-1,040^{\circ}\text{C}$)

(e) ตัวอย่างความหนาของฟิล์มเพชร

รูปที่ 5.10 ลักษณะระนาบและความหนาของฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการช่างานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเคราะห์พบว่าอัตราการโตของฐานรองที่เตรียมจากกระบวนการอุตราโซนิกในผงเพชรจะน้อยกว่ากระบวนการขัดด้วยครีมเพชร จึงนำเสนอผลการสังเคราะห์ด้วยฐานรองที่ผ่านกระบวนการขัด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 5.10 พบว่าช่วงอุณหภูมิฐานรองระหว่าง $560-1,040^{\circ}\text{C}$ เท่านั้นที่เกิดเป็นผลึกเพชรซึ่งแตกต่างกันออกไปโดยแบ่งช่วงของการเกิดได้ดังนี้ ที่อุณหภูมิฐานรองต่ำกว่า 540°C หรือตัวอย่าง A จะไม่มีการเกิดของฟิล์มเพชรเกิดขึ้นคงมีเพียงแต่แกรไฟต์เกิดขึ้นช่วงอุณหภูมิฐานรอง $560-820^{\circ}\text{C}$ หรือตัวอย่าง B และ C จะเป็นช่วงการเกิดของฟิล์มระนาบ {111} ช่วงอุณหภูมิฐานรอง $840-880^{\circ}\text{C}$ หรือตัวอย่าง D และ E จะเป็นช่วงการเกิดของฟิล์มระนาบ {100} ช่วงอุณหภูมิฐานรอง $900-1,040^{\circ}\text{C}$ หรือตัวอย่าง F และ G จะเป็นช่วงการเกิดของฟิล์มระนาบรวม และส่วนอุณหภูมิฐานรองสูงกว่า $1,040^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการหลอมละลายของฐานรองซิลิกอน เมื่อนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy แสดงได้ดังรูปที่ 5.11 โดยนำเสนอเพียงตัวอย่างเดียวเพราะในช่วงที่เกิดเป็นผลึกเพชร $560-1,040^{\circ}\text{C}$ นั้นให้กราฟในลักษณะเช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.11 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

เพื่อเป็นการวิเคราะห์ระนาบของฟิล์มเพชรนั้นจะต้องใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาตัวแปรของโครงสร้าง และลักษณะของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นได้ โดยทั่วไปแล้วมักใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบระนาบที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จาก Bragg's law

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

เมื่อทำการทดสอบว่าระนาบที่ได้จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้นเป็นระนาบ {111} {100} และระนาบรวม ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะได้ตัวอย่างชิ้นงานระนาบ {111} {100} และระนาบรวม เป็นดังรูปที่ 5.12, 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ โดยจะนำเสนอตัวอย่างการคำนวณจากการวัดแต่ละชิ้นงานซึ่งให้ยอดกราฟแตกต่างกันแล้วแต่ระนาบที่เกิดขึ้น โดยแต่ละยอดกราฟสามารถหาค่า Interplanar spacing (d) ได้ดังนี้

จากกราฟรูปที่ 5.12 พบว่ามียอดกราฟแรกที่ตำแหน่งมุม 44° นั่นคือ

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

$$\theta = 22^\circ$$

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

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

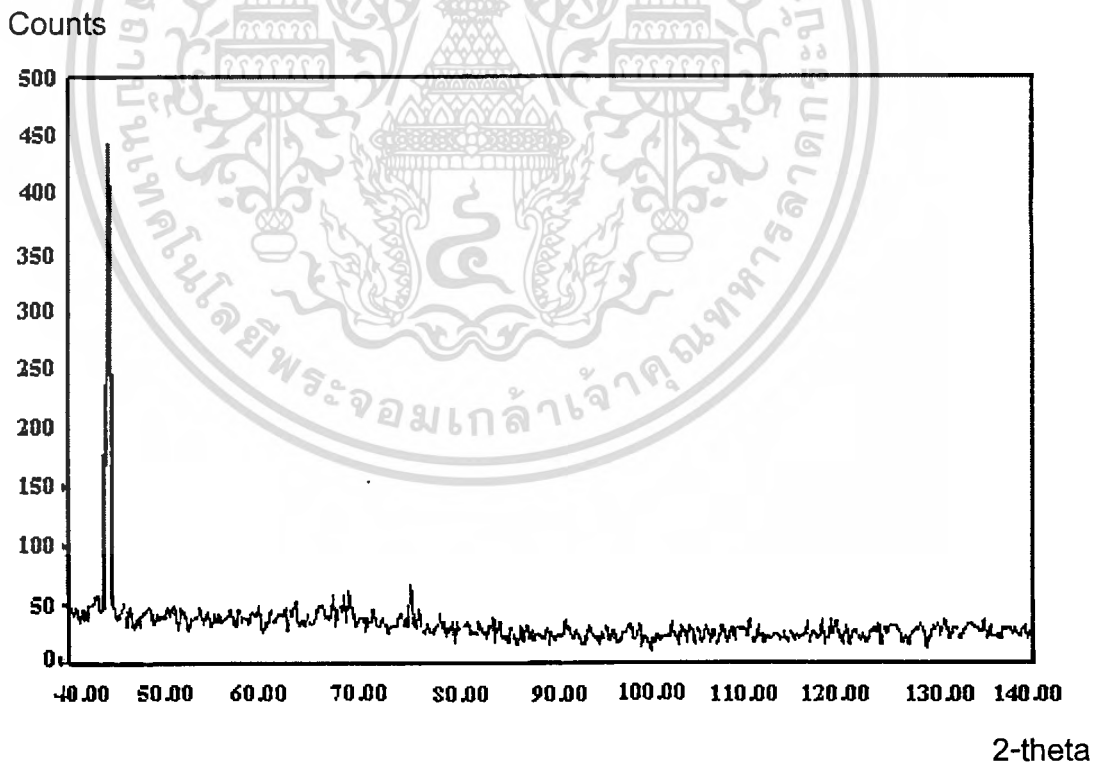
$$d = \frac{1 \times 1.5418}{2 \times \sin 22^\circ} = 2.059 \text{ \AA}$$

เมื่อทำการคำนวณในทำนองเดียวกัน ในการวิเคราะห์ด้วย XRD ของยอดกราฟ 5.12, 5.13 และ 5.14 จะมียอดกราฟต่างกันเมื่อทำการคำนวณตามตัวอย่างแล้ว และเทียบค่า Interplanar spacing ที่คำนวณได้กับค่ามาตรฐาน ASTM(6-675) แสดงได้ในตารางที่ 5.6 พบว่าที่ค่า $d \approx 2.059 \text{ \AA}$ จะมี Miller indices h, k, l เป็น 1, 1, 1 ส่วนที่ค่า $d \approx 1.263 \text{ \AA}$ มีค่า h, k, l เป็น 2, 2, 0 $d \approx 1.077 \text{ \AA}$ มีค่า h, k, l เป็น 3, 1, 1 และ $d \approx 0.891 \text{ \AA}$ มีค่า h, k, l เป็น 4, 0, 0 ตามลำดับ

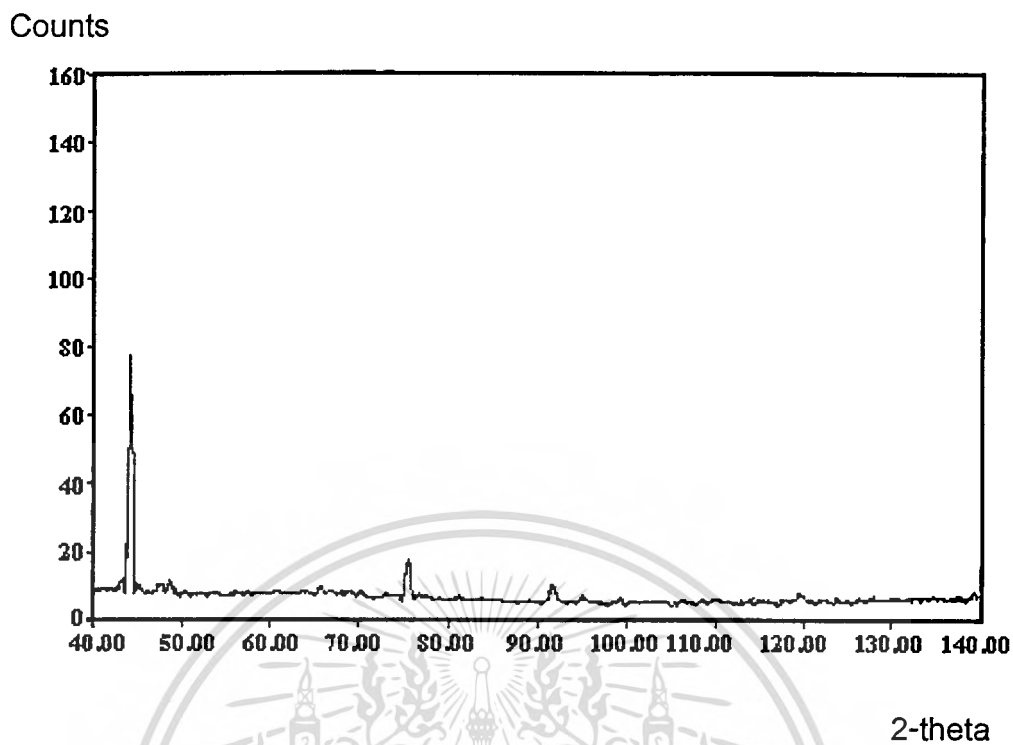
ตารางที่ 5.6 แสดงค่า Interplanar spacing ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้เทียบกับค่ามาตรฐาน ASTM(6-675)

ASTM 6-675		ชิ้นงานตัวอย่าง		
(hkl)	Interplanar spacing (Å)	B – C ระนาบ{111}	D – E ระนาบ {100}	F – G ระนาบรวม
111	2.06	2.059	2.059	2.059
220	1.261	1.263	1.263	1.258
311	1.0754	1.077	1.077	1.073
400	0.8916	-	0.891	0.891

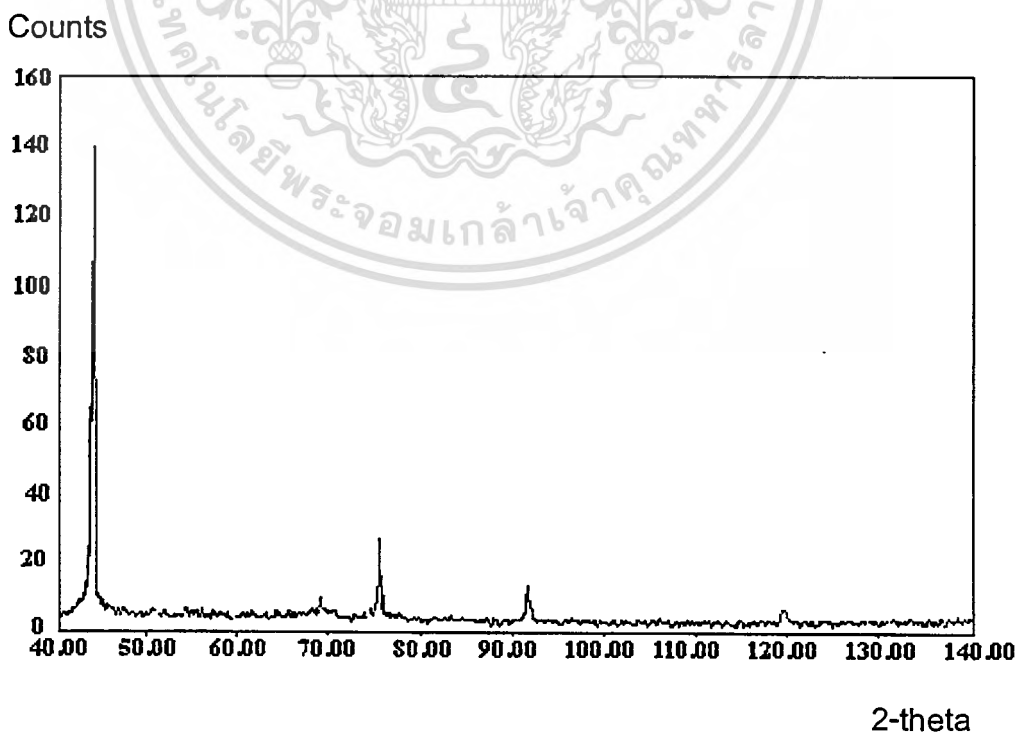
จากค่าในตารางที่ 5.6 พบว่าระนาบหลักของเพชรที่ตรวจสอบได้มี 4 ชนิดคือ ระนาบ (111), ระนาบ (220), ระนาบ (311) และระนาบ (400) สังเกตได้ว่าระนาบของการเลี้ยวเบนจะเป็นจำนวนคู่หรือคี่ทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะ โครงสร้างผลึกของเพชรมีลักษณะสมดุลงเป็นผลึกแบบ Cubic



รูปที่ 5.12 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรระนาบ {111}



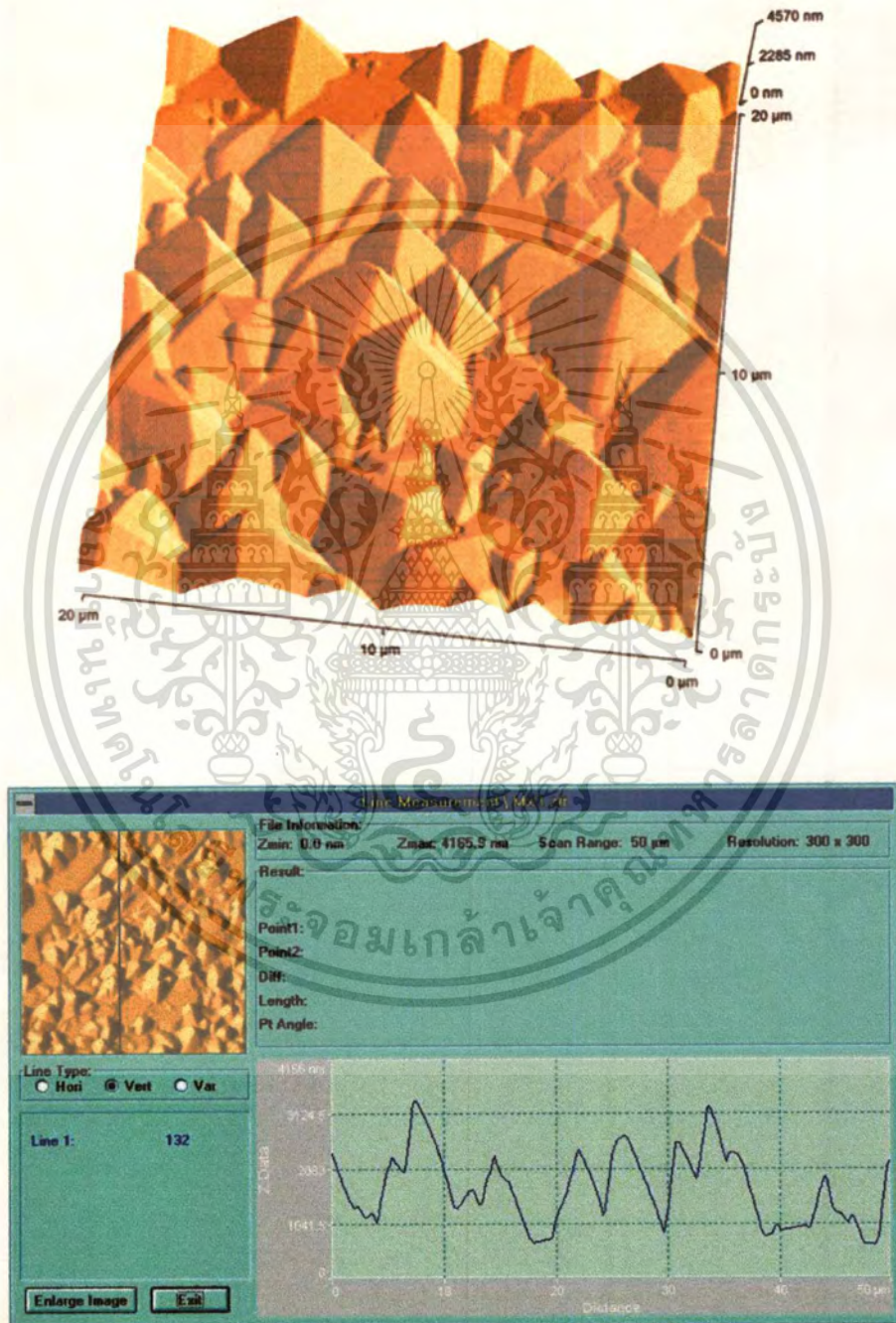
รูปที่ 5.13 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรระนาบ {100}



รูปที่ 5.14 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรระนาบรวม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

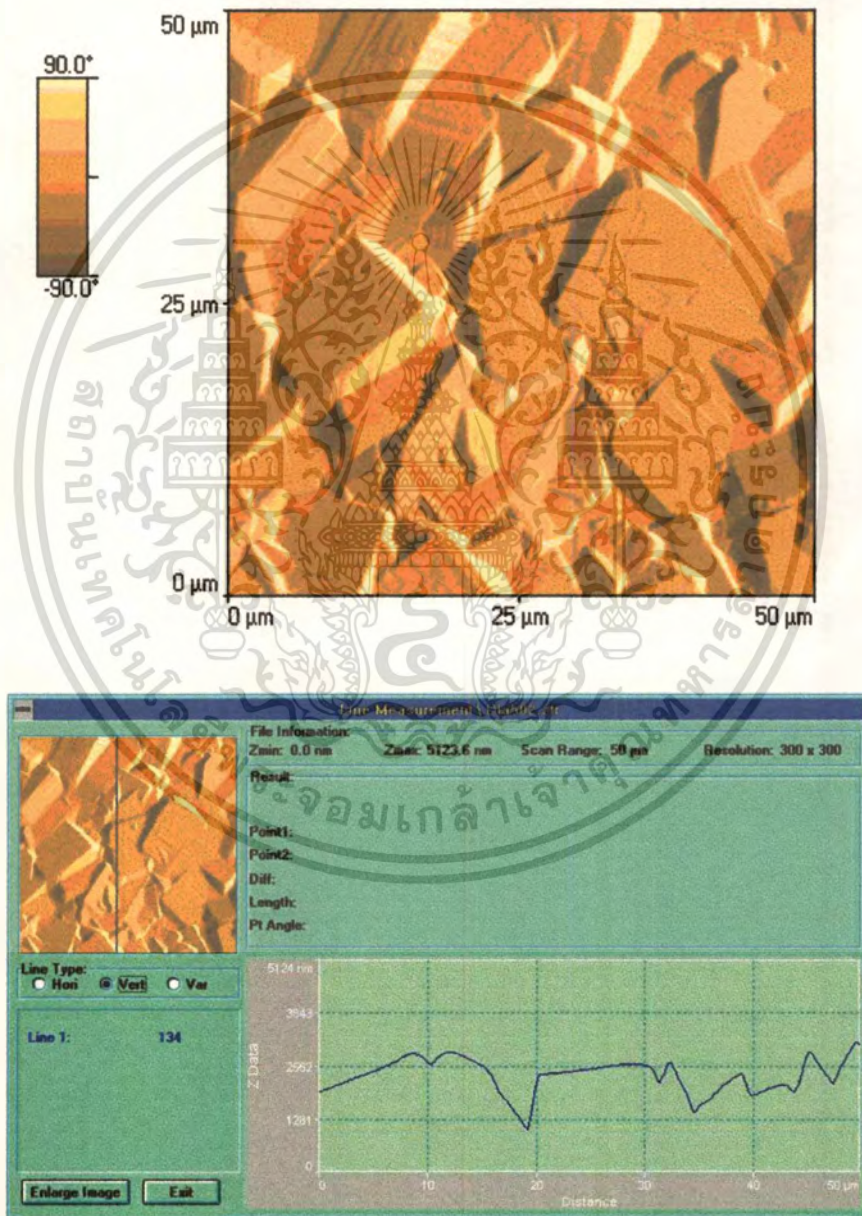
การศึกษารายละเอียดของผิวของฟิล์มเพชรที่ได้ด้วยเทคนิค AFM สามารถแสดงคุณภาพของผิวฟิล์มเพชรได้ดังรูปที่ 5.15 , 5.16 และ 5.17 ซึ่งภาพที่ได้จะแสดงถึงระดับความสูงต่ำของผิวฟิล์มที่สังเคราะห์ ความสม่ำเสมอของฟิล์มรวมทั้งสามารถแสดงให้เห็นภาพในการมองเห็นได้ดี และในการวิเคราะห์สามารถเลือกพื้นที่ของฟิล์มขนาดน้อยๆได้ อีกทั้งในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ไม่ต้องทำการเตรียมชิ้นงาน เนื่องจากลักษณะของฟิล์มเพชรมีความแข็งแรงและมีรูปร่างที่แน่นอน



รูปที่ 5.15 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ {111}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

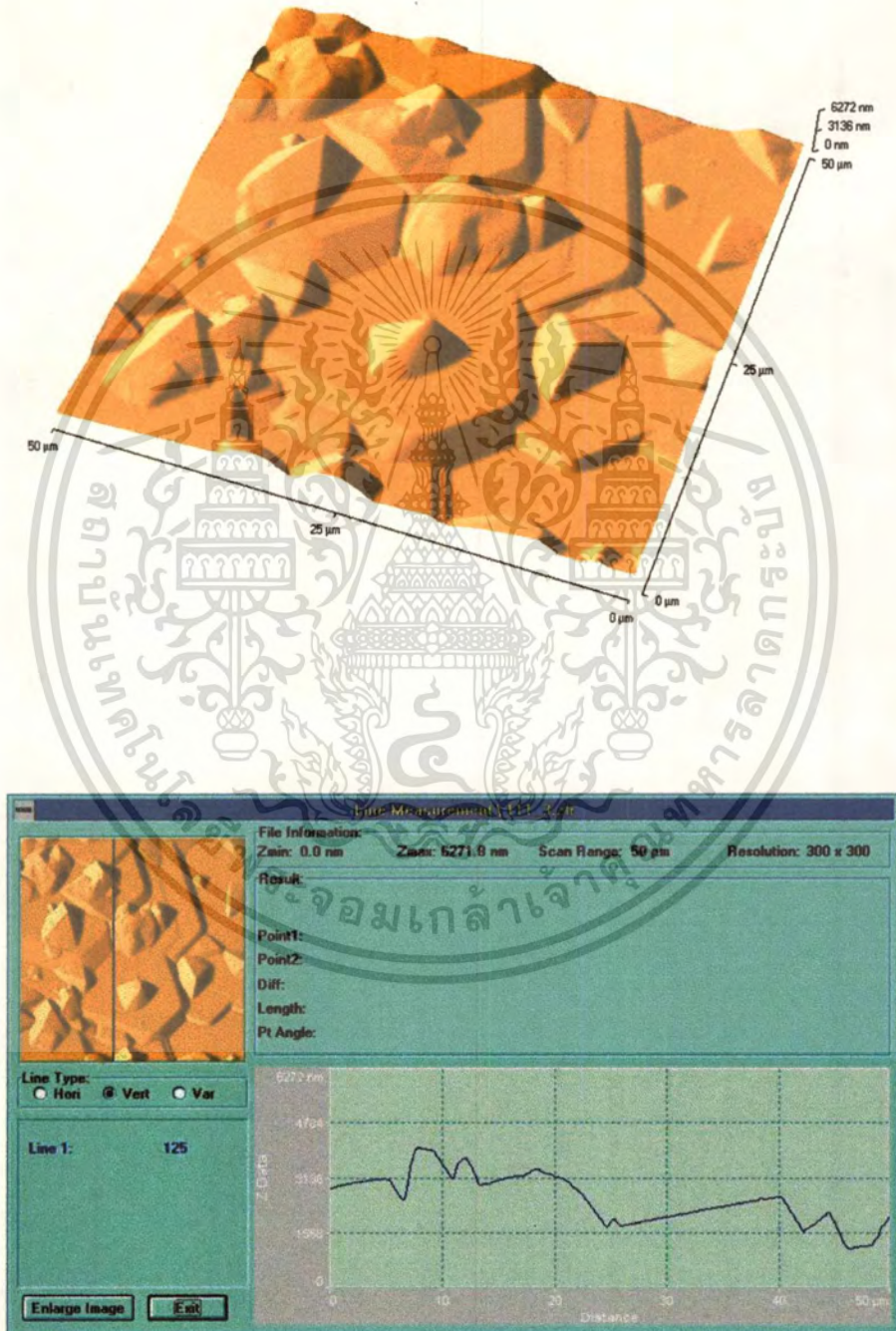
รูปที่ 5.15 แสดงลักษณะของผิวฟิล์มเพชรในระนาบ {111} พบว่าผิวหน้าของผลึกเป็นหน้าสามเหลี่ยมซึ่งแสดงเป็นภาพสามมิติและสามารถหาความแตกต่างระดับความสูงของฟิล์มเพชรซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นระเบียบของฟิล์มมีค่าเท่ากับ $2.1 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่สามารถทำการวัดขนาดได้อย่างแม่นยำ จะให้ผลดีเมื่อต้องการวิเคราะห์ผิวในทุกบริเวณของชิ้นงาน แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM จะสามารถประมาณค่าได้จากความยาวอ้างอิง และทำการวิเคราะห์ได้เพียงบริเวณขอบแผ่นเท่านั้นเช่นรูปที่ 5.10 (e) หรือต้องทำการตัดแผ่นฐานรองด้านหลังแล้วหักแผ่นเพื่อจะศึกษาลักษณะผิวที่บริเวณกลางแผ่นที่ต้องการศึกษา



รูปที่ 5.16 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ {100}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.16 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรในระนาบ {100} พบว่าสามารถทำการวิเคราะห์ได้ แต่หัวเข็มที่ปลายคานกระดิ่งจะเคลื่อนที่บนผิวของฟิล์มเพชรระนาบ {100} ซึ่งมีลักษณะเป็นรูป ลูกบาศก์เป็นผลให้เกิดการสะกดของหัวเข็มเกิดขึ้นทำให้ลำแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนให้สัญญาณ ผิดพลาดเล็กน้อย แต่สามารถประมาณค่าของผลึกได้แม่นยำกว่าเทคนิค SEM



รูปที่ 5.17 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.17 พิล์มเพชรในระนาบรวมนี้จะประกอบด้วยผลึกรูปร่างของหกเหลี่ยมเป็นส่วนใหญ่และจะประกอบด้วยผลึกอื่นที่ไม่ใช่ผลึกในระนาบ {111} และ {100} เพียงอย่างเดียว ในการวิเคราะห์จะพบว่าจะมีผลึกขนาดใหญ่และมีลักษณะของผิวผลึกเรียบ สม่ำเสมอ และมีผลึกขนาดเล็กเกิดขึ้นเล็กน้อย

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM มีประโยชน์ในการศึกษาลักษณะของฟิล์มอย่างละเอียด แต่ชิ้นงานต้องมีความหนาที่เหมาะสม และระนาบของฟิล์มก็มีผลต่อการวิเคราะห์ด้วย โดยในระนาบ {111} นั้นจะเป็นส่วนประกอบของผิวหน้าแบบสามเหลี่ยมพีระมิด หัวเข็มที่ปลายคานกระดิ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่ฟิล์มเพชรในระนาบ {100} ผิวของฟิล์มมีลักษณะแบบขั้นบันได ทำให้หัวเข็มที่ปลายคานเกิดการสะดุดเกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น แต่การใช้งานของฟิล์มเพชรส่วนมากจะเป็นในระนาบ {111} ทำให้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้มีความสำคัญ

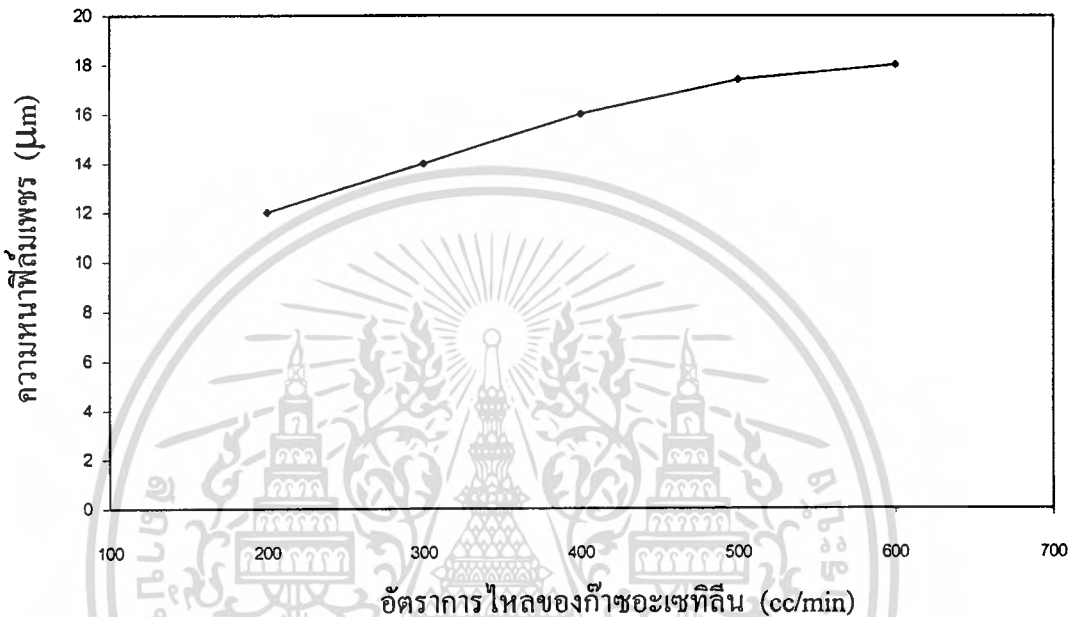
5.2.2 อัตราการไหลของก๊าซ

การสังเคราะห์นี้จะหาอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซที่ให้ทั้งอัตราการเกิดและคุณสมบัติที่ดี โดยทำการพิจารณาอัตราการไหลของก๊าซทั้งสองเมื่ออัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซคงที่ที่ 0.95 เพื่อศึกษาอัตราการไหลว่าจะมีผลกับอัตราการเกิดหรือไม่ กำหนดการสังเคราะห์เป็นฟิล์มเพชรระนาบ {111} เพราะมีช่วงอุณหภูมิฐานรองในการสังเคราะห์กว้าง โดยขอบเขตของอัตราการไหลได้นำเสนอแล้วในตารางที่ 3.1 โดยเลือกหัวทิพขนาด 100 ดังตาราง 5.7

ตารางที่ 5.7 เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่อัตราการไหลของก๊าซค่าต่าง ๆ

เงื่อนไข	A	B	C	D	E
ความดัน	บรรยากาศ				
อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ	0.95				
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	190	285	380	475	570
อัตราการไหลก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	200	300	400	500	600
ขนาดหัวทิพ	100				
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดด้วยครีมเพชร				
อุณหภูมิฐานรอง (°C)	700				
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง				
เวลาในการทดลอง (min)	20				

จากการทดลองได้ผลคือ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซแล้วอัตราการโตของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการสังเคราะห์นี้เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมแล้วจึงได้กราฟของ Raman shift ตามรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีคุณภาพดี โดยอัตราการโตของฟิล์มซึ่งทำการวัดบริเวณขอบของแผ่นซิลิกอนจะแสดงความหนาของฟิล์มเพชรดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ความหนาของฟิล์มที่อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีนค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.18 แสดงได้ว่าความหนาของฟิล์มเพชรจะแสดงถึงอัตราการโตของฟิล์มได้ โดยเมื่อทำการสังเคราะห์จะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซทำให้เพิ่มอัตราการโตของฟิล์มเพชรแล้ว แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลมากขึ้นจะทำให้เกิดความสั่นเปลือย เพราะสังเกตได้ว่าอัตราการโตจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากการเกิดของผลึกเพชรบนเพชรด้วยกันนั้นจะมีอัตราการโตช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฐานรองซิลิกอนเพราะการเกิดระหว่างฐานรองซิลิกอนกับผลึกเพชรเป็นพันธะของอเล็กตรอนในวงที่สามกับอเล็กตรอนของเพชรในวงที่สอง จึงสามารถเกิดได้ง่ายกว่าอเล็กตรอนในวงที่สองด้วยกัน

5.2.3 ระยะระหว่างปลายเปลวไฟขึ้นในกับฐานรอง

จากการสังเคราะห์นี้จะมีปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งคือระยะระหว่างเปลวกับฐานรองเพราะจากรูปที่ 2.21 พบว่าปริมาณของ C_2^* จะมีค่าลดลงเมื่อระยะเปลวไฟขึ้นในเพิ่มขึ้นดังนั้นจึงทำให้การศึกษาปรับระยะระหว่างปลายเปลวไฟขึ้นในกับฐานรอง โดยได้ทำการสังเคราะห์ตามเงื่อนไข

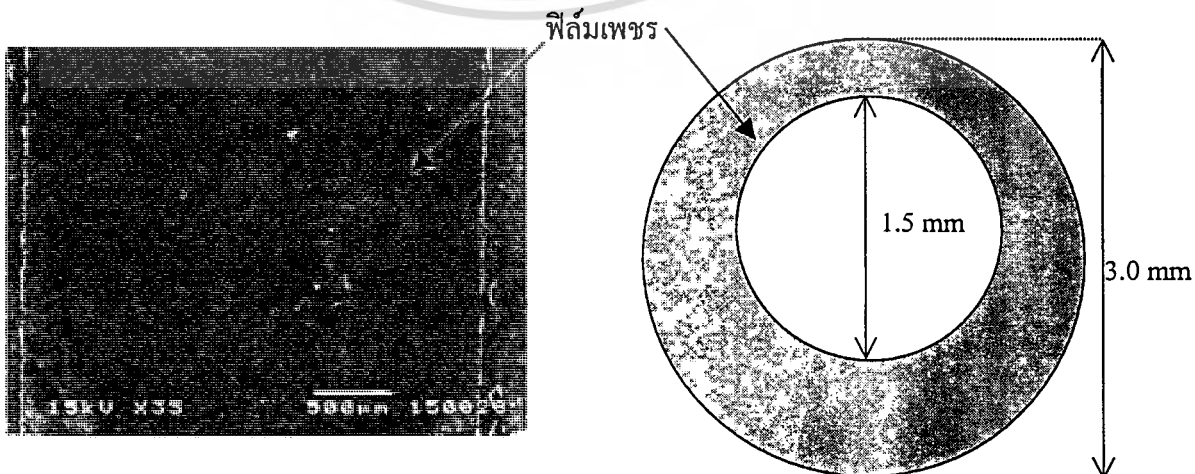
ตามตารางที่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้นในกับฐานรองค่าต่างๆ

เงื่อนไข	A	B	C	D	E	F
ความดัน	บรรยากาศ					
อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ	0.95					
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	285					
อัตราการไหลก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	300					
ขนาดหัวทิพ	100					
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดด้วยครีมเพชร					
อุณหภูมิฐานรอง (°C)	700					
ระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้น ในกับฐานรอง (mm)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
เวลาในการทดลอง (min)	20					

จากการสังเคราะห์พบว่าผลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในตัวอย่างที่มีระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้นในกับฐานรองเป็น 0.0–0.4 mm จะเกิดฟิล์มเพชรขึ้นในลักษณะของวงแหวนเกิดขึ้น และการสังเคราะห์นั้นเป็นไปได้ยากเนื่องจากความดันก๊าซจากเปลวไฟชั้นในสูง ฟิล์มเพชรวงแหวนที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.19 แต่เมื่อปรับระยะเป็นระหว่าง 0.5–0.9 mm จะเกิดฟิล์มเพชรลักษณะเป็นวงกลม โดยที่ระยะ 0.5 mm จะมีอัตราการโตสูงสุดและได้พื้นที่ในการสังเคราะห์มากที่สุด และสำหรับการสังเคราะห์นี้จะขึ้นกับตัวแปรอื่นๆ ด้วยเช่น ขนาดของหัวทิพ อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ และอัตราการไหลของก๊าซ



เอกสารรูปที่ 5.19 ลักษณะการเกิดของฟิล์มเพชรในระยะฐานรอง 0.0-0.4 mm ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

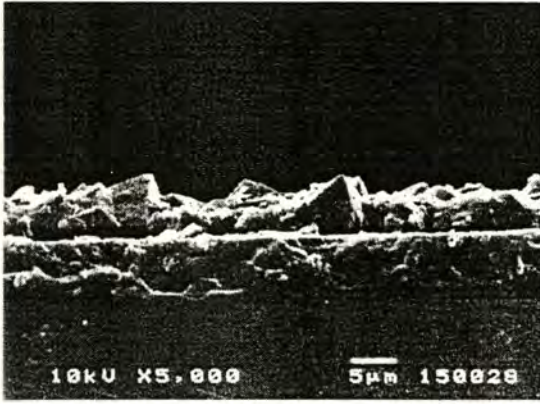
5.2.4 เวลาในการสังเคราะห์

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรให้ได้ความหนาตามความต้องการนั้นจะต้องศึกษาเงื่อนไขของเวลาโดยกำหนดเงื่อนไขอื่นๆ ให้คงที่และทำการแปรค่าเวลาในการสังเคราะห์ เพื่อศึกษาอัตราการโตของฟิล์มกับเวลาดังตารางที่ 5.9

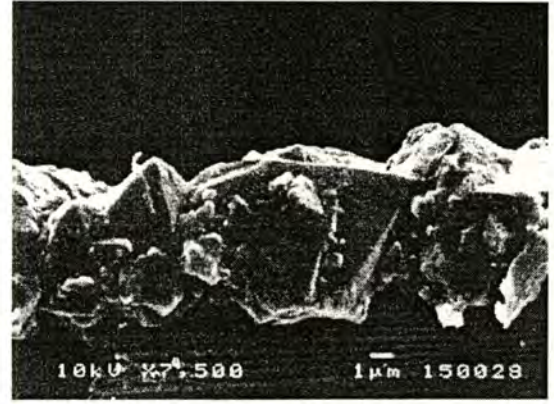
ตารางที่ 5.9 เงื่อนไขเวลาในการสังเคราะห์ค่าต่าง ๆ

เงื่อนไข	A	B	C	D
ความดัน	บรรยากาศ			
อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ	0.95			
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	285			
อัตราการไหลก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	300			
ขนาดหัวทิพ	100			
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดด้วยครีมเพชร			
อุณหภูมิฐานรอง (°C)	700			
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง			
เวลาในการทดลอง (min)	10	15	20	25

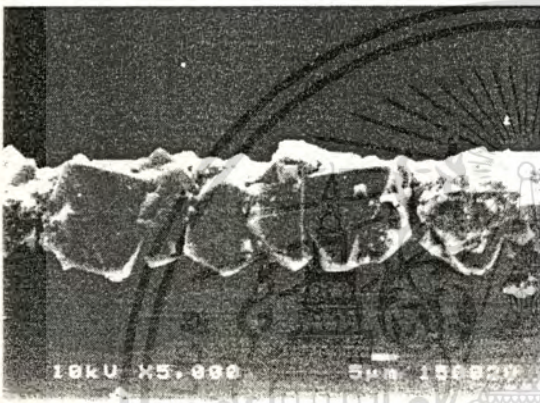
จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรพบว่าที่เวลาในการสังเคราะห์ให้เริ่มเกิดเป็นฟิล์มเพชรนั้นจะเริ่มตั้งแต่ 15 นาที หลังจากนั้นจะเป็นอัตราการโตของความหนาของฟิล์มซึ่งจะมีค่าความหนาเพิ่มขึ้นตามเวลาในการสังเคราะห์ โดยอัตราการโตของฟิล์มเพชรจะมีค่าลดลงเนื่องจากอัตราการโตของฟิล์มเพชรด้วยกันมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในช่วงเริ่มต้นบนฐานรองซิลิกอนมาก จึงจะเห็นได้ว่าการเตรียมฐานรองจะมีผลต่อการสังเคราะห์มาก โดยผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ดังรูปที่ 5.20 และความหนาของฟิล์มกับเวลาในการสังเคราะห์สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.21



(a) ตัวอย่างชิ้นงาน B (15 นาที)

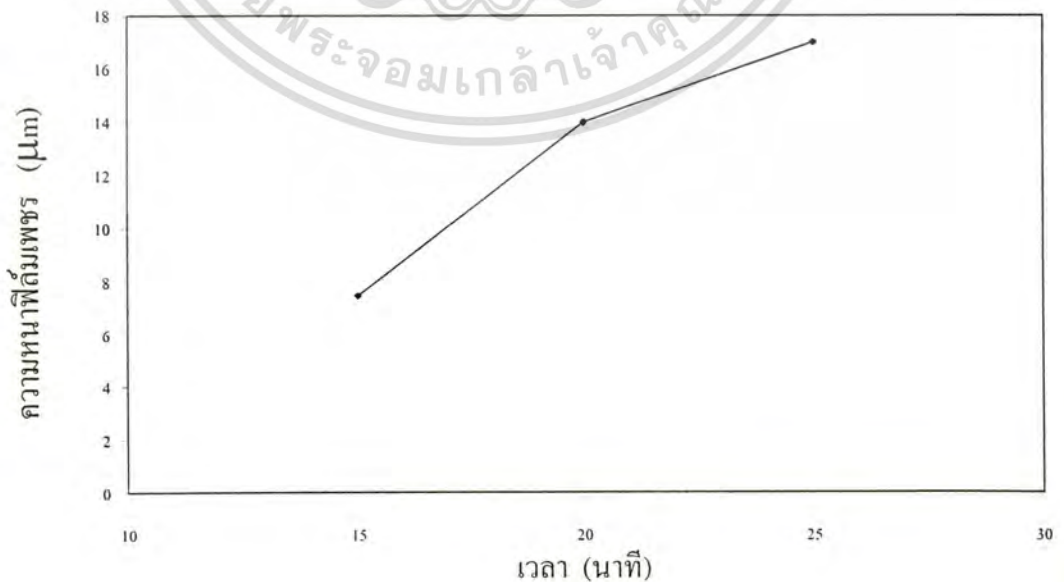


(b) ตัวอย่างชิ้นงาน C (20 นาที)



(c) ตัวอย่างชิ้นงาน D (25 นาที)

รูปที่ 5.20 ลักษณะผิวที่สังเคราะห์อัตราส่วน โดยปริมาตรค่าต่าง ๆ



รูปที่ 5.21 แผนภาพความหนาของฟิล์มเพชรที่เวลาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 พื้นที่ของฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์นี้จะหาอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซที่ทำให้ทั้งอัตราการเกิดและคุณสมบัติที่ดีที่สุด โดยทำการคุมเงื่อนไขอื่นๆ คงที่ดังตาราง 5.10 ดังนี้

ตารางที่ 5.10 เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่หัวทิพขนาดต่าง ๆ

เงื่อนไข	A	B	C	D
ความดัน	บรรยากาศ			
อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ	0.95			
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	190	285	380	475
อัตราการไหลก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	200	300	400	500
ขนาดหัวทิพ	75	100	140	200
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดด้วยคริมเพชร			
อุณหภูมิฐานรอง (°C)	800			
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง			
เวลาในการทดลอง (min)	20			

จากการสังเคราะห์ที่บริเวณที่เกิดฟิล์มเพชรบนฐานรองมีลักษณะเป็นวงกลมโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่า 2.8, 3.2, 3.6 และ 4.2 mm สำหรับหัวทิพขนาด 75, 100, 140 และ 200 ตามลำดับ โดยเลือกระยะระหว่างฐานรองกับเปลวไฟชั้นในเท่ากับ 0.5 mm และใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซตามลำดับข้างต้น การสังเคราะห์ที่ได้นั้นจะได้พื้นที่ตามความต้องการโดยขึ้นอยู่กับขนาดของหัวทิพ ซึ่งจะทำให้พื้นที่ที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และแสดงอัตราการไหลตามตารางที่ 5.10 เพื่อทำการทดลองแล้วจะพบว่าจะเกิดเป็นฟิล์มเพชรขึ้น โดยเมื่อต้องการให้ได้พื้นที่เท่าใดจะเลือกขนาดของหัวทิพและอัตราการไหลตามความต้องการได้

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถสรุปได้ดังนี้คือ ช่วงอุณหภูมิฐานรอง 560–820° C จะเกิดฟิล์มเพชรระนาบ {111} ช่วงอุณหภูมิฐานรอง 840–880° C จะเกิดฟิล์มเพชรระนาบ {100} ช่วงอุณหภูมิฐานรอง 900–1,040° C จะเกิดฟิล์มเพชรระนาบรวม อัตราการโตของฟิล์มเพชรจะแปรตาม อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ ระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้นในกับฐานรองกับ และเวลาในการสังเคราะห์ ส่วนพื้นที่ในการสังเคราะห์จะขึ้นกับขนาดของหัวทิพ และระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้นในกับฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

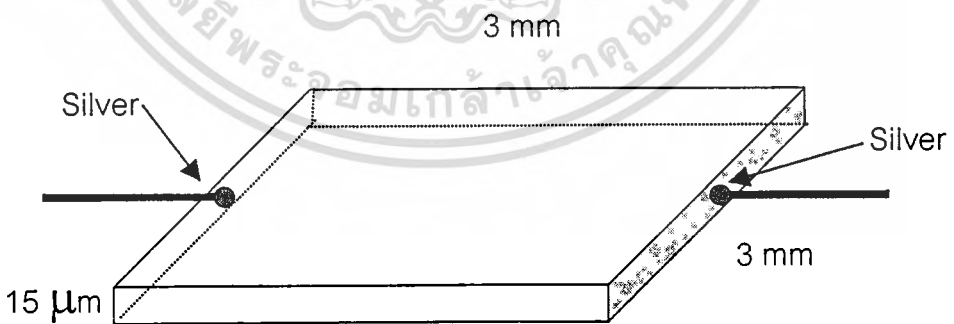
5.3 การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

จากการสังเคราะห์ที่ผ่านมาสามารถศึกษาเทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิคใหม่ นี้ได้เป็นอย่างดีแล้ว ต่อไปนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้น โดยนำฟิล์มเพชรที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดจากการสังเคราะห์นำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติที่อุณหภูมิสูง เพื่อแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาฟิล์มเพชรนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการใช้งานที่สารกึ่งตัวนำซิลิกอนมีข้อจำกัดไม่สามารถทำงานได้ โดยทำการวิเคราะห์ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

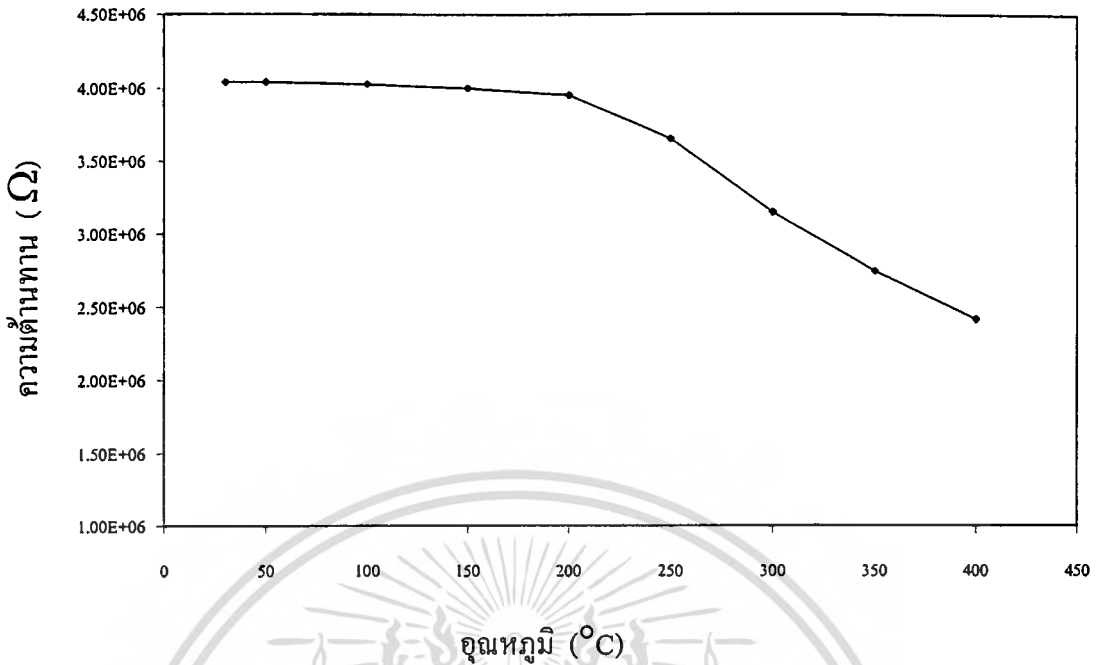
การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องทราบว่ามีความสัมพันธ์เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สภาพความต้านทานลดลง เพราะมีประจุพาหะเกิดเพิ่มขึ้นทั้งโฮลและอิเล็กตรอนจึงทำให้ความต้านทานลดลง คุณสมบัตินี้เป็นลักษณะพิเศษของสารกึ่งตัวนำ

ในการศึกษานี้จะใช้การวัดความต้านทานภายในเตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ด้วยเครื่อง Takedariken digital multimeter สามารถวัดความต้านทานได้ตั้งแต่ $0.0-4.04 \text{ M}\Omega$ แต่ก่อนที่จะทำการทดลองจำเป็นต้องสังเคราะห์รอยต่อโลหะเพื่อจะทำการเชื่อมต่อสายลวดออกมาจากเตาเผา เมื่อพิจารณาตามตารางที่ 2 พบว่า โลหะที่จะนำมาทำเป็นรอยต่อต้องเป็นแบบโอห์มมิกเพื่อให้รอยต่อไม่มีผลต่อความต้านทานและมีจุดหลอมเหลวสูงซึ่งได้แก่ ทองคำ (Au) และ เงิน (Ag) การสังเคราะห์รอยต่อด้วยทองคำนั้นจะทำตามกระบวนการ 3.3 จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ขนาดพื้นที่ $3 \times 3 \text{ mm}^2$ มีความหนาประมาณ $15 \mu\text{m}$

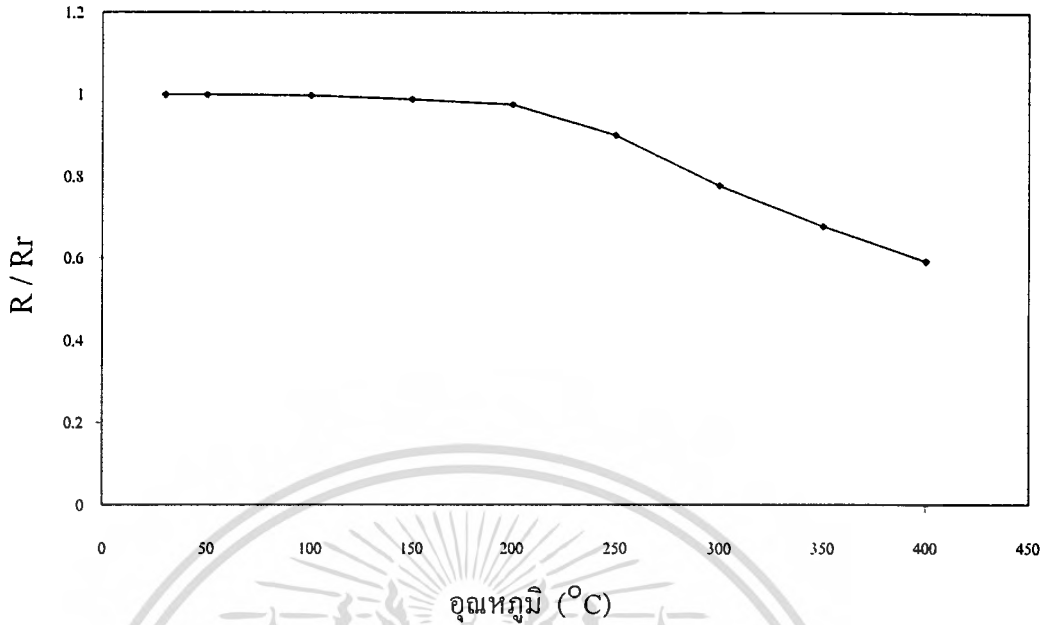


รูปที่ 5.22 แสดง โครงสร้างของตัวต้านทานที่สังเคราะห์จากฟิล์มเพชร



รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 5.23 พบว่าตัวต้านทานที่สังเคราะห์จากฟิล์มเพชรแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ นั่นคือที่อุณหภูมิเพิ่มฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานจะลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200°C และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250°C ขึ้นไปค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น 2.42 MΩ ที่อุณหภูมิ 400°C แต่ด้วยขีดจำกัดในการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรในการวัดที่อุณหภูมิสูง จึงได้ทำการวัดค่าความต้านของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Hewlett packard semiconductor / Component test system และ Curve tracer สามารถวัดค่าความต้านทานได้มากกว่า $1 \times 10^{10} \Omega$ ซึ่งการวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานกับอุณหภูมิก็น่าเพียงพอสำหรับการสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ และเมื่อต้องการทราบการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้อง R/R_r แสดงดังรูปที่ 5.24 เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ และ R_r คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง (30°C) การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30°C จนถึง 200°C มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยมากคือน้อยกว่า 0.000–0.022 โดยที่อุณหภูมิ 250°C ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น จึงพอสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรนี้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200°C ซึ่งสามารถนำไปใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิสูงได้



รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน R/R_r ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (30°C ถึง 400°C)

การวิเคราะห์ชนิดประจุพาหะด้วยเทคนิค Seebeck effect

ทำการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้ด้วยชุดเครื่องมือตามรูปที่ 4.11 ในการทำการทดลองได้จ่ายความร้อนกับเข็มร้อนอุณหภูมิประมาณ 100°C เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกัลวานอ-มิเตอร์ได้อย่างเด่นชัดขึ้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ขึ้นตัวอย่างฟิล์มชนิดพีจากวิธี Hot filament CVD ผลที่ได้คือ กัลวานอมิเตอร์ชี้ตำแหน่งบวกซึ่งหมายถึงพาหะโฮลนั่นเอง เมื่อวิเคราะห์ว่าฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation กัลวานอมิเตอร์ชี้ไปยังตำแหน่งศูนย์ แสดงว่าจำนวนพาหะที่เคลื่อนที่จากเข็มร้อนไปยังเข็มเย็นนั้นมีเท่ากันทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้ไม่เกิดความต่างศักย์ระหว่างเข็มร้อนและเข็มเย็นขึ้น จึงสรุปได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก ดังนั้นจึงทำการวัดด้วยเครื่องวัดความต้านทานสูง ซึ่งวัดความต้านทานของฟิล์มเพชรชนิดนี้ได้ $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation ได้เป็นผลสำเร็จ โดยเริ่มจากการออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือขึ้นใหม่ และได้พัฒนาชุดเครื่องมือเป็นลำดับจนสามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรและฟิล์มเพชรได้เป็นผลสำเร็จ ชุดเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้จะตอบสนองต่อเงื่อนไขในการศึกษาซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนสำคัญ ๆ คือ ส่วนการหาเงื่อนไขเพื่อให้สามารถสังเคราะห์ผลึกเพชรได้ เงื่อนไขต่อมาคือเงื่อนไขในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร และการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มที่ได้

ในการสังเคราะห์นั้นจะใช้เงื่อนไขพื้นฐานคือให้ก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนจุดเป็นเปลวไฟจากหัวเชื่อมที่มีขนาดหัวทิฟต่าง ๆ เกิดเป็นคาร์บอนโครงสร้างเพชรตกลงบนฐานรองที่มีอุณหภูมิสูงชนิดที่เหมาะสม ดังนั้นจึงเลือกเงื่อนไขการสังเคราะห์ตามตารางที่ 6.1 เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ผลึกเพชรและฟิล์มเพชร

ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation

เงื่อนไข	ผลึกเพชร	ฟิล์มเพชร
อัตราส่วน โดยปริมาตรของก๊าซ	0.85-0.95	
แหล่งจ่ายก๊าซ		
- ออกซิเจน	อัตราการไหล 190–950 cc/min	
- ออกซิเจน	อัตราการไหล 200–1,000 cc/min	
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดมัน	ซิลิกอนขัดด้วยครีมเพชร
อุณหภูมิฐานรอง	560–1,330 °C	560–1,040 °C
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง	
เวลาในการทดลอง	ประมาณ 10 นาที	มากกว่า 15 นาที

จากเงื่อนไขในการสังเคราะห์ข้างต้นพบว่าเกิดผลึกเพชรบนฐานรองซิลิกอนขัดมันกระจายอยู่เป็นบริเวณประมาณเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลวไฟชั้นใน และเมื่อใช้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซออกซิเจนที่อัตราส่วนก๊าซ 0.85-0.95 จะให้อัตราการโตของผลึกประมาณ 150-180 $\mu\text{m/h}$ โดยเฉพาะที่อัตราส่วนก๊าซ 0.95 จะให้คุณภาพผลึกที่ดีที่สุด เนื่องจากมียอดกราฟของ Raman spectroscopy ที่เด่นที่สุด ไม่มียอดกราฟของคาร์บอนรูปอื่น ๆ ปรากฏ ส่วนอุณหภูมิฐานรองที่ทำให้เกิดผลึกเพชรขึ้นได้นั้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 560–1,330 °C และอัตราการโตสูงสุดที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรอง $1,330^{\circ}\text{C}$ ส่วนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิกอนที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชร เพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่นการนิวเคลียชันซึ่งใช้ช่วงอุณหภูมิฐานรองระหว่าง $560\text{--}1,040^{\circ}\text{C}$ จากการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction ; XRD) และการวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM) พบว่าช่วงอุณหภูมิฐานรอง $560\text{--}820^{\circ}\text{C}$ สังเคราะห์ได้ฟิล์มเพชรระนาบ {111} ช่วงอุณหภูมิฐานรอง $840\text{--}880^{\circ}\text{C}$ สังเคราะห์ได้ฟิล์มเพชรระนาบ {100} และช่วงอุณหภูมิฐานรอง $900\text{--}1,040^{\circ}\text{C}$ สังเคราะห์ได้ฟิล์มเพชรระนาบ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซจะส่งผลให้อัตราการโตของฟิล์มเพชรเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ดีการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซเพิ่มมากขึ้นก็ยิ่งจะทำให้สิ้นเปลืองมากขึ้นตามไปด้วย ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งสำหรับการสังเคราะห์คือ ระยะระหว่างปลายเปลวไฟชั้นในกับฐานรอง $0.0\text{--}0.4\text{ mm}$ จะเกิดฟิล์มเพชรขึ้นในลักษณะของวงแหวน และเมื่อปรับระยะ $0.5\text{--}0.9\text{ mm}$ จะเกิดฟิล์มเพชรลักษณะเป็นวงกลม ที่ระยะ 0.5 mm มีอัตราการโตสูงสุดและได้พื้นที่ฟิล์มเพชรมากที่สุด การสร้างให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรใช้เวลาในตั้งแต่ 15 นาทีขึ้นไป ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการสังเคราะห์ พื้นที่ของฟิล์มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8, 3.2, 3.6 และ 4.2 mm สำหรับหัวทิพขนาด 75, 100, 140 และ 200 ตามลำดับ

เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจนได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการสังเคราะห์แล้วนำฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์จากเงื่อนไขที่ดีที่สุดนั้นไปทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป โดยเริ่มจากการตรวจสอบประจุพาหะของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Seebeck effect พบว่าประจุพาหะโฮลและอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากัน โดยสังเกตจากเข็มกัลวานอมิเตอร์ที่ชี้ไปยังตำแหน่งศูนย์ ทำการศึกษาต่อเพื่อหาค่าความต้านทานของฟิล์มเพชร โดยทำการสร้างขั้วโลหะให้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกด้วยการใช้โลหะเงิน แล้วนำไปวัดค่าความต้านทานที่อุณหภูมิช่วง $30\text{--}400^{\circ}\text{C}$ พบว่าตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง (30°C) เท่ากับ $4.04\text{ M}\Omega$ และแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200°C และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250°C ขึ้นไป ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น $2.42\text{ M}\Omega$ ที่อุณหภูมิ 400°C แต่ด้วยขีดจำกัดในการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรในการวัดที่อุณหภูมิสูง จึงได้ทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Hewlett packard semiconductor / Component test system และ Curve tracer สามารถวัดหาค่าความต้านทานได้มากกว่า $1 \times 10^{10}\ \Omega$ จึงสรุปว่าฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30°C จนถึง 200°C มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยคือน้อยกว่า $0.000\text{--}0.022\%$ จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 250°C ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น จึงสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรนี้

สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200°C ซึ่งสามารถนำไปใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิสูงได้

ทั้งหมดนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในการใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ เพราะการสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation นี้ให้ฟิล์มเพชรซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิกเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงต้องมีการพัฒนาขั้นต่อไปนั้นเพื่อให้สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรให้ได้ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิกและชนิดพีเพื่อจะสามารถประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ได้มากขึ้น เพื่อนำไปทดแทนสารกึ่งตัวนำซิลิกอนในงานที่อุณหภูมิสูงต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- โยธิน วงศ์ประเสริฐ และคณะ. 2540. “การสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี Combustion Activation.” การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า 20 : 513-517.
- โยธิน วงศ์ประเสริฐ และคณะ. 2542. “คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยก๊าซอะเซทิลีน.” วิศวกรรมลาดกระบัง. 16(2) : 140-144.
- สมเกียรติ สุภเดช. 2538. อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมเกียรติ สุภเดช. 2538. สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Davis,R. F. 1992. **Diamond films and coatings : Development, Properties, and Applications.** USA : Noyes Publication.
- Graham,R. J. and Ravi,K.V.. 1992. “Cathodoluminescence investigation of impurities and defects in single crystal diamond grown by the combustion-flame method.” **Appl. Phys. Lett.** 60(11) : 1310-1312.
- Hirabayashi,K. et. al. 1992. “Surface structures of high-quality diamond crystals synthesized by the oxy-acetylene flame method.” **Appl. Phys. Lett.** 60(5) : 574-576.
- Hirabayashi,K. and Hirose,Y. 1994. “Growth mechanism of flattened crystals synthesized by chemical vapor deposition.” **Journal of Crystal Growth.** (142) : 140-146.
- Hirabayashi,K. and Hirose,Y. 1996. “Synthesis and growth mechanism of flattened crystals by chemical vapor deposition.” **Diamond and Related Materials.** (4) : 48-52.
- Hirose,Y. et. al. 1990. “The synthesis of high-quality diamond in combustion flames.” **J. Appl. Phys.** (12) : 6401-6405.
- Hoff,H. A. et. al. 1991. “Columnar growth in combustion deposited diamond thin films.” **Appl. Phys. Lett.** 59(14) : 1693-1695.
- Kania,D. R. 1995. **Diamond Electronic Properties and Applications.** London : Kluwer Academic publishers.
- Komaki, K. et. al. 1993. “Synthesis of Diamond in Combustion Flame under Low Pressures.” **Jpn.J.Appl.Phys.** (32) : 1814-1817.
- Matsui,Y. et. al. 1989. “Flame Structure and Diamond Growth Mechanism of Acetylene Torch.” **Jpn. J. Appl. Phys.** 28(9) : 1718-1724.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Matsui, Y. et. al. 1990. "The Growth Mechanism of Diamond Crystals in acetylene Flames."
J. Appl. Phys. 29(8) : 1552-1560.
- Pan, L. S. and Plage, H. B. 1995. **Electronic materials chemistry.** USA : Library of Congress Cataloging-in- Publication Data.
- Wilks, E. and Wilks, J. 1994. **Properties and Applications of Diamond.** Cambridge : British Library Cataloguing in Publication Data.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivity

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal expansion coefficient

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

^{*}Gruneisen's law obeyed in this region

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity

Material	Capacity (J/mol \cdot° C)
Silver	25.50
Gold	25.41
Copper	24.50
Aluminum	24.37
Silicon	19.85
Graphite	8.54
Diamond	6.19
Water	4.22
BeO 0.74 cal/cc Sapphire 0.69 cal/cc Si 0.42 cal	

ตาราง ก-4 แสดงการเปรียบเทียบค่า Hardness

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-5 แสดงการเปรียบเทียบค่า Sound velocity (m/s)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-6 แสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus

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

ตาราง ก-7 แสดงการเปรียบเทียบค่า Coefficient of friction

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Optical property

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

ตาราง ก-9 แสดงการเปรียบเทียบค่า Density

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

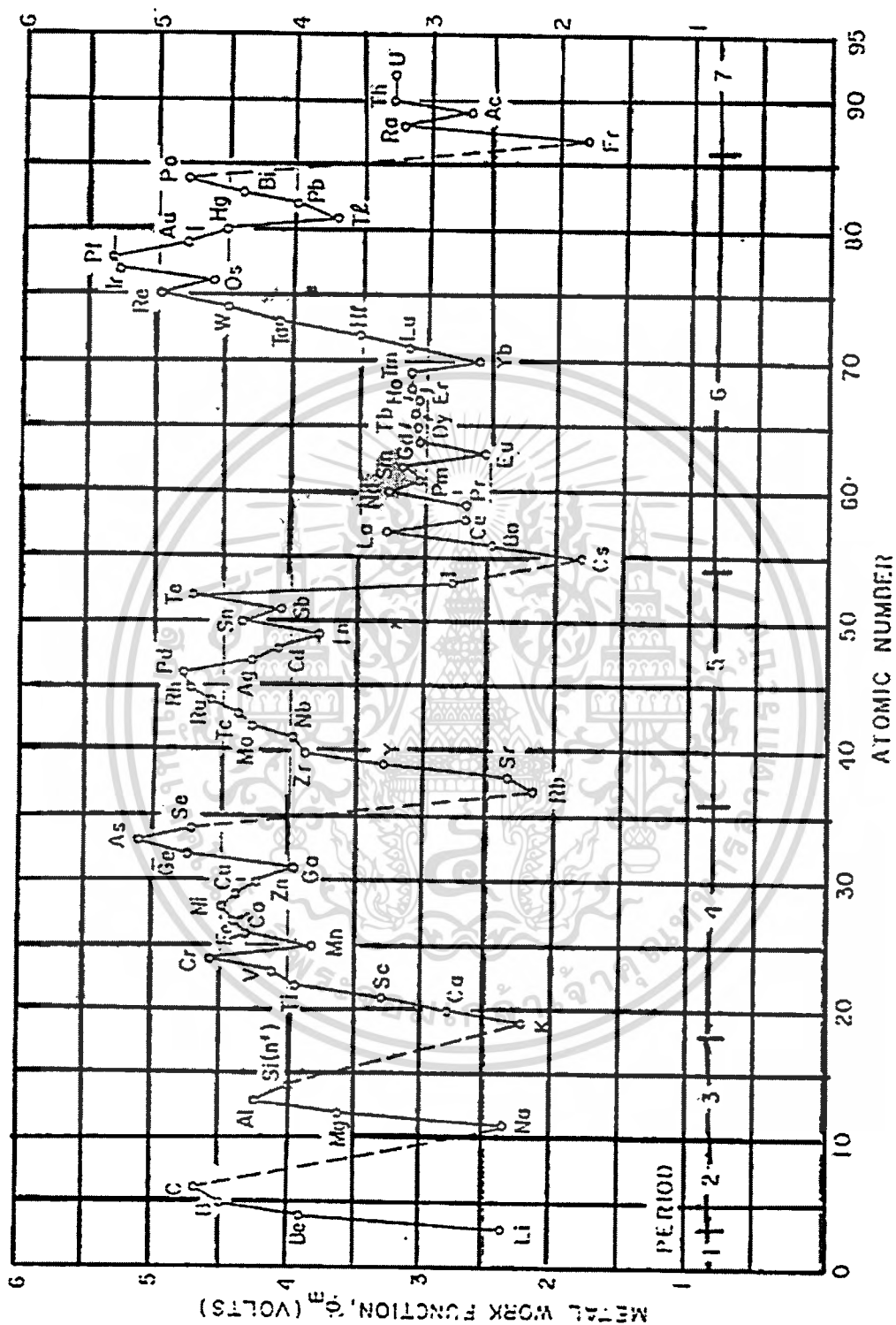
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-10 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ของเทอร์โมคัปเปิล

T (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5.891	-6.035	-6.158	-6.262	-6.344	-6.404	-6.441	-6.458		
-100	-3.553	-3.852	-4.138	-4.410	-4.669	-4.912	-5.141	-5.354	-5.550	-5.730
-(0)	0.00	-0.392	-0.777	-1.156	-1.527	-1.889	-2.243	-2.586	-2.920	-3.242
+(0)	0.00	0.397	7.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.805	3.266	3.681
100	4.095	4.508	4.919	5.327	5.733	6.137	6.539	6.939	7.338	7.737
200	8.137	8.537	8.938	9.341	9.745	10.151	10.560	10.969	11.381	11.793
300	12.207	12.623	13.093	13.456	13.874	14.292	14.712	15.132	15.552	15.974
400	16.395	16.818	17.241	17.664	18.088	18.513	18.938	19.363	19.788	20.214
500	20.640	21.006	21.493	21.919	22.346	22.772	23.198	23.624	24.050	24.476
600	24.902	25.327	25.751	26.176	26.599	27.022	27.445	27.867	28.288	28.709
700	29.128	29.547	29.965	30.383	30.799	31.214	31.629	32.042	32.455	32.866
800	33.277	33.686	34.095	34.502	34.909	35.314	35.718	36.121	36.524	36.925
900	37.325	37.724	38.122	38.519	38.915	39.310	39.703	40.096	40.488	40.879
1000	41.269	41.657	42.045	42.432	42.817	43.202	43.585	43.968	44.349	44.729
1100	45.108	45.486	45.863	46.238	46.612	46.985	47.356	47.726	48.095	48.462
1200	48.828	49.192	49.555	49.916	50.276	50.633	50.990	51.344	51.697	52.049
1300	52.398	52.747	53.093	53.439	53.782	54.125	54.466	54.807		

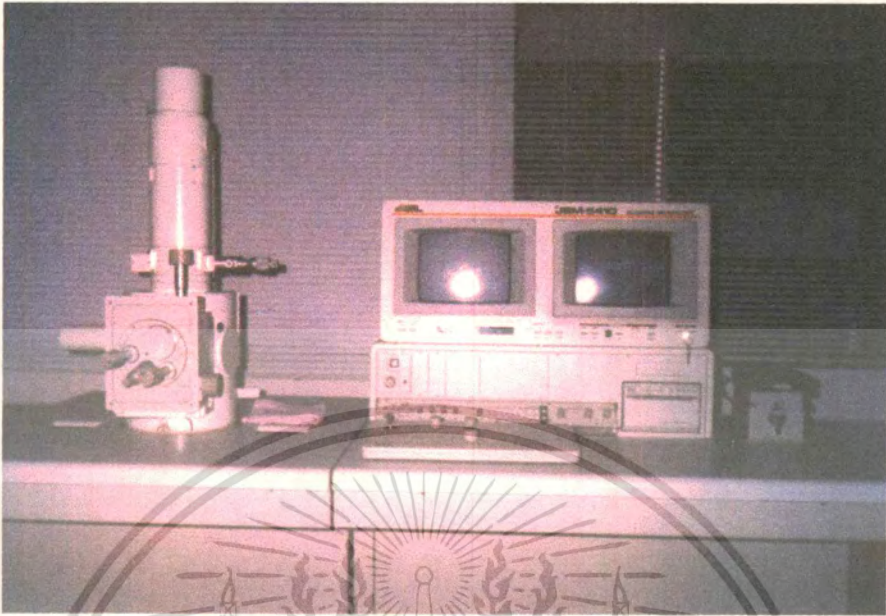
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันงานของโลหะในสุญญากาศกับค่าเลขเชิงอะตอม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



รูปที่ ข-1 แสดงเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) ของ JEOL รุ่น JSM-5410 มีความละเอียด (Resolution) 5.5 nm. และกำลังขยายสูงสุด 200,000 เท่า



รูปที่ ข-2 แสดงเครื่อง Atomic Force Microscope (คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 เครื่อง X-ray diffraction (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)



รูปที่ ข-4 เครื่อง FT-Raman Spectroscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายโยธิน วงศ์ประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดสมุทรสาคร สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2538



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้