

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรด้วย
วิธี CACVD

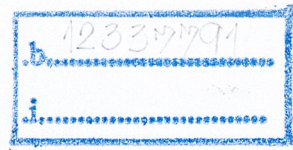
THE STUDY ON PROCESS OF ELECTRONIC DEVICE FROM
DIAMOND FILMS BY CACVD



T117462



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 117462
วัน,เดือน,ปี. - 5 ต.ค. 2554



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรด้วยวิธี CACVD

The study on Process of electronics device from diamond film by CACVD

จัดทำโดย นายพิทักษ์ สวาสิทธิเชย
น.ส.พรชฎิภา สนวนพรหม
น.ส.วันสนันท์ วรรณรักษา

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบแล้วโดยอาจารย์ที่ปรึกษา



(ดร.โยชิน วงศ์ประเสริฐ)

อาจารย์ที่ปรึกษา



การสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรด้วยวิธี CACVD

นายพิทักษ์	สวาสัทธิเชย	50011100
น.ส.พรชทิภา	สวนพรหม	50011039
น.ส.วณัสนันท์	วรรณรักษา	50011349
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion Activation Chemical Vapor Deposition (CACVD) เพื่อพัฒนาเทคนิค CACVD สำหรับสังเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำและเพิ่มความสามารถให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ผิวหน้าของฐานรองซิลิคอนที่ต่างกันเป็นปัจจัยสำคัญในการนิวเคลียส (Nucleation) และอัตราการนิวเคลียสของผลึกเพชรด้วยวิธี CACVD บนซิลิคอนที่มีลักษณะต่างกันจะมีค่าแตกต่างกันมาก โดยผลการสังเคราะห์จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และเทคนิค Raman spectroscopy ในการนำไปพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นจะพัฒนาอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊ส

Process of electronics device from diamond film by CACVD

Mr.Pitak Sawasittichey 50011100

Ms. Porntipa Suanprom 50011039

Ms.Wanatsanan Wamraksa 50011349

Dr. Yothin Wongprasert Advisor

Academic Year 2010

ABSTRACT

This project presents the technique of synthesis of diamond films using combustion activation chemical vapor deposition (CACVD) for synthesized semiconductor material which is developed for application in electronics devices. Different surface of silicon substrate is an important factor of nucleation in the synthesis of diamond films. The resulting of surface nucleation on different silicon are very different. The synthesized diamond films can be studied by Scanning Electron Microscope (SEM) and Raman spectroscopy. The development in electronics devices will developed gas sensor.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก ดร.โยธิน วงศ์ประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด คณะผู้จัดทำขอขอบคุณาณาไว้โอกาสนี้ด้วย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรอง.....	7
2.3 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM).....	7
2.4 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscope.....	9
2.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	13
2.6 การวิเคราะห์ด้วย Seebeck effect.....	15
บทที่ 3 การออกแบบและวิธีการทดลอง.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 การเตรียมชิ้นงาน.....	18
3.3 การทดลอง.....	19
บทที่ 4 การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	37
4.1 บทนำ.....	37
4.2 คุณสมบัติในอุณหภูมิสูง.....	39
4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	56
ภาคผนวก.....	58
บรรณานุกรม.....	62

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 เปรียบเทียบอัตราส่วนของการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ต่างๆ.....	2
2.1 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆของคาร์บอน.....	12
2.2 ค่า Inter-planar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติ (ASTM6-675).....	15
2.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Seebeck effect.....	16
3.1 สรุปเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	19
3.2 ความหนาแน่นการนิวเคลียสของผิวหน้าด้วยวิธีต่างๆ.....	21
3.3 เงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD.....	30
3.4 อัตราส่วนระหว่างก๊าซออกซิเจนกับโบเชทิลีน.....	31
3.5 ระยะระหว่างเปลวกับฐานรอง.....	32
3.6 เวลาในการสังเคราะห์.....	34
3.7 เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่หัวทิพขนาดต่าง ๆ.....	35
4.1 ค่าความต้านทาน (Ω) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	45

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.2 ค่าแรงดันพันซ์ทรู V_{pt} (V) ของชั้นความนำไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ.....	47
4.3 ค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	49
4.4 ค่าพิกัดความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาการไฮโดรเจน- เทอมินิตต่าง ๆ.....	51
4.5 ค่าความหนาแน่นประจุโฮลของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาการ ไฮโดรเจนเทอมินิตต่าง ๆ.....	51
4.6 ผลการทดลองการตรวจวัดการไฮโดรเจนโดยเลือกค่าความต้านทาน 2.7 และ 1.1 เมกกะโอห์ม.....	52

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรกับอุณหภูมิ.....	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ.....	6
2.3 ตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM.....	8
2.4 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น.....	11
2.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy.....	13
2.6 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก.....	14
2.7 แผนภาพการวิเคราะห์ด้วยปรากฏการณ์ Seebeck.....	16
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง.....	18
3.2 ลักษณะผิวที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	20
3.3 ภาพถ่ายการเกิดนิวคลีเอชันบนพื้นผิวต่างๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 5 นาที.....	22
3.4 ภาพถ่ายการเกิดนิวคลีเอชันบนพื้นผิวต่างๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 10 นาที.....	23
3.5 ภาพถ่ายการเกิดนิวคลีเอชันบนพื้นผิวต่างๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 15 นาที.....	24
3.6 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 5 นาที.....	25
3.7 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 10 นาที.....	26
3.8 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 15 นาที.....	26
3.9 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 20 นาที.....	27
3.10 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ความหนาต่างๆที่เวลาสังเคราะห์ 15 นาที.....	28
3.11 ตำแหน่งของเปลวไฟ.....	31
3.12 ความหนาของฟิล์มที่อัตราการไหลก๊าซต่างๆ.....	32
3.13 ลักษณะการเกิดของฟิล์มเพชรในระยะฐานรอง 0.0-0.4 mm.....	33
3.14 แผนภาพอัตราการโตที่เวลาต่างๆ.....	34
3.15 ขนาดของหวัทิพ.....	35
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรกับอุณหภูมิ.....	39
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ.....	40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ.....	41
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ.....	42
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการ ไฮโดรเจนเทอมีเนทที่อุณหภูมิ 500 °C.....	43
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการ ไฮโดรเจนเทอมีเนทที่อุณหภูมิ 600 °C.....	44
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการ ไฮโดรเจนเทอมีเนทที่อุณหภูมิ 700 °C.....	44
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจน เทอมีเนท.....	45
4.9 กราฟเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจน เทอมีเนท.....	46
4.10 แผนภาพการวัดชิ้นงานตัวอย่างของชั้นความนำเพชร.....	47
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจน เทอมีเนท.....	50
4.12 แผนภาพกระบวนการเกิด โฮล ในฟิล์มเพชร.....	50
4.13 กราฟแสดงการไฮโดรเจนเทอมีเนทที่ความต้านทาน 1.1 เมกกะโอห์ม.....	55
4.14 กราฟแสดงการไฮโดรเจนเทอมีเนทที่ความต้านทาน 2.6 เมกกะโอห์ม.....	55

บทที่ 1

บทนำ

วัตถุประสงค์

- ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CACVD (Combustion activation CVD)
- ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรและนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม
- ศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่เพื่อหาวิธีการที่ได้ผลดีที่สุด

ความเป็นมาของโครงการ

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากผลิตมาจากซิลิคอน (Silicon) และเจอร์เมเนียม (Germanium) ทำให้อุปกรณ์ส่วนมากมีขีดจำกัดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นกลุ่มงานบางประเภทจึงมีปัญหากับการใช้อุปกรณ์ที่ผลิตจากซิลิคอนและเจอร์เมเนียม ทางคณะผู้จัดทำจึงต้องการหาทางแก้ปัญหานี้ จึงได้จัดทำโครงการนี้ขึ้น เนื่องจากฟิล์มเพชรนั้นมีคุณสมบัติทางอุณหภูมิต่างแสง และมีการทนความดันสูง ที่ดีกว่า ฟิล์มเพชรมีส่วนประกอบหลักจากคาร์บอน (Carbon) และมีพันธะแบบ โคเวเลนต์ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะสูงมาก จึงทำให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุอื่นหลายประการ เช่น ความแข็ง ความหนาแน่น การนำความร้อน ค่าความยืดหยุ่น เป็นต้น

ตารางที่ 1.1 พบว่าวิธีการสังเคราะห์เพชรแบบ CACVD ทำให้มีอัตราการเกิดผลึกมากที่สุด ในขณะที่ใช้อุณหภูมิและความดัน ใกล้เคียงกับวิธีการอื่นๆ ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้วิธีการ Combustion activation CVD (CACVD) ในการทำโครงการครั้งนี้ และการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CACVD ยังมีข้อดีอีกหลายประการดังนี้

1. สามารถสังเคราะห์ในอากาศได้ ไม่ต้องใช้ Chamber และปั๊มสุญญากาศ
2. อุปกรณ์ที่ใช้หาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง
3. ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในขณะที่ทำการสังเคราะห์
4. มีอัตราการเกิดผลึกที่ค่อนข้างเร็ว
5. สามารถสังเคราะห์ให้ได้ฟิล์มเพชรในบริเวณกว้างๆ ได้
6. สามารถสังเคราะห์บนฐานรองที่เป็นส่วนโค้งได้

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบอัตราส่วนของการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ต่างๆ

Energy source	Typical ranges for growth parameters		
	Rate ($\mu\text{m/h}$)	Substrate temp ($^{\circ}\text{C}$)	Pressure (torr)
Hot filament	1 – 10	700-1,000	10-100
DC plasma	20	600-800	200
DC plasma jet	60	~1000	500-760
RF plasma	1-2	800-1,000	1-30
Microwave plasma	1-5	700 –1,000	5-100
Electron cyclotron resonance microwave plasma	-	400 - 600	< 10
Combustion activation	30 – 50	800- 1,000	760

ขอบเขตโครงการ

ศึกษากระบวนการสร้างฟิล์มเพชรโดยวิธี CACVD ให้ได้พื้นที่ตามที่กำหนดและทดสอบความเป็นสารกึ่งตัวนำ

ในการนำไปประยุกต์ใช้นั้นจะนำคุณสมบัติของความไวแสงและความไวต่อก๊าซมาใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซไฮโดรเจน ส่วนคุณสมบัติอื่นๆจะนำไปศึกษาต่อในโอกาสต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 บทนำ

เพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สุดและยังมีคุณสมบัติอื่นที่โดดเด่นมากมาย เช่น เพชรสามารถนำความร้อนที่อุณหภูมิห้องได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่นเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และยังเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีใดๆ เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้ทำให้เพชรสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในทางอุตสาหกรรมได้หลากหลาย เช่น นำไปทำเป็นเครื่องมือตัดพวกโลหะแข็ง หัวเจาะในเครื่องเจาะ เป็นต้น เนื่องจากมีความต้องการนำเพชรไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรม มากขึ้น ทำให้นักวิทยาศาสตร์พยายามค้นหาวิธีการสังเคราะห์เพชรขึ้นมาเองเพื่อตอบสนอง ต่อความต้องการใช้งานในทางภาคอุตสาหกรรมทดแทนการใช้เพชรธรรมชาติ ในปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์สามารถค้นพบวิธีการสังเคราะห์เพชรได้ 2 วิธี คือ วิธี HPHT (High Pressure High Temperature) ซึ่ง วิธีการสังเคราะห์เพชรวิธีนี้จะใช้หลักการที่จำลองมาจากกระบวนการเกิดเพชร ธรรมชาติ นั่นคือการ เปลี่ยนโครงสร้างผลึกของกราไฟต์ที่ความดันสูงและอุณหภูมิสูง (ความดันมากกว่า 100,000 บาร์ และ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 1000- 4000 องศาเซลเซียส) ในการสังเคราะห์เพชรวิธีนี้จะมีการเติมโลหะบางตัว เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ แมกนีเซียม และ โครเมียมหรือแทนทาลัม เข้าไปเพื่อทำหน้าที่ เปรียบเสมือนตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนวิธีการสังเคราะห์เพชรวิธีที่สองเรียกว่า วิธี LPLT (Low Pressure Low Temperature) ซึ่งวิธีการนี้เพชรที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปฟิล์มบางเพชร (Diamond polycrystalline thin film) บนวัสดุรองรับ (Substrate) วิธีสังเคราะห์เพชรวิธีนี้จะอาศัยเทคนิคการตกตะกอนไอระเหยของสารเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD) ซึ่งจะใช้อิระเหยของสารประกอบคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ สมบัติของฟิล์มบางเพชรที่ได้จะใกล้เคียงกับเพชรที่อยู่ในรูปของผลึกเดี่ยว การที่นักวิทยาศาสตร์ สามารถคิดค้นวิธีการสังเคราะห์เพชรให้อยู่ในรูปของฟิล์มบางได้สำเร็จทำให้ สามารถนำไป ประยุกต์ใช้งานในด้านอุตสาหกรรมได้หลากหลายมากกว่าเพชรที่อยู่ในรูปผลึก เดี่ยว เช่น นำไปทำเป็น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ชนิดเอ็นและชนิดพี, ตัวเซ็นเซอร์, ตัวระบายความร้อน (Heat sink) หรือนำไปทำเป็นหัวอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานในด้านเคมีไฟฟ้า เป็นต้น

ในช่วงเวลากว่า 50 ปีที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี LPLT ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์อย่างกว้างขวางทั้งนี้เป็นเพราะว่าต้นทุนในการสร้างอุปกรณ์เครื่องมือ ในวิธี LPLT จะถูกกว่าวิธี HPHT มากและเทคนิคที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชรในวิธี LPLT นี้มีหลากหลายเทคนิค เช่น Hot filament CVD Microwave plasma CVD, combustion flame เป็นต้น ในบรรดาเทคนิคต่างๆ เหล่านี้เทคนิค Hot Filament CVD จะเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมใช้ในการศึกษาวิจัยมากที่สุดทั้งนี้เป็นเพราะการสร้างเครื่องมืออุปกรณ์ทดลองง่ายและใช้ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ และในการงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Hot Filament CVD ที่ผ่านมามีส่วนใหญ่ใช้ก๊าซมีเทนเป็นแหล่งคาร์บอนและสังเคราะห์ภายใต้สภาวะความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ แต่งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศและใช้แหล่งคาร์บอนที่อยู่ในรูปของสารละลายจำพวกแอลกอฮอล์หรือสารประกอบอื่นๆ ยังไม่แพร่หลาย ซึ่งจุดเด่นของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่สภาวะความดันบรรยากาศคือ อัตราการโตของฟิล์มจะมีค่าสูงกว่าการสังเคราะห์ที่สภาวะความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากวิธี CACVD สามารถสังเคราะห์บนฐานรองได้หลายชนิดเช่น ฐานรองที่ไม่ใช่เพชร ฐานรองที่เป็นฉนวน ฐานรองสารกึ่งตัวนำ และฐานรองโลหะ ในการสังเคราะห์สามารถสังเคราะห์ได้ตั้งแต่เล็กเดี่ยว ฟิล์ม หรือฟิล์มอะมอร์ฟัส โครงสร้างของเพชรเกิดจากพันธะโควาเลนต์ซึ่งมีความแข็งแรงมาก จึงทำให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุอื่นๆ หลายประการ เช่น ความแข็ง ความหนาแน่น ความนำความร้อน ค่าความยืดหยุ่น และค่า Bulk modulus ดีกว่าวัสดุอื่นๆ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนต่ำมาก คุณสมบัติต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

ความนำความร้อน (Thermal conductivity)

เพชรมีค่าความนำความร้อนสูงที่สุดคือมีค่า $20 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ

ความจุความร้อนต่อโมล (Molar heat capacity)

ค่าความจุความร้อนต่อโมล หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารที่มีปริมาณหนึ่งโมลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา ค่าความจุความร้อนต่อโมลของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ

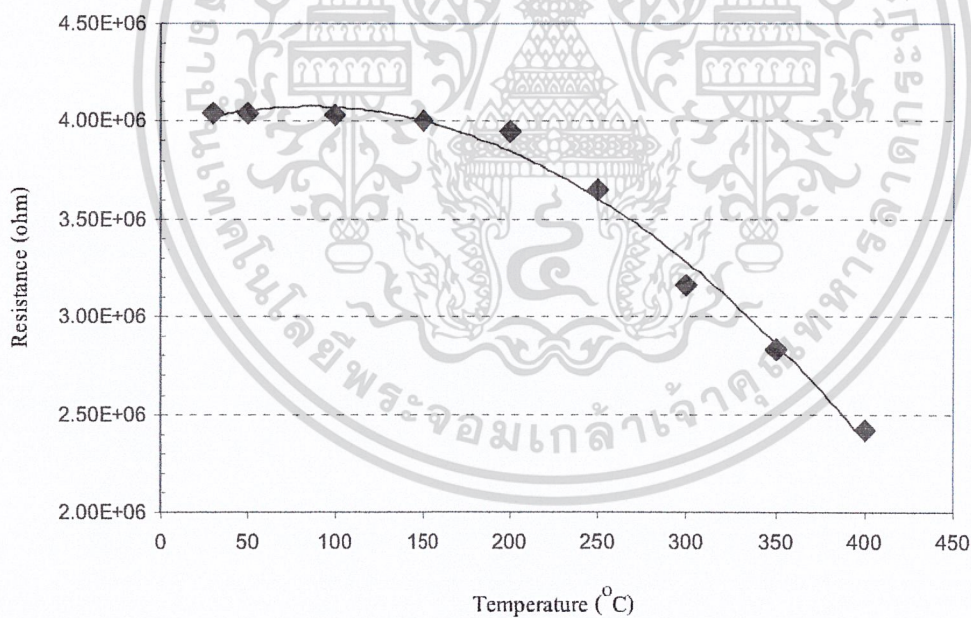
แสดงว่าเพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีหรือเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อน

คุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง $1,800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า $2,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

ในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ $2.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง $10^{16} \Omega\cdot\text{cm}$

2.1.1 คุณสมบัติในอุณหภูมิสูง

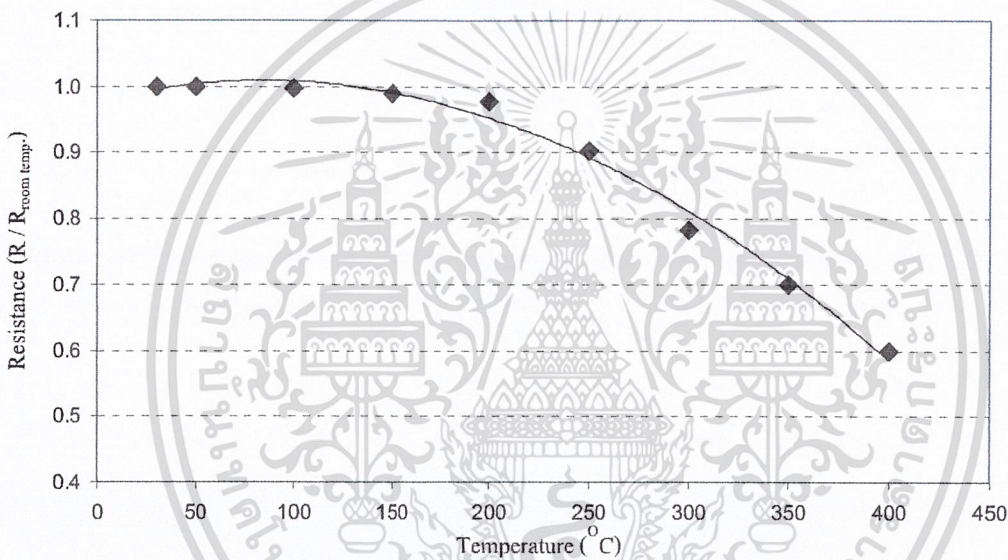
การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องทราบว่ามีความสัมพันธ์เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สภาพความต้านทานลดลง เพราะมีประจุพาหะเกิดเพิ่มขึ้นทั้งโฮลและอิเล็กตรอนจึงทำให้ความต้านทานลดลง คุณสมบัตินี้เป็นลักษณะพิเศษของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 2.1 พบว่าความต้านทานของฟิล์มเพชรแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ นั่นคือที่อุณหภูมิเพิ่มฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานจะลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วง

อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250°C ขึ้นไปค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น $2.42\text{ M}\Omega$ ที่อุณหภูมิ 400°C เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้องแสดงดังรูปที่ 2.2 พบว่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำต่อความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง (30°C) การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30°C จนถึง 200°C เล็กน้อยมากคือน้อยกว่า $0.000-0.022$ โดยที่อุณหภูมิ 250°C ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น จึงพอสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรนี้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200°C ซึ่งการวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานกับอุณหภูมิก็น่าเพียงพอสำหรับการสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ และสามารถนำไปใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิสูงได้



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ

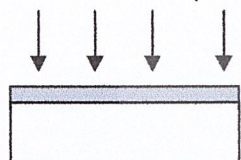
2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมินท พบว่า มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยความหนา และความหนาแน่นของโฮลของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้ จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์

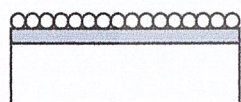
2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรอง

โดยทั่วไปความหนาแน่นในการเกิดนิวคลีเอชันมากเป็นผลให้ฟิล์มมีความเรียบมากและมีความสม่ำเสมอของฟิล์ม การนิวคลีเอชันมีปัจจัยที่สำคัญดังนี้

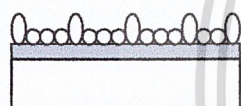
Gas Phase $\text{CH}_4 + \text{H}_2$



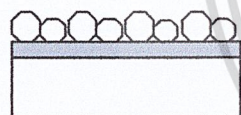
1. มีช่วงเวลาที่ใช้ในการก่อตัวระยะหนึ่งซึ่งช่วงเวลานี้จะเกิดการแพร่ของอะตอมคาร์บอนเข้าไปในฐานรอง ทำให้เกิดชั้น Intermediate layer ขึ้น



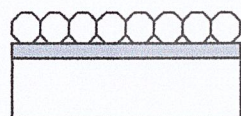
2. เกิดการนิวคลีเอชันผลึกเดี่ยวๆบนพื้นผิวฐานรอง



3. เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและผลึกเดี่ยวๆมีความหนาแน่นมากขึ้น การนิวคลีเอชันฐานรองจะสิ้นสุดลงและเริ่มเกิดผลึกเพชร



4. มีการเชื่อมต่อกันระหว่างผลึกเพชรเดี่ยวๆ กับผลึกเพชรข้างเคียง



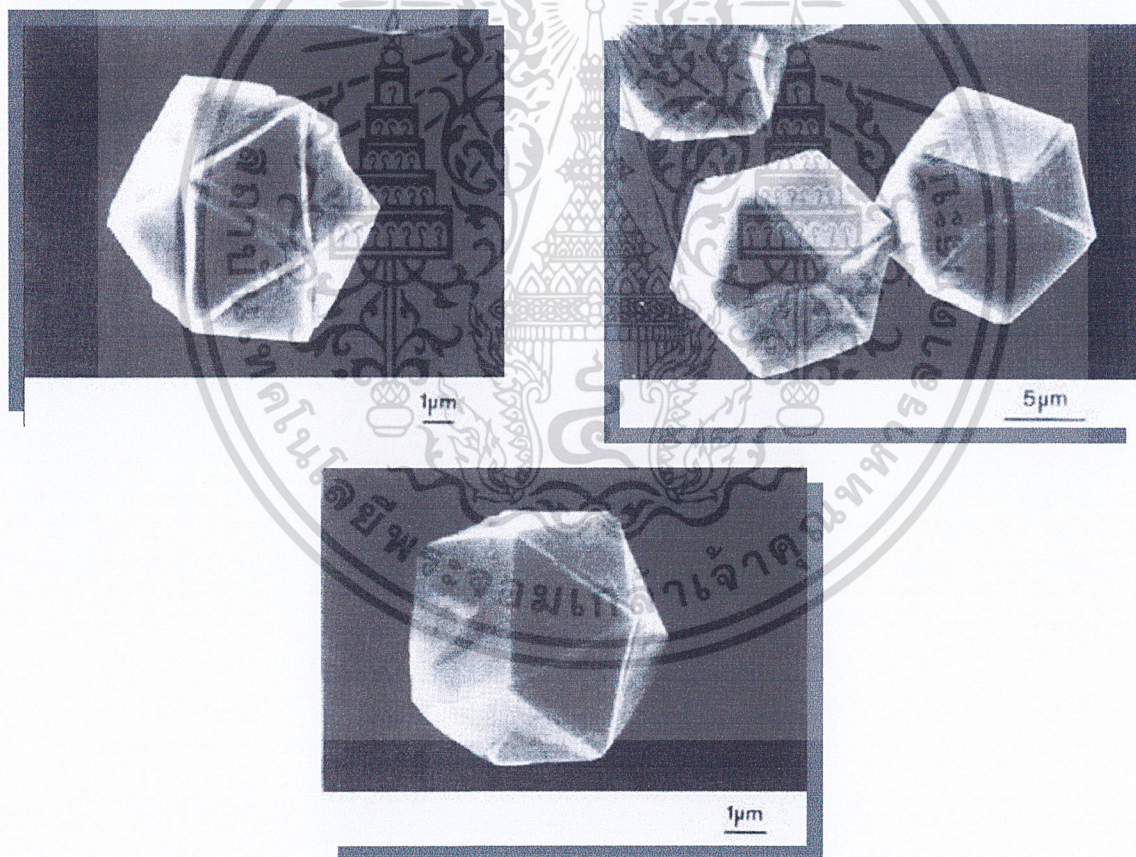
5. เกิดการจับตัวเป็นฟิล์มเพชรอย่างต่อเนื่อง

2.3 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

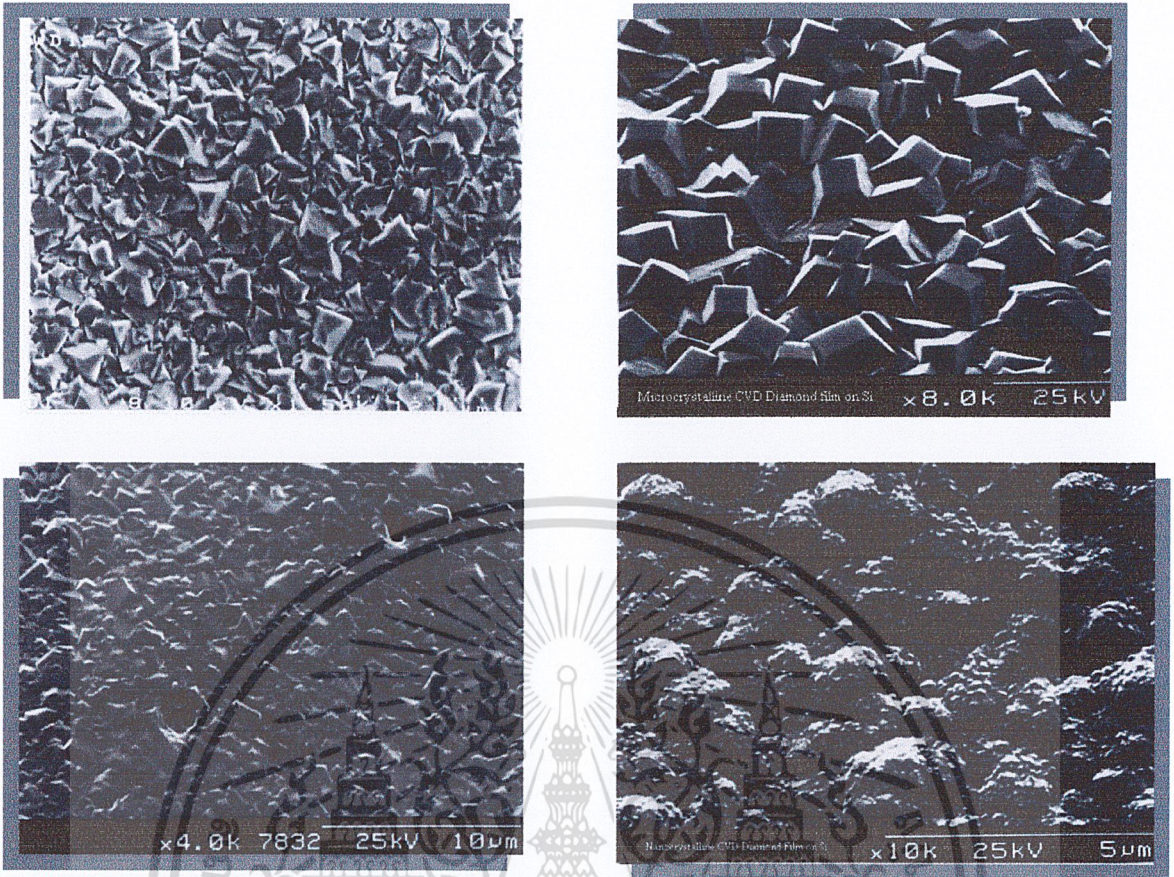
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการศึกษาลักษณะของผิวชิ้นงาน โดยมีกำลังขยาย 50 – 40,000 เท่า สามารถแสดงผลเป็นภาพสามมิติ มีความคมชัดสูงถึง 2.5 – 10 μm โดยหลักการทำงานของ SEM ทำให้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน (μm) หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว

ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ

SEM สามารถใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับชิ้นงานตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อน แต่ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่มีความนำไฟฟ้าก่อนการวิเคราะห์ต้องนำไปเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าก่อน ทั่วไปนิยมใช้ ทองคำหรือคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง Si สามารถที่จะวิเคราะห์วัดด้วย SEM ได้โดยไม่ต้องนำไปเคลือบชั้นบางทองคำหรือคาร์บอน ข้อควรระวังในการวิเคราะห์คือควรใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำ ๆ จะช่วยลดการสะสมประจุบนฟิล์ม



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการวัดความหนาของฟิล์มเพชรที่ได้จากภาพถ่าย SEM (ต่อ)

2.4 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและแกรไฟต์สูง แม้ว่าจะมีแกรไฟต์เพียงเล็กน้อยก็ตามเนื่องจากประสิทธิภาพการกระเจิงของแกรไฟต์มีค่ามากกว่าของเพชรมาก ตำแหน่งและความกว้างของยอดกราฟจาก Raman spectrum เป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่วิเคราะห์ได้

หลักการพื้นฐานของ Raman spectroscopy คือใช้การสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสารหรือผิวหน้าของผลึก ทำให้สามารถแยกความแตกต่างของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนได้ การทำงานของ Raman spectroscopy อาศัยปรากฏการณ์การกระเจิงทางแสง โดยหลักการของปรากฏการณ์ดังกล่าวคือการวัดการลดลงของความเข้มของลำแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีการ

ดูคลื่น ผลของ Raman จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การกระเจิงของโมเลกุล ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการชนกันระหว่างโฟตอนกับการสั่นของโครงผลึกหรือ โฟนอน ทำให้เกิดคู่ของโฟตอนและโฟนอน สนามไฟฟ้าของความเข้มลำแสงเป็นตัวบังคับให้แสง มีคลื่นไปทางเดียวในผลึก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Polarizability ดังสมการ

$$P = \alpha E$$

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) :

$$P = E_0 \alpha_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + \frac{1}{2} E_0 \sum \alpha_n \left\{ \cos 2\pi(\nu_0 - \nu_n)t + \cos 2\pi(\nu_0 + \nu_n)t \right\} \quad (2.2)$$

โดยที่ E_0 คือ สนามไฟฟ้าของลำแสงที่ตกกระทบ

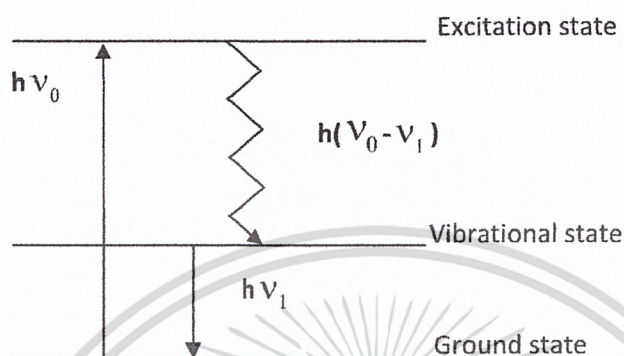
t คือ เวลา

ν_0 คือ ความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ

ν_n คือ ความถี่ของโฟนอน

α_n คือ Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

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



รูปที่ 2.4 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น

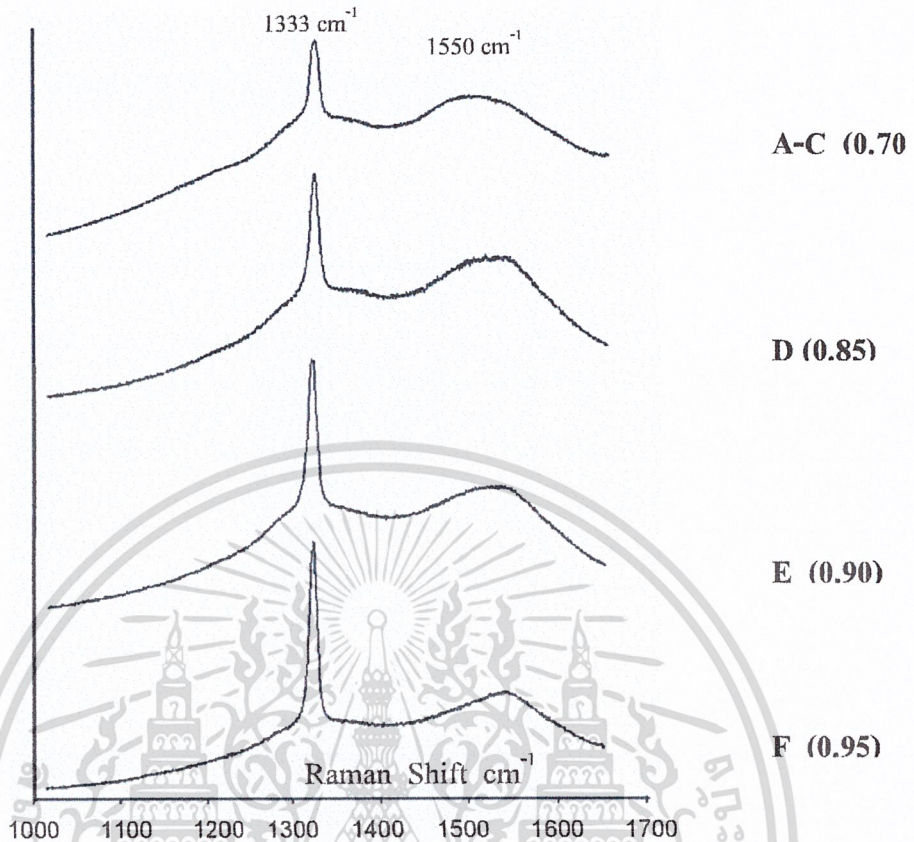
จากรูปด้านบน แสดงให้เห็นถึงการเกิดปรากฏการณ์ Raman scattering เมื่อยิงลำแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในชิ้นงานตัวอย่าง โฟตอนจากลำแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน $h\nu_0$ จะเข้าไปอิเล็กตรอนของอะตอมชิ้นงานตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานไปบางส่วน ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเกิดการกระโดดข้ามไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า “สถานะกระตุ้น” (Excitation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

จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร แกรไฟต์ อัญฐานคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอนแสดงในตารางด้านล่าง

ตารางที่ 2.1 ค่ายอดของ 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 $1,550 \text{ cm}^{-1}$ 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

Relative Intensity



รูปที่ 2.5 แผนภาพค่ายอดของ Raman spectrum

2.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) จะใช้พื้นฐานจาก “Bragg’s diffraction law” ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการง่าย ๆ ได้ดังสมการ 2.3 โดยคิดว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบในโครงผลึก ซึ่งสมการของ Bragg พิจารณาจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบในโครงผลึก P_1 และ P_2 ที่ขนานกันดังแสดงใน รูปที่ 2.3

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 ออกมาทำ

มุม θ เสมือนมีการสะท้อนออกมาของรังสีเอ็กซ์จะให้ความเข้มรังสีเอ็กซ์สูงสุด หรือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมขึ้น (In phase) โดยจากรูปมุม $\widehat{AOC} = \widehat{BOC} = \theta$ เพราะฉะนั้น $AC = BC = d \sin \theta$ ซึ่งจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันเมื่อ

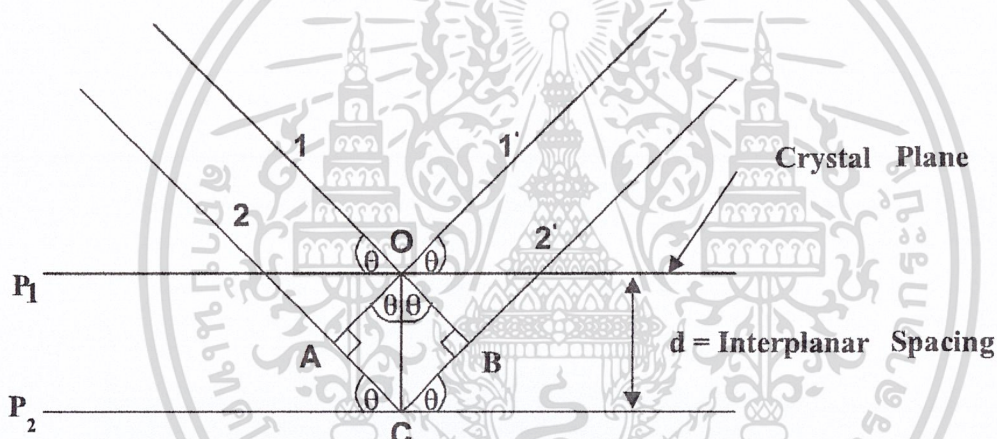
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.3)$$

เมื่อ d = Interplanar spacing

θ = มุม Diffraction

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

λ = ความยาวคลื่น



รูปที่ 2.6 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก

จะเห็นว่าการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จะทำมุม θ กับ Crystal plane และทำมุม 2θ เมื่อเทียบกับลำดับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ

สำหรับฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้วัดหาค่าตัวแปรของโครงสร้างผลึกและพิจารณาลักษณะรูปทรงของฟิล์มได้ รูปแบบคุณลักษณะของผลึกรวมของเพชรที่ได้มีลักษณะต้องมีย่านใหญ่ (ประมาณ 10 nm หรือ มากกว่านั้น) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกของเพชรเป็นแบบ Cubic ซึ่งมีความสมมาตรสูง การคำนวณแฟคเตอร์ของโครงสร้างทำให้ระนาบของการเลี้ยวเบนมีจำนวนน้อย (ระนาบของการเลี้ยวเบนที่ได้ $\{hkl\}$ คือ $\{111\}$, $\{220\}$, $\{311\}$, $\{400\}$, $\{331\}$ และอื่น ๆ โดย h, k, l จะเป็นเลขคู่ทั้งหมดหรือเลขคี่ทั้งหมดและ $h + k + l = 4n$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม) นอกจากนี้ในกรณีที่ระนาบผลึกมีรูปแบบต่าง ๆ

กันพบว่าการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบ {111} จะมีความแรงสูงสุดและการที่เส้นการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์มีการเลื่อนหรือเกิดแถบกว้างขึ้น เป็นผลมาจากตำหนิหรือขนาดของผลึกที่เล็กลงไป รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ บนพื้นผิวฟิล์มที่มีระนาบ {111} และ {100} แสดงได้ ซึ่งค่า Interplanar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่า Inter-planar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติ (ASTM6-675)

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

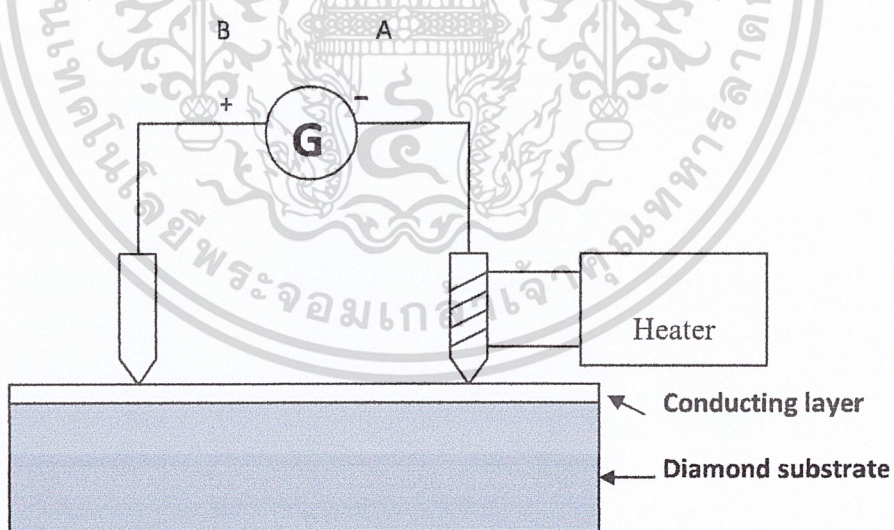
2.6 การวิเคราะห์ด้วย Seebeck effect

ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการทำให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่ปลายด้านหนึ่งซึ่งทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามแท่งวัสดุความร้อน และพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นคือมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุพาหะ เนื่องจากความเข้มของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความเข้มข้นของประจุพาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะในแง่วัสดุขึ้น จาก

หลักการดังกล่าวจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรว่ามีพาหะหลักชนิดใด การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าวจะใช้อุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 2.4 จากรูปที่ 2.4 พบว่าชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเจม 2 เล่ม กคบนฟิล์มเพชรโดยเจม A ทำหน้าที่เป็นเจมร้อนมีลวดทั้งสเดนพันอยู่โดยรอบ ส่วนเจม B ทำหน้าที่เป็นเจมเย็นที่อุณหภูมิห้อง นำกัลป์วานอ-มิเตอร์มาต่อระหว่างเจมทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกของกัลป์วานอมิเตอร์ต่อกับเจม B และที่ขั้วลบต่อกับเจม A เมื่อให้ความร้อนกับเจม A ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Seebeck effect

กัลป์วานอมิเตอร์	ชนิดประจุพาหะ
บวก	โฮล
ลบ	อิเล็กตรอน
ศูนย์	โฮล เท่ากับ อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.7 แผนภาพการวิเคราะห์ด้วยปรากฏการณ์ Seebeck

บทที่ 3

การออกแบบและวิธีการทดลอง

ในบทนี้นำเสนอกลไกการเกิดฟิล์มเพชรจากกระบวนการ CVD เนื่องจากการเกิดของฟิล์มเพชรนั้นต้องมีความเข้าใจในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีในสถานะก๊าซที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง โดยศึกษากระบวนการแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามลักษณะของฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งเน้นการวิเคราะห์จากปฏิกิริยาก๊าซเปลวไฟ ปฏิกิริยาที่ผิวฐานรอง และปรากฏการณ์นิวคลีเอชัน การอภิปรายผลการสังเคราะห์นั้นจะกล่าวโดยละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

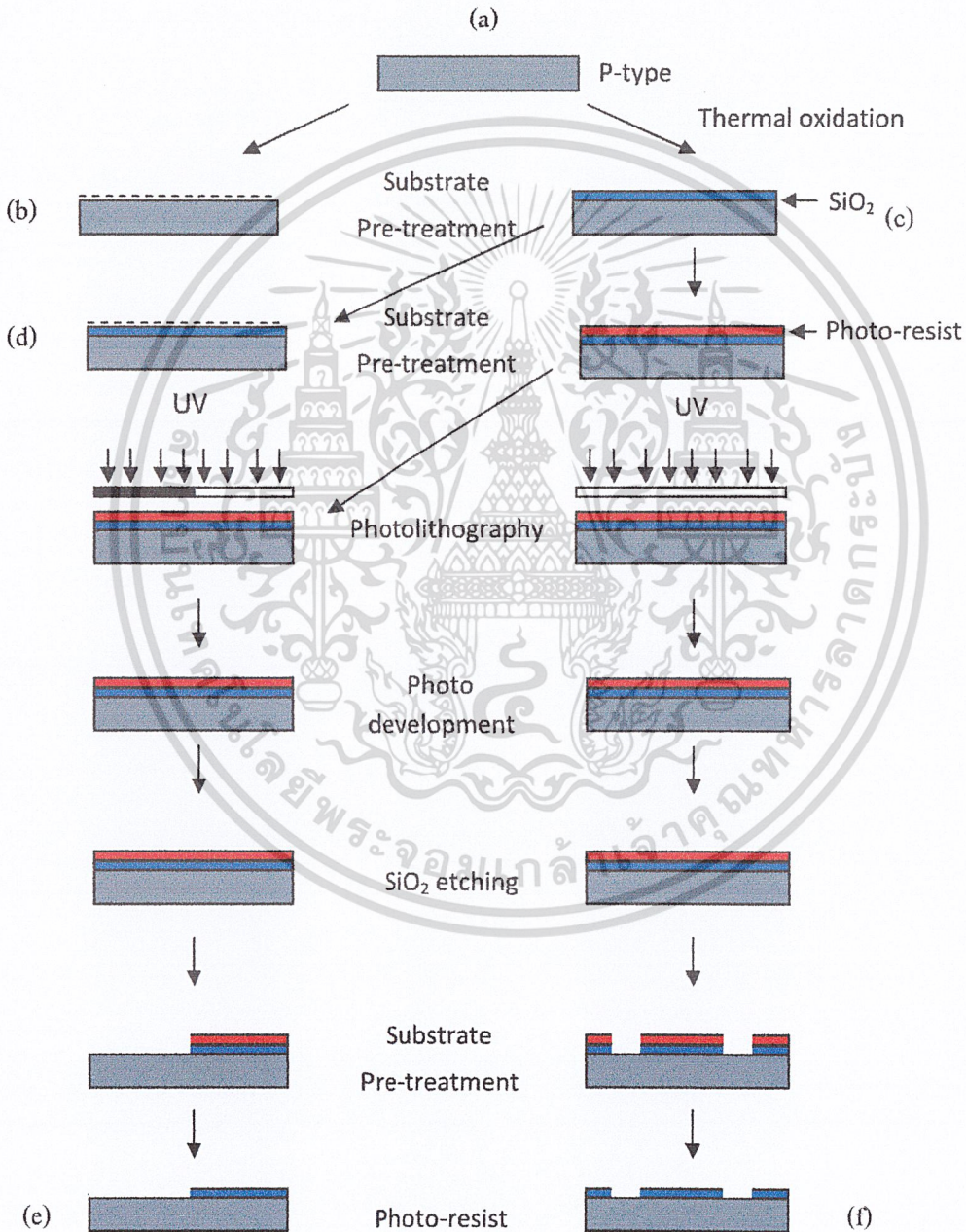
3.1 บทนำ

ความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันจะใช้ภาพถ่ายซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นของการเกิด นิวคลีเอชัน ขนาดเฉลี่ยของผลึก ความสม่ำเสมอ ลักษณะพื้นผิวที่ผ่านกระบวนการเตรียมฐานรอง และความเรียบของฟิล์มเพชร โดยทั่วไปความหนาแน่นในการเกิดนิวคลีเอชันมากเป็นผลให้ฟิล์มมีความเรียบมากและมีความสม่ำเสมอของฟิล์ม การนิวคลีเอชันมีปัจจัยที่สำคัญดังนี้

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

3.2 การเตรียมชิ้นงาน

ในเตรียมชุดเครื่องมือในการสังเคราะห์จะมีรายละเอียดในภาคผนวก ซึ่งเป็นชุดทดลองที่ออกแบบมาเพื่อการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ได้กำหนดขึ้นจากวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ ในการเตรียมชิ้นงานได้แก่ กระบวนการทำความสะอาดฐานรองด้วยกระบวนการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อทำความสะอาดฐานรองแล้วนำฐานรองผ่านกระบวนการเตรียมผิวหน้าแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

3.3 การทดลอง

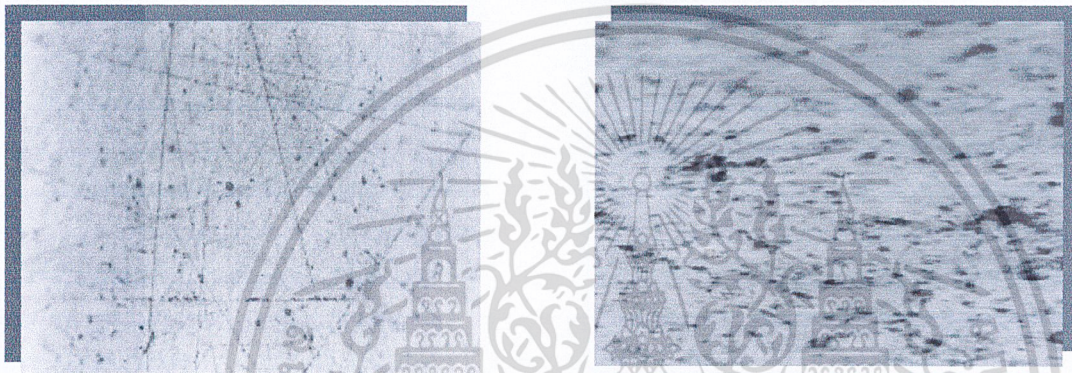
ในการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ใช้หัวเชื่อมก๊าซซึ่งผสมกันระหว่างก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนบนฐานรองซิลิคอนภายในบรรยากาศโดยฐานรองถูกเตรียมผิวหน้าด้วยการขัดด้วยครีมเพชรขนาด $0.25 \mu\text{m}$. อัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด $0.5 \mu\text{m}$. [28-29] เนื่องจากเป็นขนาดของครีมที่เล็กและขนาดผงเพชรขนาดใหญ่เป็นผลให้ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันมาก เมื่อคำนวณปริมาตรของก๊าซตั้งต้นและก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ในระบบซึ่งได้แก่ ออกซิเจน อะเซทิลีน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และน้ำ เพื่อนำไปอธิบายปรากฏการณ์เกิดการนิวคลีเอชัน และฟิล์มเพชรในที่สุด ค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการนิวคลีเอชันและฟิล์มเพชรสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 โดยแต่ละส่วนของการทดลองจะเลือกตัวแปรต่างๆ ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สรุปเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ตัวแปร	เงื่อนไขการทดลอง
อัตราส่วนก๊าซออกซิเจนกับอะเซทิลีน	0.7 - 0.95 โดยปริมาตร
ขนาดของหัวเชื่อม	100
ฐานรอง	ซิลิคอนขัดมัน ซิลิคอนขัดด้วยครีมเพชร ซิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชร ซิลิคอนไดออกไซด์ และซิลิคอนไดออกไซด์อัลตราโซนิกในผงเพชร
อุณหภูมิฐานรอง	$500-1,350 \text{ }^{\circ}\text{C}$
ระยะห่างระหว่างเปลวกับฐานรอง	เปลวชั้นกลาง และเปลวชั้นนอก (0.1 - 1.1 mm)
เวลาในการสังเคราะห์	5 - 20 นาที

ในการทดลองการสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองชนิดต่างๆนี้เป็นการศึกษาถึงการนิวคลีเอชันของฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการเตรียมพื้นผิวด้วยเทคนิคต่าง ๆ กัน[27, 30-32] ดังนี้

1. ผิวหน้าซิลิคอนขัดมัน
2. ผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์
3. ผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์อัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด 0.5 μm
4. ผิวหน้าซิลิคอนที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm
5. ผิวหน้าซิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด 0.5 μm



ซิลิคอนขัดด้วยครีมเพชร

ซิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชร

รูปที่ 3.2 ลักษณะผิวที่ใช้ในการสังเคราะห์

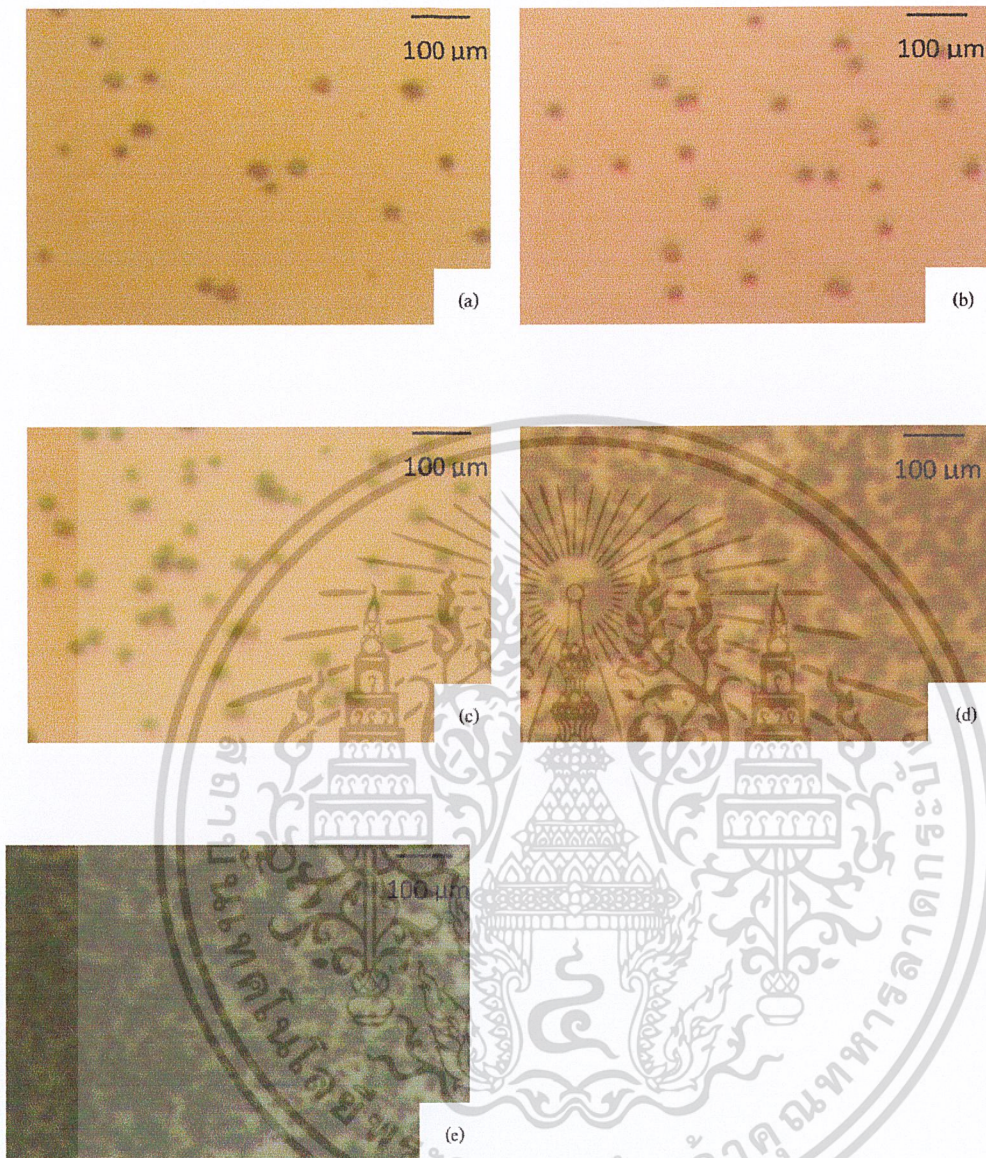
ลักษณะผิวหน้าของซิลิคอนที่เตรียมด้วยวิธีการขัดด้วยครีมเพชรและการอัลตราโซนิกในผงเพชรแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ 5 10 และ 15 นาที จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรจะเกิดขึ้นน้อยมากบนพื้นผิวที่มีความเรียบได้แก่ซิลิคอนไดออกไซด์ และผิวซิลิคอนขัดมัน แต่พื้นผิวที่มีรอยขีดจากครีมเพชรหรืออัลตราโซนิกในผงเพชรความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรมากแสดงดังรูปที่ 3.2-3.16 ซึ่งผลการทดลองสามารถแบ่งตามความหนาแน่นการนิวคลีเอชันได้แก่ วัสดุป้องกันการนิวคลีเอชันและวัสดุกระตุ้นการนิวคลีเอชัน โดยควาหนาแน่นการนิวคลีเอชันของวัสดุต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของผิวหน้าด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการเตรียมพื้นผิว	ความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน (cm^{-2})
ซิลิคอน	
- ขัดเป็นขัดมัน	8×10^3
- ขัดด้วยครีมเพชรขนาด $0.25 \mu\text{m}$	6×10^8
- อัลตราโซนิคในผงเพชรขนาด $0.5 \mu\text{m}$	4×10^9
ซิลิคอนไดออกไซด์	
- ซิลิคอนไดออกไซด์	2×10^4
- อัลตราโซนิคในผงเพชรขนาด $0.5 \mu\text{m}$	5×10^5

ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของการเกิดฟิล์มเพชรแต่มีความสำคัญอย่างมากเพราะถ้ามีความหนาแน่นการนิวคลีเอชันมาก[33-36] แต่ไม่มีความสม่ำเสมอก็ไม่เป็นผลดีต่อฟิล์มเพชร เนื่องจากฟิล์มที่มีการนิวคลีเอชันที่ไม่สม่ำเสมอจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของผลึกแตกต่างกันเป็นผลให้ฟิล์มเพชรที่ได้มีค่าความหนาที่ไม่เท่ากัน

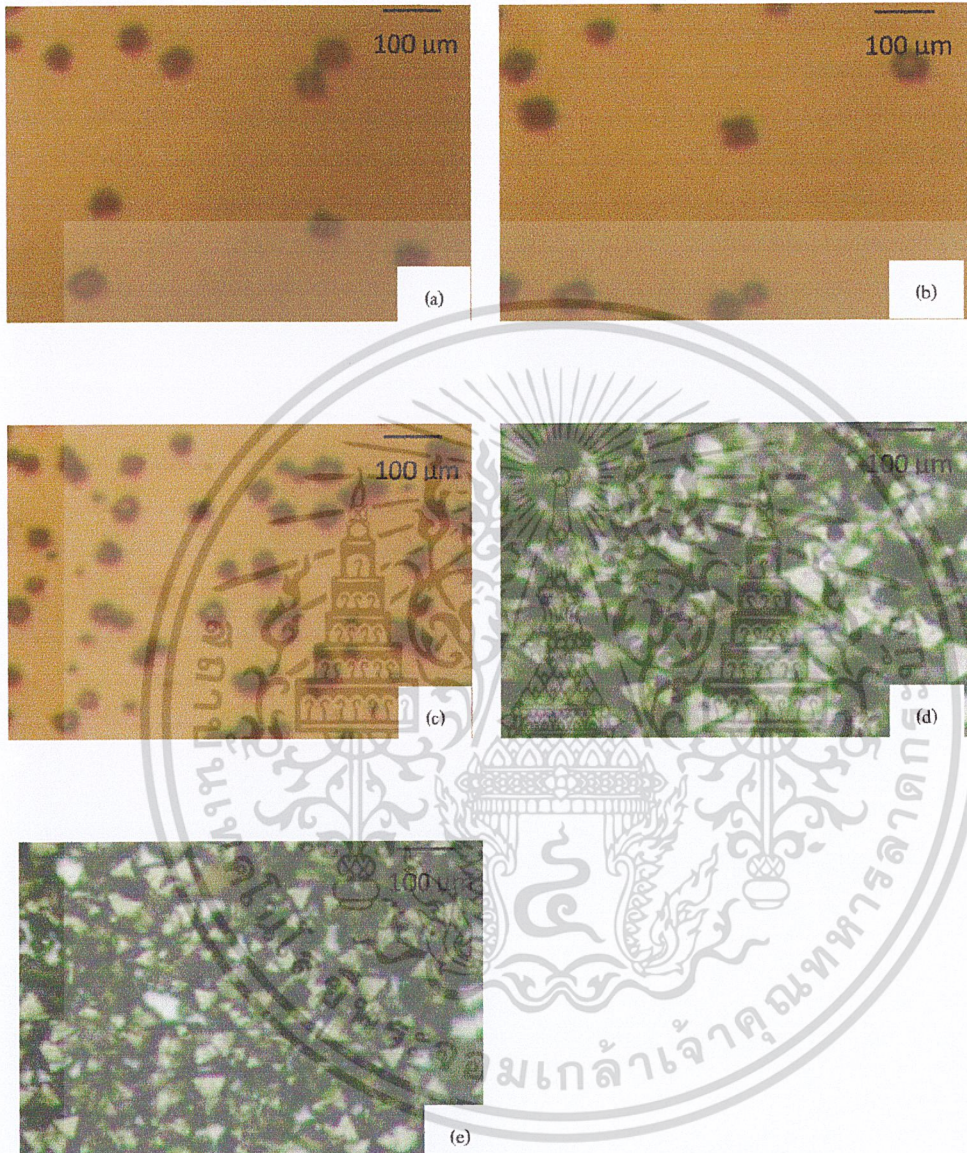
การหาค่าความหนาแน่นจะใช้วิธีสุ่มนับจำนวนของนิวคลีเอชันที่เกิดขึ้นที่เวลาสังเคราะห์ที่ 5 นาทีดังรูปที่ 3.3 และหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน ผลการสังเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างความหนาแน่นการนิวคลีเอชันอย่างเด่นชัด และทำการสังเคราะห์ที่เวลา 10 และ 15 นาที เพื่อหาเวลาสังเคราะห์ที่น้อยสุดในการเกิดเป็นฟิล์มเพชร



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายการนิวเคลียเอนบนพื้นผิวต่าง ๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 5 นาที

- (a) ซิลิโคนขัดมัน
- (b) ซิลิโคนไดออกไซด์
- (c) ซิลิโคนไดออกไซด์อัลตราโซนิคในผงเพชร
- (d) ซิลิโคนขัดด้วยครีมเพชร
- (e) ซิลิโคนอัลตราโซนิคในผงเพชร

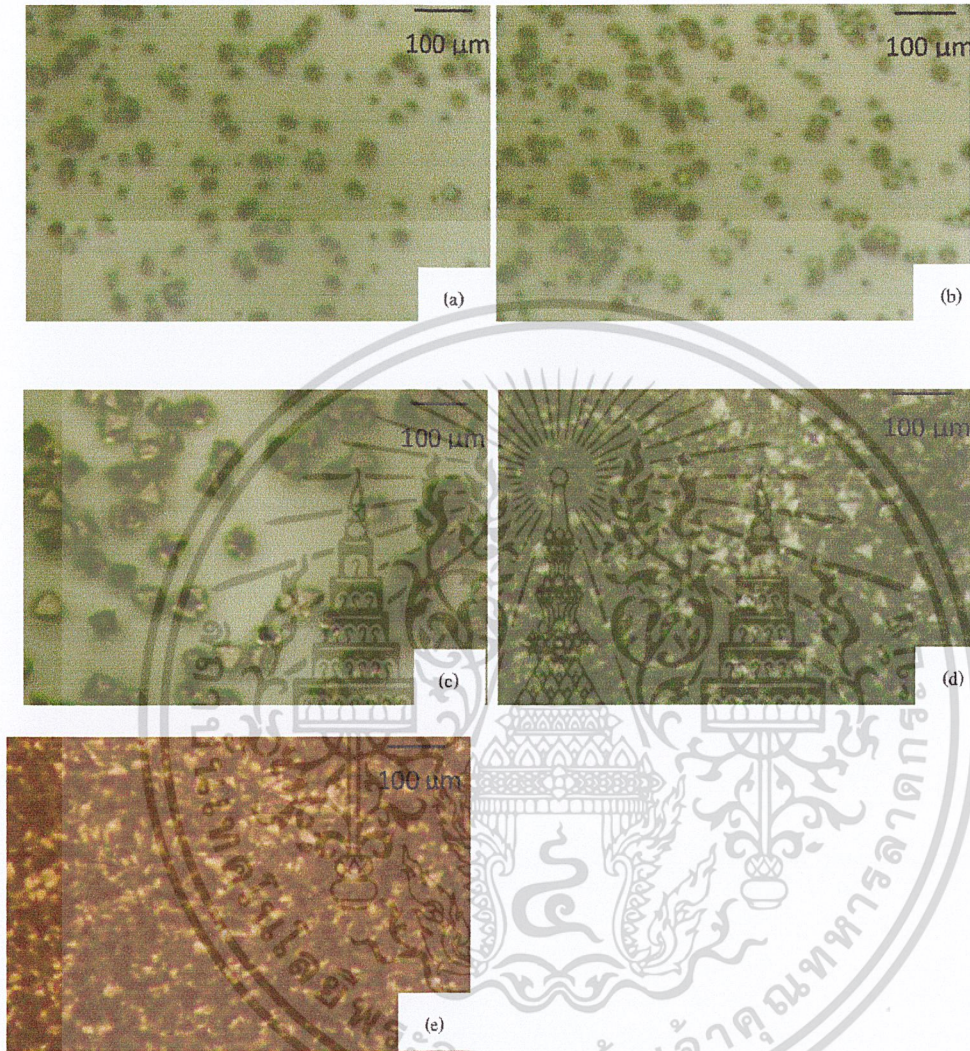
จากรูปที่ 3.3 การนวดถี่เอชขึ้นนั้นสามารถเกิดได้บนผิวหนังชิลิคอนไดออกไซด์ และ ชิลิคอนไดออกไซด์ที่อัลตราโซนิกในผงเพชร และที่ผิวหนังชิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชรมีความหนาแน่นสูงที่สุด และทำการทดลองโดยใช้เวลาสังเคราะห์เป็น 10 นาที ผลการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายการเกิดนิวคลีโอซันบนพื้นผิวต่าง ๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 10 นาที

- (a) ชิลิคอนน้ำมัน
- (b) ชิลิคอน ไดออกไซด์
- (c) ชิลิคอน ไดออกไซด์อัลตราโซนิกในผงเพชร
- (d) ชิลิคอนขัดด้วยครีมเพชร
- (e) ชิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชร

จากรูปที่ 3.4 เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีผลึกเพชรขนาดเล็กเกิดกันต่อเนื่องจนเกิดเป็นฟิล์มเพชรซึ่งเกิดบนฐานรองซิลิคอนที่มีการเตรียมพื้นผิวเท่านั้น แต่ผลึกบนซิลิคอนไดออกไซด์จะมีขนาดของผลึกขนาดใหญ่กระจายทั่วทั้งฐานรอง และทำการสังเคราะห์โดยใช้เวลาเท่ากับ 15 นาที ผลการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายการเกิดนิวคลีเอชันบนพื้นผิวต่าง ๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 15 นาที

- (a) ซิลิคอนขัดมัน
- (b) ซิลิคอนไดออกไซด์
- (c) ซิลิคอนไดออกไซด์อัตราโซนิกในผงเพชร
- (d) ซิลิคอนขัดด้วยครีมเพชร
- (e) ซิลิคอนอัตราโซนิกในผงเพชร

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวัสดุที่เหมาะสมกับการเป็นตัวป้องกันการเกิดนิวคลีเอชัน ได้แก่ ซิลิโคนขี้ดมัน ซิลิโคนไดออกไซด์และซิลิโคนไดออกไซด์อัลตราโซนิคในผงเพชร ส่วนวัสดุที่ใช้เป็นตัวกระตุ้น ได้แก่ซิลิโคนที่อัลตราโซนิคในผงเพชร ซึ่งมีความหนาแน่นการนิวคลีเอชันแตกต่างกันประมาณ 100,000 เท่า และขนาดของผลึกที่เกิดบนผิววัสดุเรียบจะมีขนาดใหญ่ แต่ที่บริเวณที่มีการเตรียมผิวหน้าจะมีขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาถึงความสม่ำเสมอของผลึกแล้วพบว่าผิวหน้าที่อัลตราโซนิคในผงเพชรมีความสม่ำเสมอดีกว่าการขัด เพราะการขัดด้วยครีมีเพชรมีขีดจำกัดเนื่องจากขึ้นกับประสบการณ์ในการขัดซึ่งไม่สามารถควบคุมได้

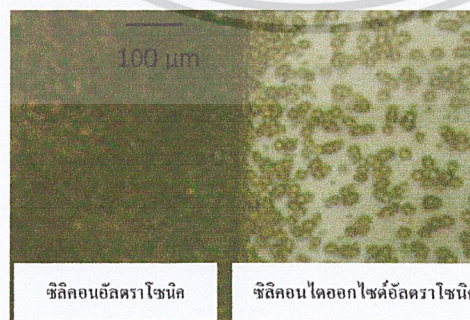
เมื่อเลือกวัสดุที่ป้องกันและกระตุ้นการเกิดนิวคลีเอชันแล้วต่อไปจะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยทำการสังเคราะห์ในเวลาเดียวกันทั้งสองวัสดุ จึงต้องมีกระบวนการเตรียมฐานรองซึ่งมีสองวัสดุดังนี้

- ซิลิโคนอัลตราโซนิคกับซิลิโคนขี้ดมัน
- ซิลิโคนอัลตราโซนิคกับซิลิโคนไดออกไซด์
- ซิลิโคนอัลตราโซนิคกับซิลิโคนไดออกไซด์อัลตราโซนิค

การสังเคราะห์ใช้เวลา 5, 10, และ 15 นาที เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป ผลการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.6 - 3.9

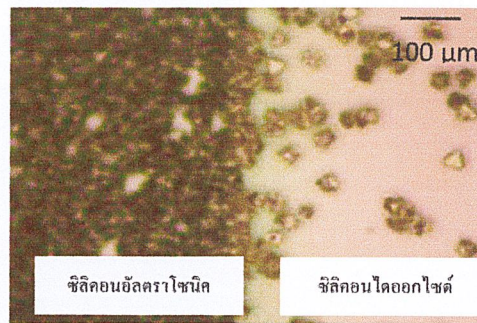
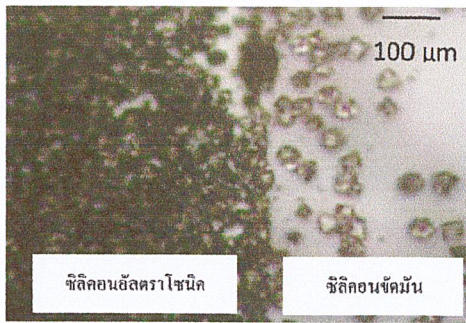


(a) ซิลิโคนอัลตราโซนิคกับซิลิโคนขี้ดมัน (b) ซิลิโคนอัลตราโซนิคกับซิลิโคนไดออกไซด์



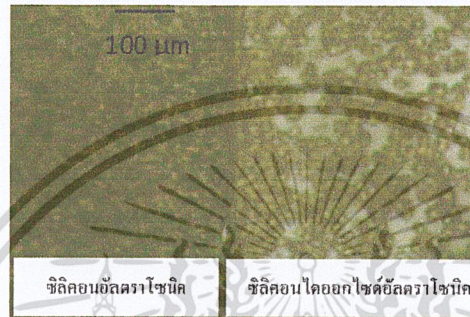
(c) ซิลิโคนอัลตราโซนิคกับซิลิโคนไดออกไซด์อัลตราโซนิค

รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 5 นาที



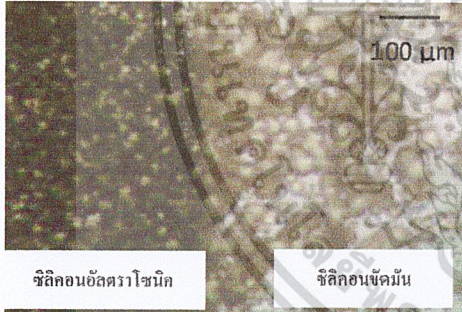
(a) ซิลิคอนอัลตราไชนิกกับซิลิคอนน้ำมัน

(b) ซิลิคอนอัลตราไชนิกกับซิลิคอนไดออกไซด์



(c) ซิลิคอนอัลตราไชนิกกับซิลิคอนไดออกไซด์อัลตราไชนิก

รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 10 นาที



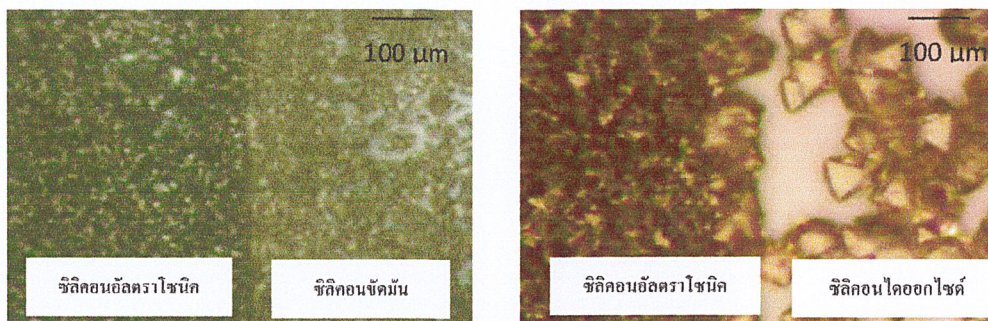
(a) ซิลิคอนอัลตราไชนิกกับซิลิคอนน้ำมัน

(b) ซิลิคอนอัลตราไชนิกกับซิลิคอนไดออกไซด์



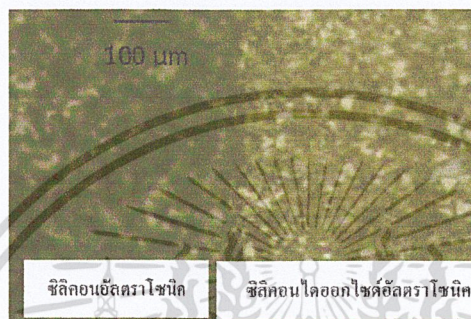
(c) ซิลิคอนอัลตราไชนิกกับซิลิคอนไดออกไซด์อัลตราไชนิก

รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 15 นาที



(a) ซิลิคอนอัลตราโซนิคกับซิลิคอนซัดมัน

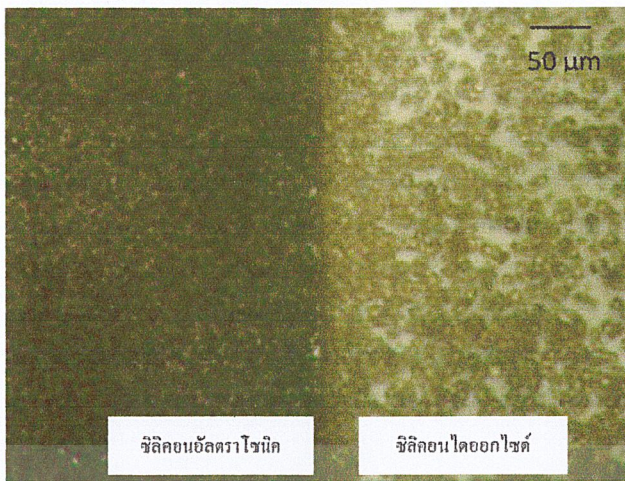
(b) ซิลิคอนอัลตราโซนิคกับซิลิคอนไดออกไซด์



(c) ซิลิคอนอัลตราโซนิคกับซิลิคอนไดออกไซด์อัลตราโซนิค

รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 20 นาที

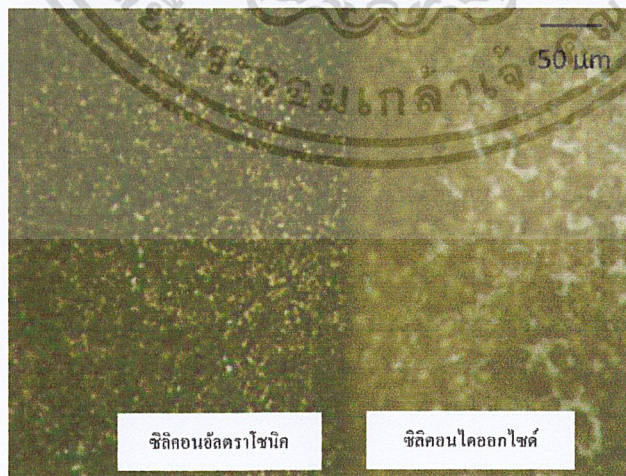
ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มและจำนวนผลึกจะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการสังเคราะห์ผ่านมากกว่า 10 นาที จะได้ฟิล์มเพชรที่มีความต่อเนื่องและพบว่าความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์มีผลต่อการป้องกันการนิวเคลียสขึ้น ซึ่งความหนาของฟิล์มเพชรที่เกิดบริเวณขอบของซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อต้องการจะลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกนั้นทำได้ยาก ฉะนั้นการทดลองต่อไปเป็นการหาความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการเป็นวัสดุป้องกันและสามารถลอกส่วนของผลึกเพชรที่ไม่ต้องการออกได้โดยไม่มีผลกระทบต่อฟิล์มเพชรที่ทำการสังเคราะห์ โดยทำการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 5,000 10,000 20,000 25,000 และ 30,000 Å และทำการทดลองเฉพาะฐานรองซิลิคอนอัลตราโซนิคในผงเพชรกับซิลิคอนไดออกไซด์ ผลการสังเคราะห์ที่เวลา 15 นาทีแสดงดังรูปที่ 3.10



(a) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 5,000 Å

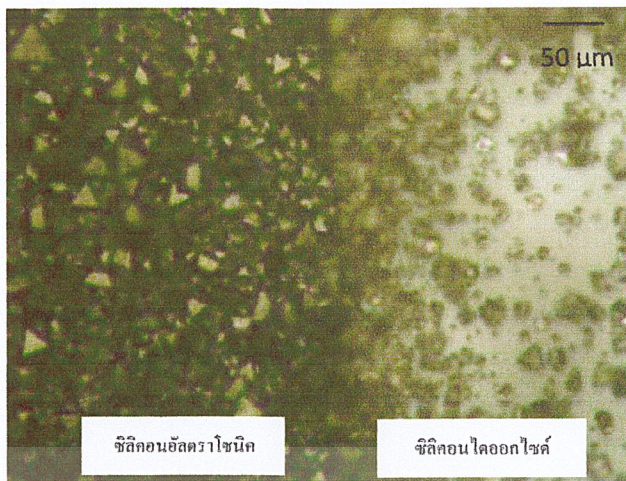


(b) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 10,000 Å

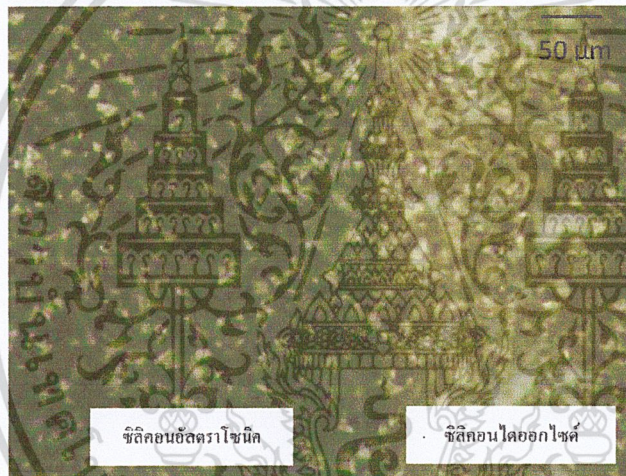


(c) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 20,000 Å

รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ความหนาต่างๆที่เวลาสังเคราะห์ 15 นาที



(d) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 25,000 Å



(c) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 30,000 Å

รูปที่ 3.10 (ต่อ) ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ความหนาต่างๆที่เวลาสังเคราะห์ 15 นาที

จากผลการทดลองเมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างนำไปวิเคราะห์ความหนาด้วยเครื่อง Ellipsometer เพื่อวัดความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์พบว่าความหนาของฟิล์มลดลงในอัตราเฉลี่ย 200 Å/min ฉะนั้นจึงต้องทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนามากกว่าความหนาของฟิล์มที่สร้าง และต้องเพิ่มความหนาสำหรับการขัดเซย

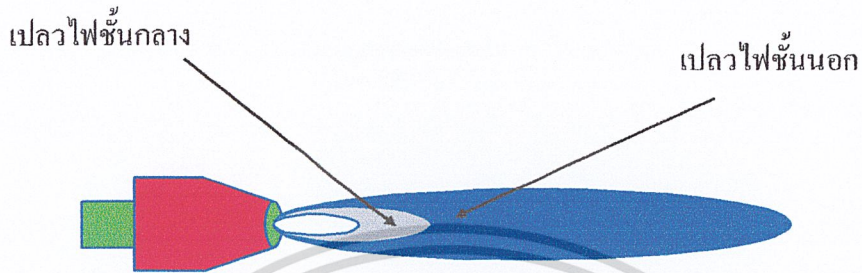
ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ที่หนาเกินไปก็ไม่เหมาะสมกับการสังเคราะห์ เนื่องจากซิลิคอนไดออกไซด์จะอยู่ใกล้เปลวไฟมากกว่าฐานรองจึงได้รับความร้อนมากกว่ารวมทั้งมีการนำความร้อนที่ไม่ดีนักจึงมีอุณหภูมิสูงกว่าฐานรอง การมีอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาสูงไปด้วยและเหตุผลอีกประการหนึ่งคือการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนามากเกินไปความจำเป็นต้องใช้เวลาหนาเกินไปสำหรับใช้เป็นชั้นป้องกันการเกิดนิวคลีเอชัน

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าการสังเคราะห์เพชรในรูปของฟลัก ฟิล์ม และเฉพาะที่นั้นต้องคำนึงถึงความหนาแน่นการนิวคลีเอชันดังตารางที่ 3.2 ซึ่งเมื่อต้องการสังเคราะห์เพชรบนฐานรองใดๆ ต้องใช้เวลาขึ้นอยู่กับความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน ส่วนค่าพารามิเตอร์ของการสังเคราะห์สรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD

เงื่อนไข	เฉพาะพื้นที่
อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ	0.85-0.95
แหล่งจ่ายก๊าซ	
- ออกซิเจน	อัตราการไหล 190-950 cc/min
- อะเซทิลีน	อัตราการไหล 200-1,000 cc/min
ฐานรอง	ซิลิคอนอัลตราโซนิคในผงเพชรและซิลิคอนไดออกไซด์
อุณหภูมิฐานรอง	560-1,040 °C
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง
เวลาในการทดลอง	มากกว่า 10 นาที

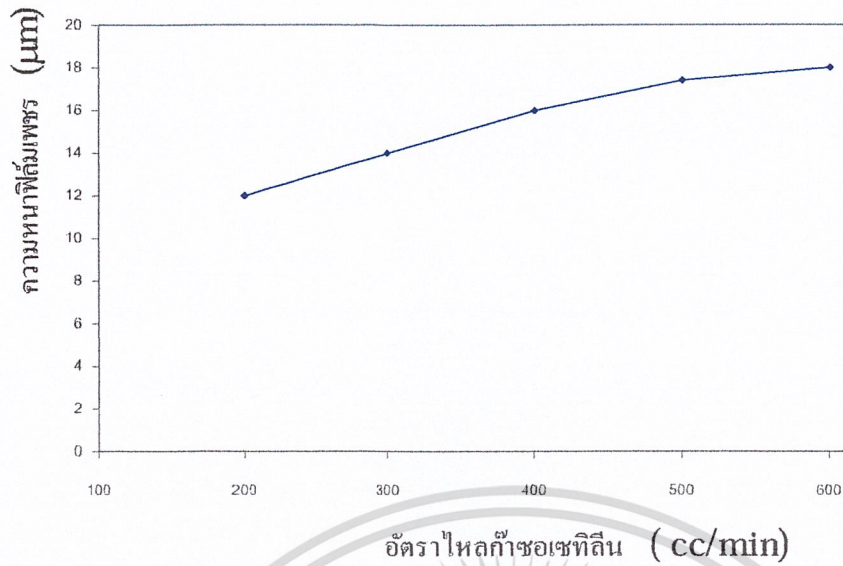
ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ตามลวดลายที่ออกแบบไว้จะได้ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้ในการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลาย $10\ \mu\text{m}$ และขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลาย $10\ \mu\text{m}$ และความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ต้องมีความหนามากกว่าความหนาของฟิล์มเพชรที่ต้องการรวมกับอัตราการกัด $200\ \text{\AA}/\text{min}$



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของเพลวไฟ

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนระหว่างก๊าซออกซิเจนกับอะเซทิลีน

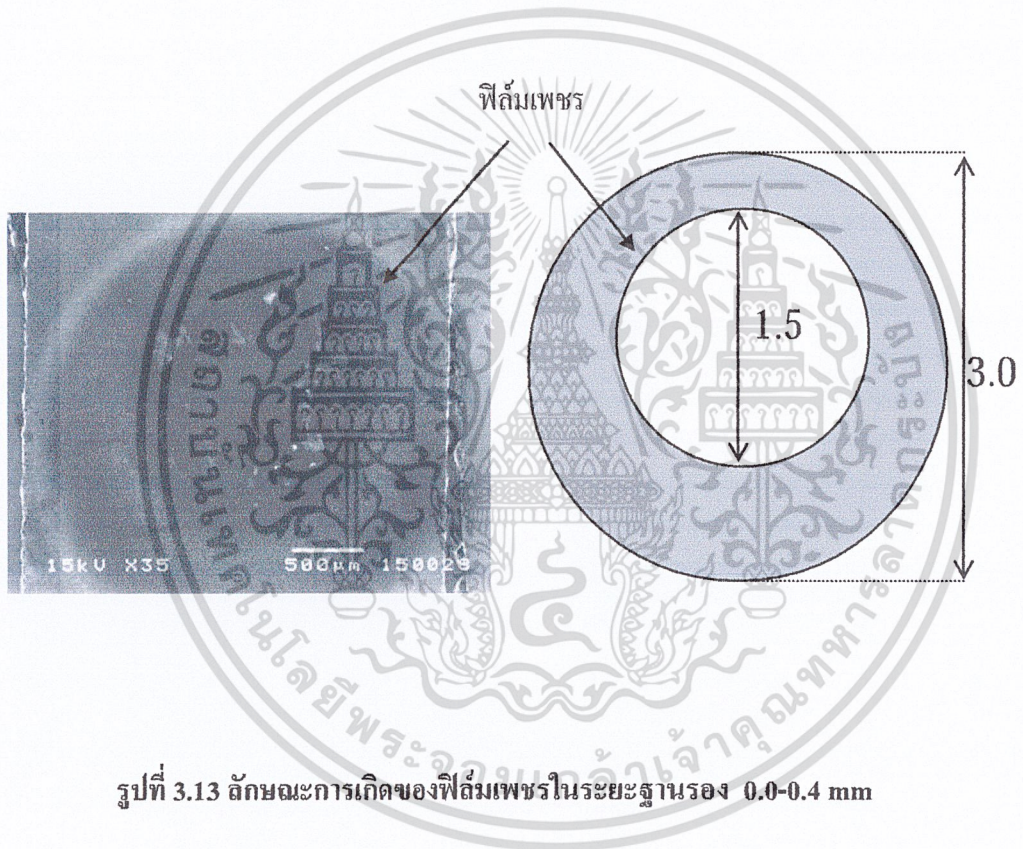
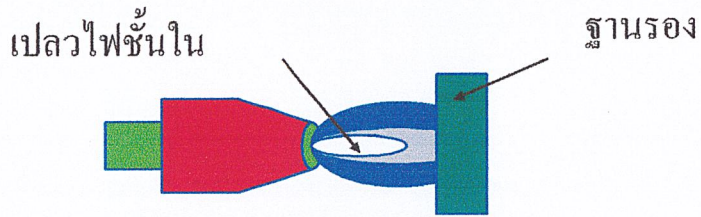
เงื่อนไข	A	B	C	D	E	F
ความดัน	บรรยากาศ					
อัตราส่วนก๊าซ	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
อัตราการไหลออกซิเจน (cc/min)	210	225	240	255	270	285
อัตราการไหลก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	300					
ขนาดหัวทิพ	100					
ฐานรอง	ซิลิคอนขัดมัน					
อุณหภูมิฐานรอง ($^{\circ}\text{C}$)	800					
ตำแหน่งเพลวไฟ	เพลวไฟชั้นกลาง					
เวลาในการทดลอง (min)	10					



รูปที่ 3.12 ความหนาของฟิล์มที่อัตราการไหลก๊าซค่าต่างๆ

ตารางที่ 3.5 ระยะระหว่างเปลวกับฐานรอง

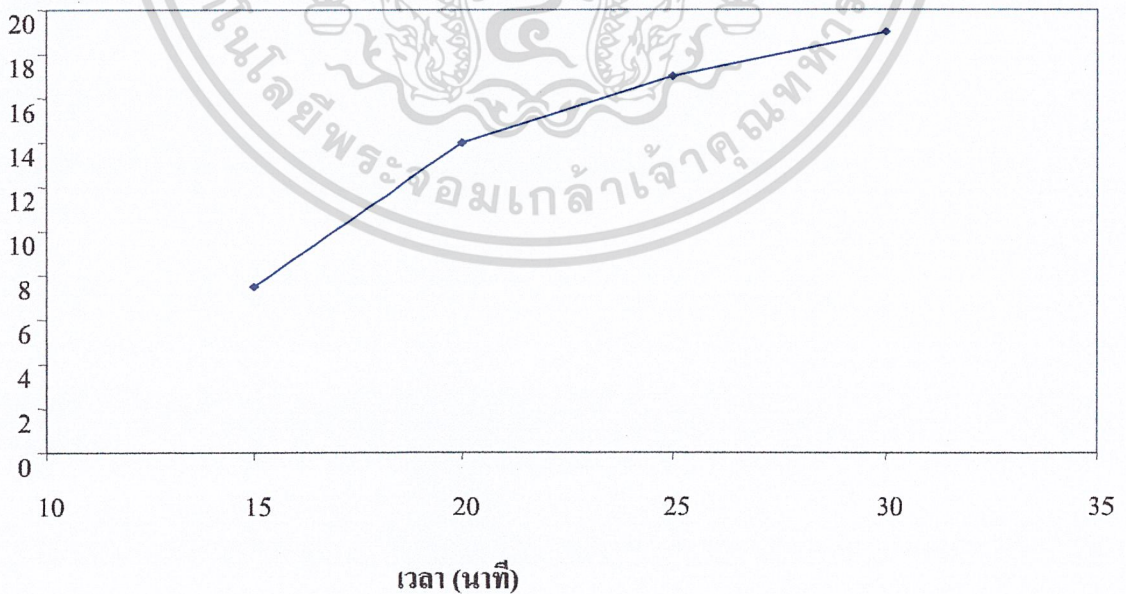
เงื่อนไข	A	B	C	D	E	F
ความดัน	บรรยากาศ					
อัตราส่วนก๊าซ	0.95					
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	285					
อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน (cc/min)	300					
ขนาดหัวทิฟ	100					
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดด้วยครีมเพชร					
อุณหภูมิฐานรอง (°c)	700					
ระยะระหว่างเปลวไฟกลางกับฐานรอง(mm)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
เวลาในการทดลอง (min)	20					



รูปที่ 3.13 ลักษณะการเกิดของฟิล์มเพชรในระยะฐานรอง 0.0-0.4 mm

ตารางที่ 3.6 เวลาในการสังเคราะห์

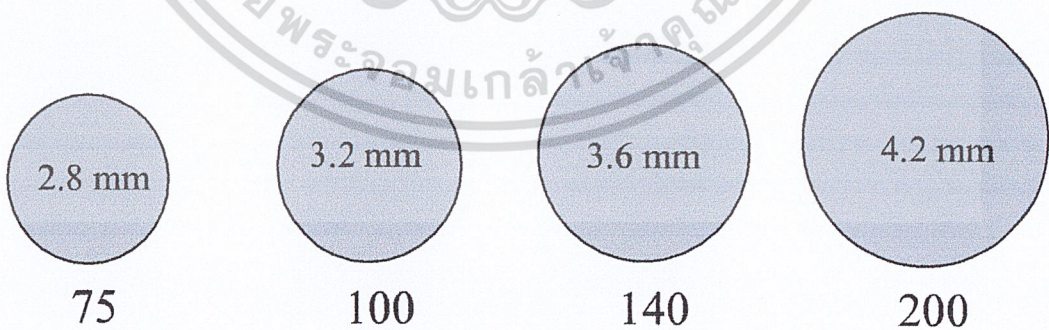
เงื่อนไข	A	B	C	D
ความดัน	บรรยากาศ			
อัตราส่วนก๊าซ	0.95			
อัตราการไหลออกซิเจน (cc/min)	285			
อัตราการไหลก๊าซออกเซทีลิน (cc/min)	300			
ขนาดหัวทิฟ	100			
ฐานรอง	ซิลิกอนขัดด้วยครีมเพชร			
อุณหภูมิฐานรอง (°C)	700			
ตำแหน่งเปลวไฟ	เปลวไฟชั้นกลาง			
เวลาในการทดลอง (min)	10	15	20	25

ความหนาของฟิล์มเพชร (μm)

รูปที่ 3.14 แผนภาพอัตราการโตที่เวลาต่างๆ

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่หัวทิพขนาดต่าง ๆ

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



รูปที่ 3.15 ขนาดของหัวทิพ

อัตราการไหลของก๊าซจะส่งผลให้อัตราการโตของฟิล์มเพชร

1. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซจะอัตราการโตของฟิล์มเพชรเพิ่มมากขึ้น
 2. ระยะระหว่างแปลวไฟชั้นกลางกับฐานรอง
 - ระยะ 0.0 - 0.4 mm. จะเกิดฟิล์มเพชรขึ้นในลักษณะของวงแหวน
 - ระยะ 0.5 - 0.9 mm. จะเกิดฟิล์มเพชรลักษณะเป็นวงกลม
 - ระยะ 0.5 mm. มีอัตราการโตสูงสุดและได้พื้นที่ฟิล์มเพชรมากที่สุด
 3. การสร้างให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรใช้เวลาในตั้งแต่ 15 นาทีขึ้นไป
 4. พื้นที่ของฟิล์มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8, 3.2, 3.6 และ 4.2 mm
- สำหรับหัวทิพขนาด 75 100 140 และ 200 ตามลำดับ



บทที่ 4

การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

ในบทนี้กล่าวถึงคุณสมบัติของฟิล์มเพชรเนื่องจากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติในอุณหภูมิสูงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติตอบสนองทางแสง โดยจะกล่าวถึงผลการทดลองและทฤษฎีไปพร้อมกัน

4.1 บทนำ

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากวิธี CACVD นี้สามารถสังเคราะห์บนฐานรองได้หลายชนิดเช่น ฐานรองที่ไม่ใช่เพชร ฐานรองที่เป็นฉนวน ฐานรองสารกึ่งตัวนำ และฐานรองโลหะ ในการสังเคราะห์สามารถสังเคราะห์ได้ตั้งแต่ผลึกเดี่ยว ฟิล์ม หรือฟิล์มอะมอร์ฟัส โครงสร้างของเพชรเกิดจากพันธะโควาเลนต์จึงมีความแข็งแรงมาก จึงทำให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุอื่นๆ หลายประการ เช่น ความแข็ง ความหนาแน่น ความนำความร้อน ค่าความยืดหยุ่น และค่า Bulk modulus ดีกว่าวัสดุอื่นๆ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนต่ำมาก คุณสมบัติต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

ความนำความร้อน (Thermal conductivity) เพชรมีค่าความนำความร้อนสูงที่สุดคือมีค่า 20 W/cm •K เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ในภาคผนวก ข ค่าความนำความร้อนนี้จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับตัวแปรต่างๆ เช่น ลักษณะของผลึกมีส่วนต่อค่าความนำความร้อนคือฟิล์มเพชรที่เป็นผลึกรวม (Polycrystalline) จากการสร้างที่ดีมีความนำความร้อนเป็น 55 % ของผลึกเดี่ยวในระนาบทิศทางการวัดเดียวกัน ส่วนในทิศทางระนาบของการปลูกผลึกความนำความร้อนของผลึกเดี่ยวจะมีค่ามากกว่า 25 % โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก

ความจุความร้อนต่อโมล (Molar heat capacity) ค่าความจุความร้อนต่อโมลหมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารที่มีปริมาณหนึ่งโมลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา การเปรียบเทียบค่าความจุความร้อนต่อโมลระหว่างเพชรกับวัสดุชนิดอื่นๆ จะพบว่าค่าความจุความร้อน

ร้อนต่อ โมลของเพอร์มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ แสดงว่าเพอร์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีหรือเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อน

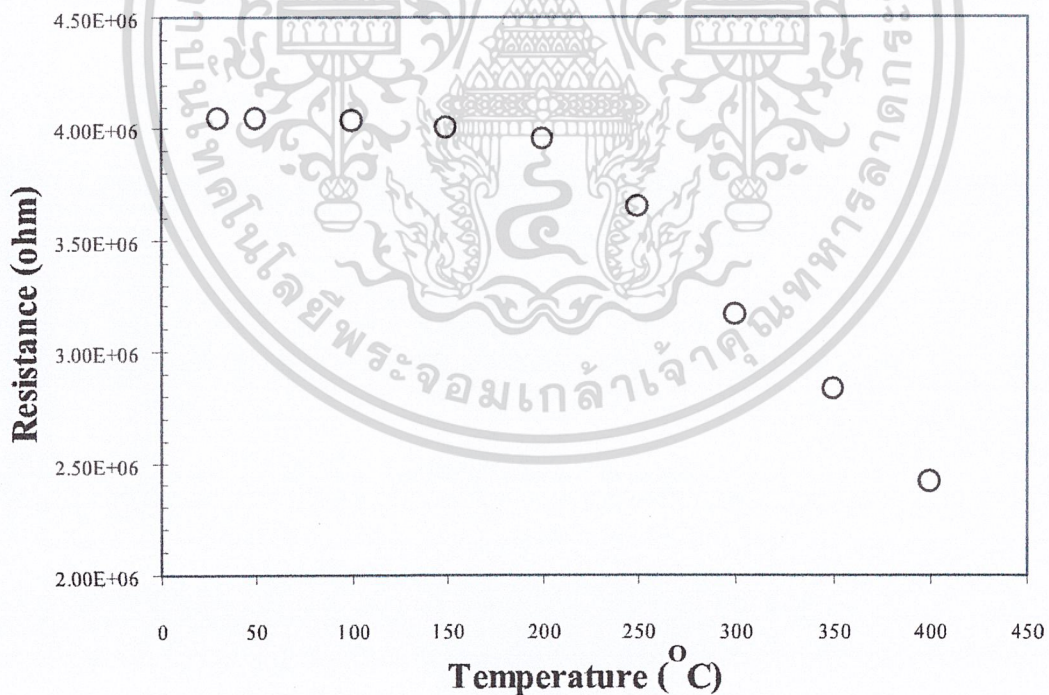
การขยายตัวจากความร้อน (Thermal expansion) คือค่าอัตราส่วนของความยาวของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเปรียบเทียบกับความยาวที่อุณหภูมิ 0°C ค่าการขยายตัวจากความร้อนนี้จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าความจุความร้อนต่อโมล สำหรับของแข็งค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายความร้อนเชิงปริมาตรจะมีค่ามากกว่าเชิงเส้นประมาณ 3 เท่า ค่าการขยายตัวจากความร้อนของเพอร์และวัสดุอื่นๆ เปรียบเทียบไว้ในตารางที่ ข-3 ในภาคผนวก ข

คุณสมบัติของเพอร์ในแง่ของสารกึ่งตัวนำมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง $1,800\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า $2,000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ $2.0 \times 10^7\text{ cm/s}$ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพอร์ในธรรมชาติจะสูงถึง $10^{16}\ \Omega\cdot\text{cm}$

สำหรับกรณีของสารเจือผู้ให้ (Donor) หากพิจารณาในโครเจนพบว่าไม่สามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นของไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าแถบความนำมาก คือมีค่าถึง 1.57 eV ดังนั้นจึงไม่เกิด Shallow level ขึ้น อีกทั้งอะตอมของไนโตรเจนยังทำให้โครงสร้างของเพอร์เสียรูปไป ส่วนกรณีของฟอสฟอรัสซึ่งมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าคาร์บอนการคำนวณจากทฤษฎีทำนายว่าฟอสฟอรัสสามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ Okano et al. รายงานในปี ค.ศ. 1990 ว่าได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพอร์ชนิดเอ็นขึ้นมา โดยใช้ไอระเหยของสารละลาย P_2O_5 ในเมทานอล ซึ่งถูกเจือจางด้วยอะซิโตน ค่าความหนาแน่นประจุพาหะวัดได้ 10^{15} cm^{-3} และความคล่องตัวของอิเล็กตรอน $50\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ แต่ปัญหาที่พบคือ ไม่สามารถควบคุมค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพอร์ได้ อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์ยังไม่มีเสถียรภาพ และอะตอมฟอสฟอรัสมีขนาดใหญ่ เมื่อสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนแล้วมีผลทำให้โครงผลึกของเพอร์เสียรูปไป ดังนั้นลิเทียมจึงเป็นสารที่ได้รับการสนใจและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์มเพอร์ที่ทำการเจือสารลิเทียมด้วยวิธี Ion-implantation แสดงคุณสมบัติเป็นฟิล์มชนิดเอ็น แต่ในการเจือสารแบบ In-situ และ In-diffusion จะไม่เกิดผลตามต้องการ เนื่องจากเกิดการชดเชยด้วยความหนาแน่นสูงของสถานะผู้รับที่กระจายอยู่ในแถบพลังงานต้องห้ามตลอดจนลิเทียมในเพอร์มีการกระจายตัวสูงอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้องซึ่งทำให้การเจือสารไม่มีความแน่นอน

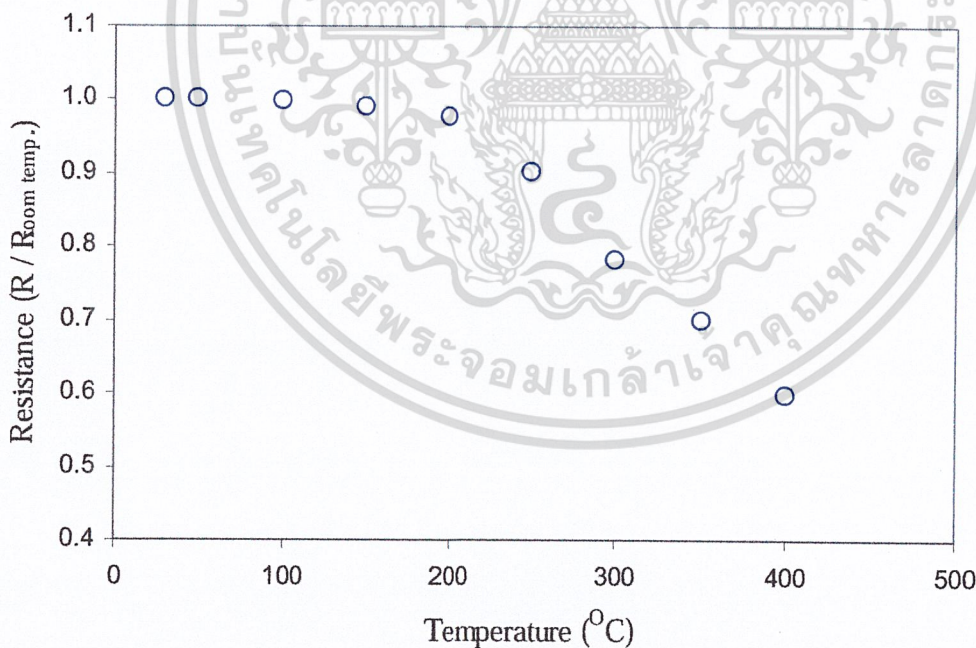
4.2 คุณสมบัติในอุณหภูมิสูง

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องทราบว่ามีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สภาพความต้านทานลดลง[37-39] เพราะมีประจุพาหะเกิดเพิ่มขึ้นทั้งโฮลและอิเล็กตรอนจึงทำให้ความต้านทานลดลง คุณสมบัตินี้เป็นลักษณะพิเศษของสารกึ่งตัวนำโดยใช้การวัดความต้านทานภายในเตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ด้วยเครื่อง Takedariken digital multimeter ก่อนเริ่มทำการทดลองจำเป็นต้องสร้างรอยต่อโลหะเพื่อทำการเชื่อมต่อสายลวดออกมาจากเตาเผา โลหะที่จะนำมาทำเป็นรอยต่อต้องเป็นแบบโอห์มมิกเพื่อให้รอยต่อไม่มีผลต่อความต้านทานและมีจุดหลอมเหลวสูงซึ่งได้แก่ ทองคำ (Au) และ เงิน (Ag) โดยฟิล์มเพชรนี้มีค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง (30°C) เท่ากับ $4.04\text{ M}\Omega$ จากนั้นทำการแปรค่าอุณหภูมิตั้งแต่ 30°C ถึง 400°C เพื่อดูค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังผลที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรกับอุณหภูมิ

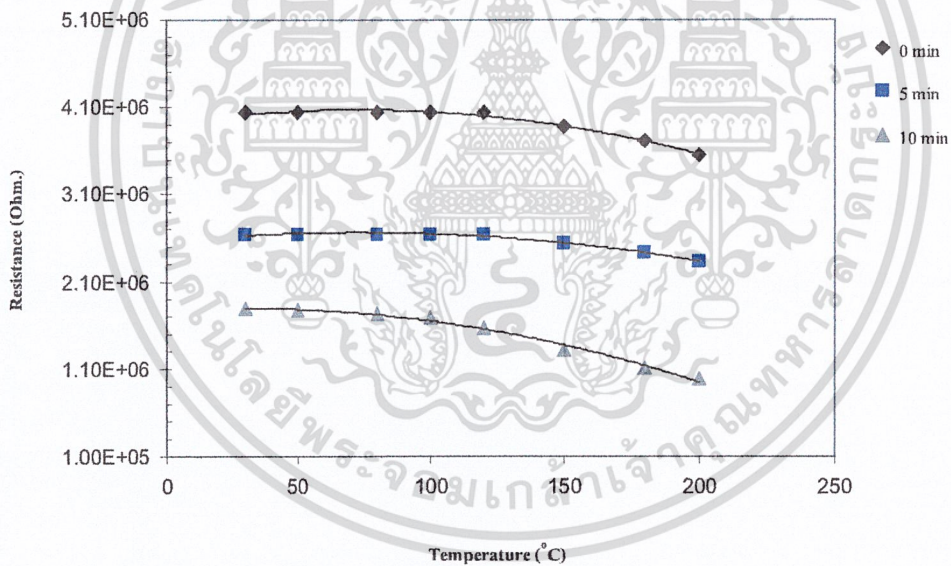
จากรูปที่ 4.1 พบว่าความต้านทานของฟิล์มเพชรแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ นั่นคือที่อุณหภูมิเพิ่มฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานจะลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200°C และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250°C ขึ้นไปค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น $2.42\text{ M}\Omega$ ที่อุณหภูมิ 400°C แต่ด้วยขีดจำกัดในการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรในการวัดที่อุณหภูมิสูง จึงได้ทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Hewlett Packard semiconductor/Component test system และ Curve tracer สามารถวัดค่าความต้านทานได้มากกว่า $1 \times 10^{10}\ \Omega$ ซึ่งการวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานกับอุณหภูมิก็เพียงพอสำหรับการสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้องแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆต่อความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง (30°C) การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30°C จนถึง 200°C เล็กน้อยมากคือน้อยกว่า 0.000–0.022 โดยที่อุณหภูมิ 250°C ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น จึงพอสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรนี้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200°C ซึ่งสามารถนำไปใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิสูงได้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ

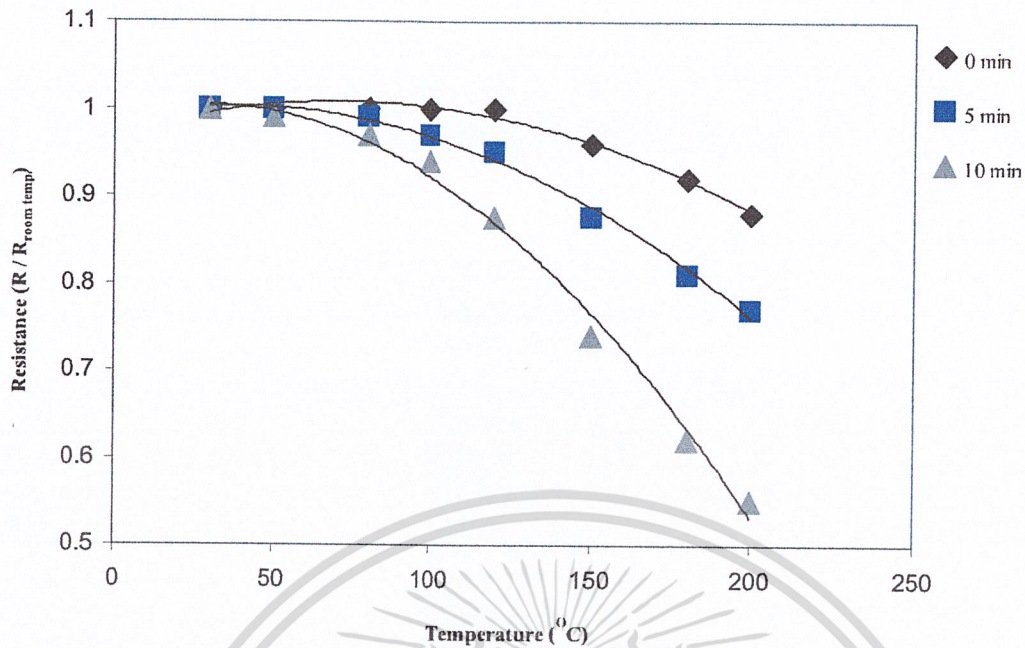
การวิเคราะห์ชนิดประจุพาหะด้วยเทคนิค Seebeck effect ทำการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้ด้วยชุดเครื่องมือตามรูปที่ 2.6 ในการทำการทดลองได้จ่ายความร้อนกับเข็มร้อนอุณหภูมิประมาณ 100°C เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกัลวานอมิเตอร์ได้อย่างเด่นชัดขึ้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์หัวฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD กัลวานอมิเตอร์ชี้ไปยังตำแหน่งศูนย์ แสดงว่าจำนวนพาหะที่เคลื่อนที่จากเข็มร้อนไปยังเข็มเย็นนั้นมีเท่ากันทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้ไม่เกิดความต่างศักย์ระหว่างเข็มร้อนและเข็มเย็นขึ้น จึงสรุปได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก

เมื่อทำการระบวนการไฮโดรเจนเทอร์มิเนชันที่เวลา 5 นาที เปรียบเทียบกับที่เวลา 10 นาที จะเห็นว่าเมื่อเวลานานจะทำให้ความต้านทานที่ได้ในการทำการระบวนการไฮโดรเจนเทอร์มิเนชันลดลง ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้คือชนิดพาหะโฮลแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการไฮโดรเจนเทอร์มิเนชันความต้านทานของฟิล์มจะลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานจะลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้อง R/R_r แสดงดังรูปที่ 4.4



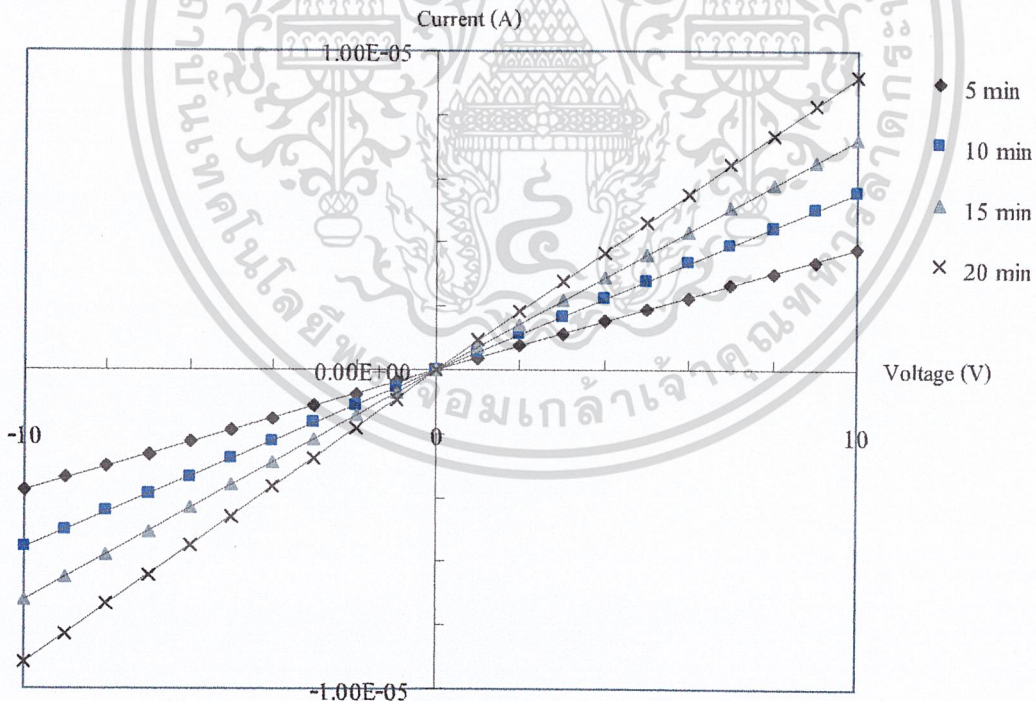
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ

หลังจากทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธี ไฮโดรเจนเทอมินชั้น ซึ่งมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์คือ เวลาที่ใช้คือ 5 และ 10 นาที ผลการทดลองที่ได้หลังจากให้ความร้อนแก่เข็ม A ปรากฏว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้เบนไปทางด้านบวก เนื่องจากที่บริเวณเข็มร้อน(เข็ม A) พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้มีประจุโฮลเพิ่มขึ้น และประจุโฮลเหล่านี้จะมีพลังงานสูงกว่าประจุโฮลที่บริเวณอื่นๆ ดังนั้นประจุโฮลเหล่านี้จะแพร่กระจายออกไปรอบๆ และทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุโฮล โดยไหลจากเข็มร้อนไปยังเข็มที่เย็นกว่าบริเวณเข็มร้อนจึงขาดประจุไฟฟ้าบวกและทำให้มีศักย์เป็นลบ ส่วนด้านเข็มเย็นจะมีศักย์เป็นบวก ดังนั้นกระแสสุทธิจึงไหลออกจากเข็มเย็นผ่านมิเตอร์ไปยังเข็มร้อน แสดงว่ามีประจุเคลื่อนที่จากเข็ม A ไปยังเข็ม B แล้วผ่านกัลวานอมิเตอร์ทางซ้ายบวก ทำให้เข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้เบนไปทางบวก ดังนั้นพหุผลหลักในการนำกระแสของชั้นความนำไฟฟ้าที่ทำการวัดนี้คือ โฮล จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าชั้นความนำไฟฟ้าที่สร้างได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

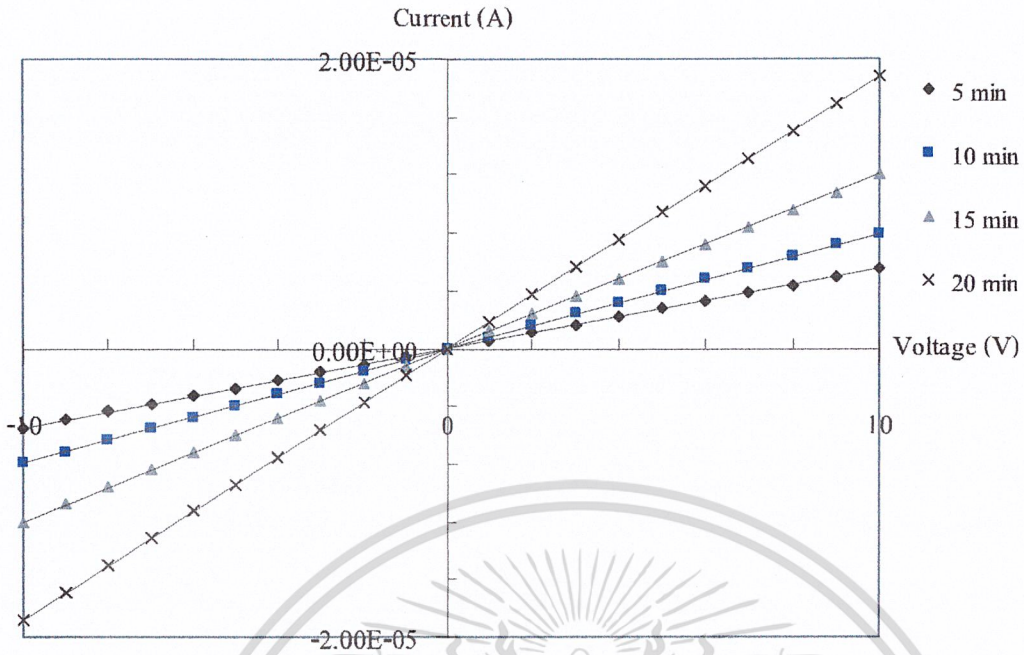
4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

เมื่อนำฟิล์มที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอร์มิเนชันที่เวลา 5 นาที เปรียบเทียบกับที่เวลา 10 นาที จะเห็นว่าเมื่อเวลานานจะทำให้ความต้านทานที่ได้ในการทำกระบวนการไฮโดรเจนเทอร์มิเนชันลดลง ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเข้มร้อนสรุปได้คือชนิดพาหะโฮล

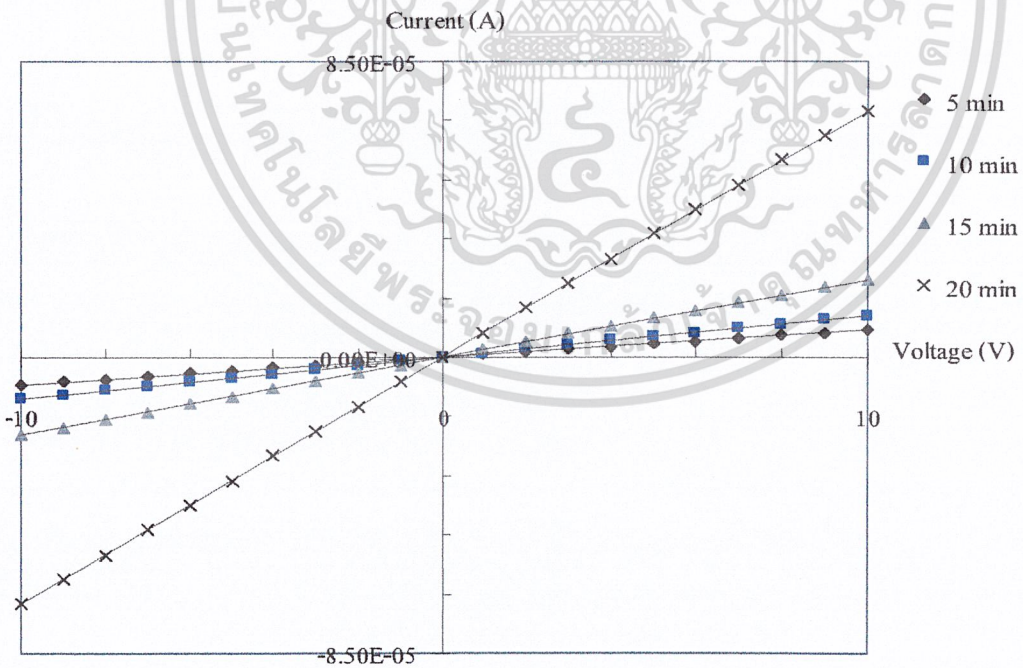
หลังจากทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกเสร็จแล้ว จะทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกก่อนที่จะนำไปสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้า โดยค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าประมาณ $10^{10} \Omega$ เพื่อที่จะนำค่าความต้านทานนี้ไปเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานหลังจากทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าแล้ว หลังจากนั้นจึงทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธีไฮโดรเจนเทอร์มิเนชัน โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5, 10 และ 15 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 500, 600 และ 700 °C หลังจากนั้นจึงทำขั้วสัมผัสโอห์มมิกด้วยโลหะทองคำเพื่อตรวจสอบคุณลักษณะกระแส-แรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ขึ้นตามเงื่อนไขข้างต้น ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5-4.7



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอร์มิเนชันที่อุณหภูมิ 500 °C



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมีนทที่อุณหภูมิ 600 °C

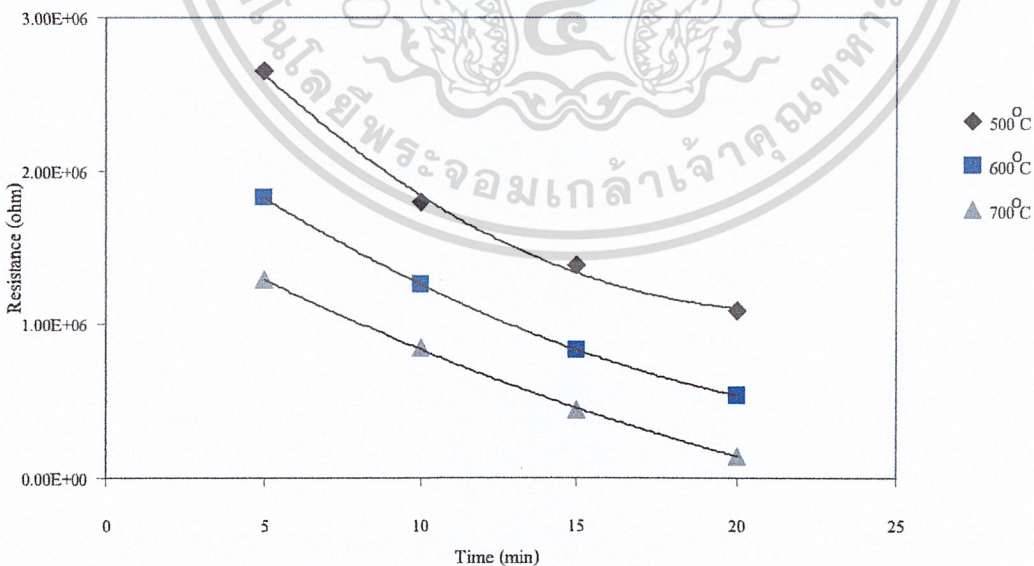


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมีนทที่อุณหภูมิ 700 °C

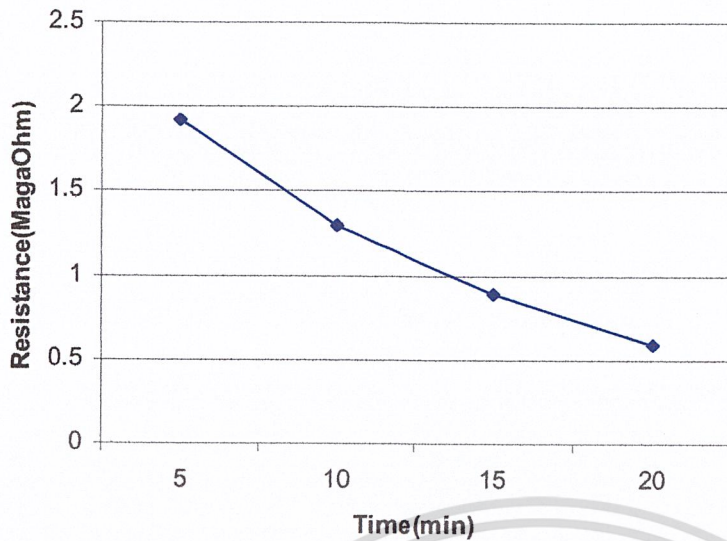
จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าทั้งหมดที่ทำการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้นสามารถหาค่าความต้านทานจากความชันของกราฟในรูปที่ 4.3- 4.5 สรุปค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความต้านทานมีค่าลดลงอย่างมาก (จาก $10^{10}\Omega$ เหลือ $10^6-10^5\Omega$) จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทาน (Ω) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

เวลา (min)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)		
	500	600	700
5	2.65×10^6	1.82×10^6	1.29×10^6
10	1.79×10^6	1.26×10^6	8.46×10^5
15	1.38×10^6	8.34×10^5	4.46×10^5
20	1.09×10^6	5.33×10^5	1.41×10^5



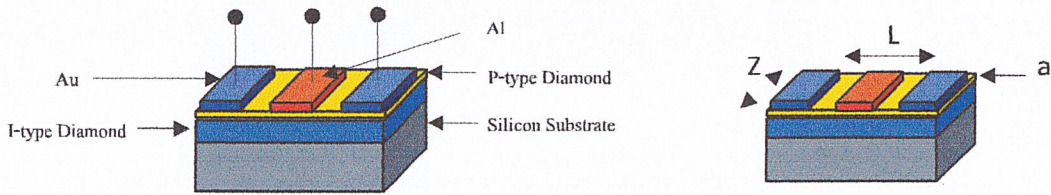
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจนเทอมินท



รูปที่ 4.9 กราฟเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจนเทอมินเทท

พิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเจนเทอมินเททมากขึ้นแต่ใช้เวลาในการสังเคราะห์เท่ากัน ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าลดลง โดยเมื่อพิจารณาที่เวลา 5 นาทีเท่ากัน และใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์เป็น 500, 600 และ 700 °C ค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $2.65 \times 10^6 \Omega$, $1.82 \times 10^6 \Omega$ และ $1.29 \times 10^6 \Omega$ ตามลำดับ และถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์มีค่าเท่ากัน แต่เวลาที่ใช้นานขึ้นค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าลดลง โดยเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 500 °C แต่ใช้เวลาต่างกันคือ 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่าค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่า $2.65 \times 10^6 \Omega$, $1.79 \times 10^6 \Omega$, $1.38 \times 10^6 \Omega$ และ $1.09 \times 10^6 \Omega$ ตามลำดับซึ่งมีค่าลดลง

หลังจากทำการหาค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้าได้แล้ว จะทำการหาความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ต่อไป โดยจะให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่ชั้นความนำไฟฟ้านี้เพื่อหาค่าแรงดันพังทลาย (Punch through) ที่เกิดขึ้น โดยค่าแรงดันพังทลายที่วัดได้จากชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ขึ้นตามเงื่อนไขต่าง ๆ สามารถสรุปเป็นค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.10 แผนภาพการวัดชิ้นงานตัวอย่างของชั้นความนำเพชร

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันพื้นซ์ทรู V_{pt} (V) ของชั้นความนำไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ

เวลา(นาที่)	ค่าแรงดันพื้นซ์ทรู V_{pt} (V)		
	500 °C	600 °C	700 °C
5	0.56	1.06	1.83
10	1.07	1.76	3.01
15	1.54	2.84	6.01
20	2.11	4.74	19.9

จากค่าแรงดันพื้นซ์ทรูที่วัดได้ในตารางที่ 4.2 นี้สามารถนำมาคำนวณหาความหนาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.1)-(4.5)

$$V_{pt} = a^2 \frac{qp}{2\epsilon} \quad (4.1)$$

โดยที่ V_{pt} คือ แรงดันพื้นซ์ทรู

a คือ ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

p คือ จำนวนอะตอมสารเจือผู้รับ

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

$$R = \frac{1}{pq\mu_p} \frac{L}{Za} \quad (4.2)$$

โดยที่ R คือ ค่าความต้านทาน

L คือ ระยะความยาวแนววัสดุ

Z คือ ระยะความกว้างของวัสดุ

A คือ ความหนาของวัสดุ

μ_p คือ ค่าความคล่องตัว ของประจุโฮล

จากสมการที่(4.2) จะได้ค่า p ดังสมการที่ (4.3)

$$p = \frac{L}{Rq\mu_p} \frac{1}{Za} \quad (4.3)$$

จากสมการที่(4.1) จะได้ค่า p ดังสมการที่ (4.4)

$$p = \frac{V_{pt}}{q} \frac{2\epsilon}{a^2} \quad (4.4)$$

จากสมการที่(4.3) และ (4.4) จะได้ค่าความหนาดังสมการที่ (4.5)

$$a = 2\epsilon R V_{pt} \mu_p \frac{Z}{L} \quad (4.5)$$

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

p คือ จำนวนอะตอมสารเจือผู้รับ

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

$$R = \frac{1}{pq\mu_p} \frac{L}{Za} \quad (4.2)$$

โดยที่ R คือ ค่าความต้านทาน

L คือ ระยะความยาวแนววัสดุ

Z คือ ระยะความกว้างของวัสดุ

A คือ ความหนาของวัสดุ

μ_p คือ ค่าความคล่องตัว ของประจุโฮล

จากสมการที่(4.2) จะได้ค่า p ดังสมการที่ (4.3)

$$p = \frac{L}{Rq\mu_p} \frac{1}{Za} \quad (4.3)$$

จากสมการที่(4.1) จะได้ค่า p ดังสมการที่ (4.4)

$$p = \frac{V_{pt}}{q} \frac{2\epsilon}{a^2} \quad (4.4)$$

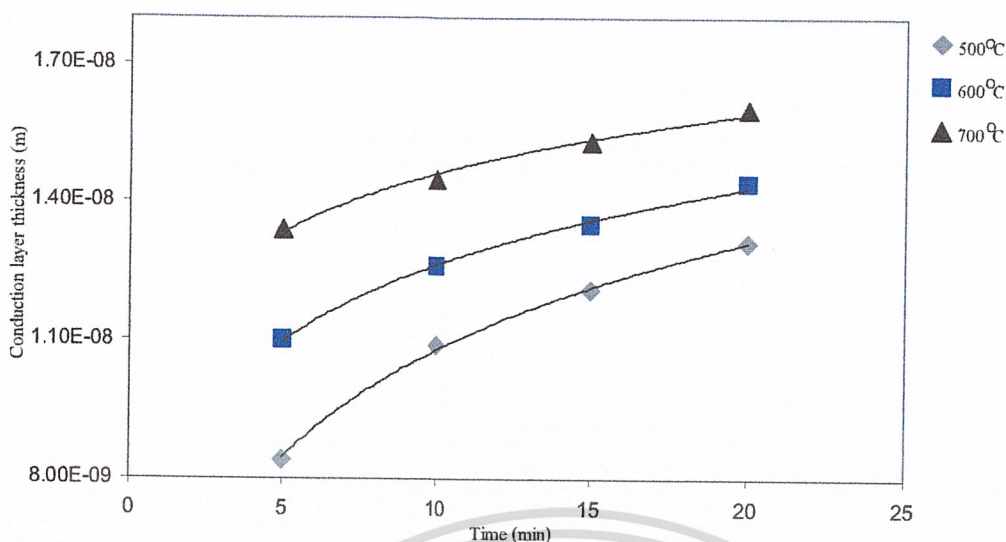
จากสมการที่(4.3) และ (4.4) จะได้ค่าความหนาดังสมการที่ (4.5)

$$a = 2\epsilon R V_{pt} \mu_p \frac{Z}{L} \quad (4.5)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

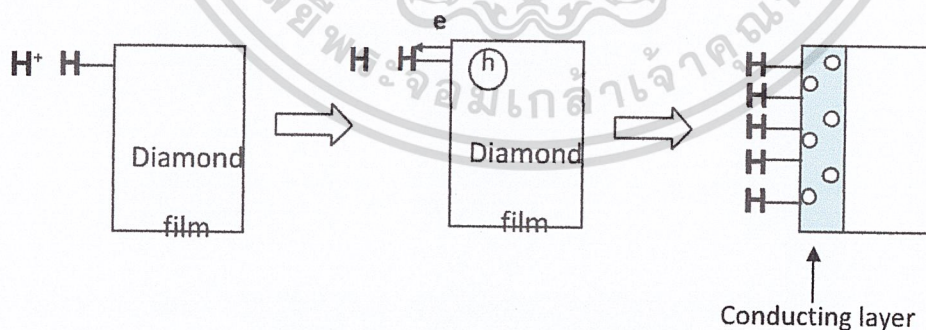
เวลา(นาที)	ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง (nm)		
	500 °C	600 °C	700 °C
5	84	110	134
10	109	126	145
15	121	135	153
20	131	144	160

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ากับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเจนเทอมิเนทมาเพิ่มขึ้นแต่ใช้เวลาในการสังเคราะห์เท่ากัน ค่าความหนาที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่เวลา 5 นาที และใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์เป็น 500, 600 และ 700 °C ค่าความหนาที่ได้จะมีค่า 84 nm, 110 nm, และ 134 nm ตามลำดับ และถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์มีค่าเท่ากัน แต่เวลาที่ใช้นานขึ้นค่าความหนาที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 500 °C แต่ใช้เวลาต่างกันคือ 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่าค่าความหนาที่ได้จะมีค่า 84 nm, 109 nm, 121 nm และ 131 nm ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจนเทอมินเท

จากผลการทดลองที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่ออะตอมของไฮโดรเจนได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮโดรเจนไอออนเหล่านี้เมื่อปกคลุมบริเวณผิวหน้าของฟิล์มเพชรจะดึงอิเล็กตรอนจากอะตอมไฮโดรเจนที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มเพชรทำให้อะตอมไฮโดรเจนเหล่านี้มีประจุบวก และอะตอมไฮโดรเจนจะทำการดึงอิเล็กตรอนในพันธะของอะตอมคาร์บอนออกมาทำให้เกิดที่ว่างขึ้นในพันธะของอะตอมคาร์บอนนั่นคือมีโฮลเกิดขึ้น[40] ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.12 แผนภาพกระบวนการเกิดโฮลในฟิล์มเพชร

จากค่าความต้านทานและความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นที่ได้จากผลการทดลองข้างต้น สามารถนำมาคำนวณหาค่าพื้นฐานต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าได้แก่ ค่าพิคต์ความต้านทาน (Resistivity : ρ) ค่าความหนาแน่นประจุโฮล (Hole concentration : p)

ระดับพลังงานเฟอร์มิเทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์ ($E_F - E_V$) ได้จากสมการที่(4.6)-(4.7) ซึ่งค่าทั้งหมดที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.4-4.5

$$R = \rho \frac{L}{Za} \quad (4.6)$$

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p D} \quad (4.7)$$

ตารางที่ 4.4 ค่าพิถัคความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาการไฮโดรเจนเทอมีเนทต่าง ๆ

เวลา(นาทื)	ค่าพิถัคความต้านทานที่อุณหภูมิ ($\Omega\text{-cm}$)		
	500 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	700 $^{\circ}\text{C}$
5	22.23	20.05	17.25
10	19.55	15.86	12.26
15	16.73	11.26	6.83
20	14.25	7.67	2.26

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นประจุโฮลของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาการไฮโดรเจนเทอมีเนทต่าง ๆ

เวลา(นาทื)	ความหนาแน่นประจุโฮลที่อุณหภูมิ(cm^{-3})		
	500 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	700 $^{\circ}\text{C}$
5	5.62×10^{16}	6.23×10^{16}	7.24×10^{16}
10	6.39×10^{16}	7.87×10^{16}	1.02×10^{17}
15	7.46×10^{16}	1.11×10^{17}	1.83×10^{17}
20	8.76×10^{16}	1.63×10^{17}	5.52×10^{17}

ในบทนี้เป็นการศึกษาถึงสภาวะการนำไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกโดยไม่มีการเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่น ๆ ด้วยวิธีไฮโดรเจนเทอมิเนทที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 5 และ 10 นาที และนำผลการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของฟิล์มนำมาเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมิเนท เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานของฟิล์มมีค่าเท่ากับ $4.04 \times 10^6 \Omega$, $2.65 \times 10^6 \Omega$ และ $1.79 \times 10^6 \Omega$ ของเวลาในการ H-Termination เป็นเวลา 0, 5 และ 10 นาที ที่อุณหภูมิห้องตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 200 °C มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน 12, 23 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวแสดงถึงการเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง

การทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมิเนท ที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่า มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยความหนาและความหนาแน่นของโฮลของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้นี้ จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยความหนาที่ได้อยู่ในช่วง 84-160 nm ส่วนค่าความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าอยู่ในช่วง $5.61601 \times 10^{16} - 5.52407 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

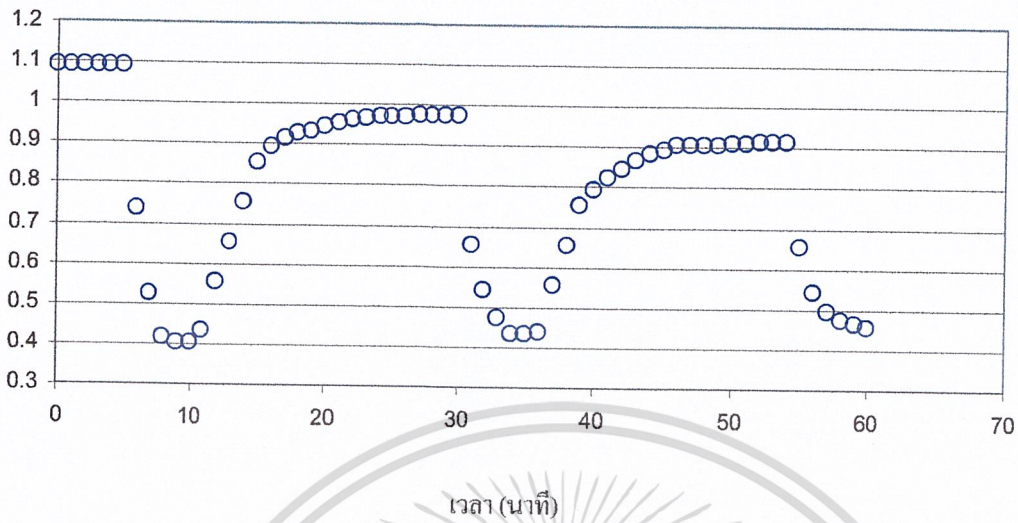
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการตรวจวัดการไฮโดรเจนโดยเลือกค่าความต้านทาน 2.7 และ 1.1 เมกกะโอห์ม

Time	ที่ความต้านทาน 2.7 เมกกะโอห์ม	ที่ความต้านทาน 1.1 เมกกะโอห์ม
0	2.65546	1.09321
1	2.65687	1.09332
2	2.65786	1.09333
3	2.65877	1.09334
4	2.65867	1.09354
5	2.65878	1.09364
6	2.19543	0.73543
7	1.75434	0.52434
8	1.65543	0.41521

9	1.62543	0.40523
10	1.62543	0.40531
11	1.73543	0.43531
12	1.85543	0.55543
13	1.96543	0.65524
14	2.06545	0.75543
15	2.11454	0.85553
16	2.13434	0.89151
17	2.14433	0.91561
18	2.15453	0.92582
19	2.16435	0.93274
20	2.17432	0.94595
21	2.17043	0.95172
22	2.17435	0.96262
23	2.17532	0.96551
24	2.17452	0.97041
25	2.17532	0.97131
26	2.17453	0.97223
27	2.17343	0.97351
28	2.17453	0.97478
29	2.17543	0.97508
30	2.17543	0.97508
31	1.88755	0.65543
32	1.65543	0.54434
33	1.63323	0.47521
34	1.62242	0.43523
35	1.62543	0.43531
36	1.76654	0.43631

37	1.85676	0.55453
38	1.93765	0.65432
39	2.00343	0.75432
40	2.05322	0.79324
41	2.06432	0.82151
42	2.07765	0.84561
43	2.08453	0.86582
44	2.08876	0.88274
45	2.09765	0.89295
46	2.09786	0.90572
47	2.09768	0.90562
48	2.09932	0.90551
49	2.10167	0.90741
50	2.10532	0.90831
51	2.10853	0.91023
52	2.11043	0.91351
53	2.11453	0.91478
54	2.11543	0.91508
55	1.88755	0.65543
56	1.65543	0.54434
57	1.63323	0.49521
58	1.62242	0.47523
59	1.62543	0.46531
60	1.62543	0.45537

ความต้านทาน (เมกกะโอห์ม)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการไฮโดรเจนเทอร์มิเนทที่ความต้านทาน 1.1 เมกกะโอห์ม

ความต้านทาน (เมกกะโอห์ม)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการไฮโดรเจนเทอร์มิเนทที่ความต้านทาน 2.7 เมกกะโอห์ม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยทั้งหมดการพัฒนาการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยวิธี CACVD และการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชรนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

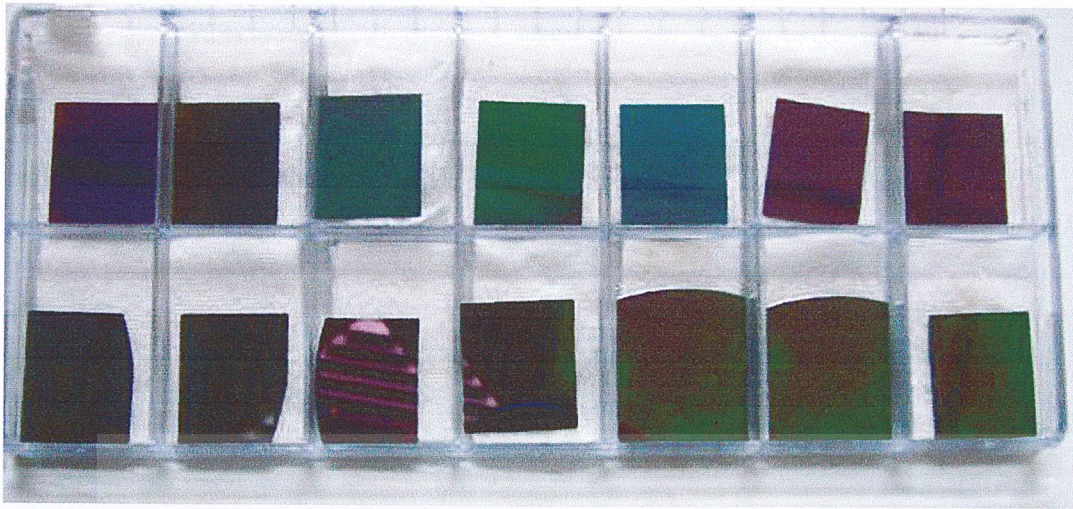
ผลการวิจัยที่น่าเสนอนี้เป็นการศึกษาถึงการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่กำหนด เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำฟิล์มเพชรไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ต่อไป ฟิล์มเพชรถูกสร้างด้วยระบบ CACVD ฐานรองจะถูกเตรียมพื้นผิวเพื่อกระตุ้นให้เกิดการนิวเคลียสของเพชร ด้วยการขัดผิวหน้าฐานรองด้วยเทคนิคการอัตราราโซนิคในผงเพชรขนาด $0.5 \mu\text{m}$ ส่วนวัสดุที่นำมาเป็นวัสดุป้องกันเกิดการนิวเคลียสชั้นได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ ลวดลายที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรถูกออกแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบวงจรร่วม คือค่าขนาดความกว้างต่ำที่สุด และระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของลวดลาย จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของลวดลายฟิล์มเพชรได้ผลดังนี้ คือ ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชรมีค่า $10 \mu\text{m}$ ขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลายฟิล์มเพชร $10 \mu\text{m}$ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการสร้างเป็นไปตามตารางที่ 3.3 ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งเนื่องจากถ้าความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์บางเกินไปจะทำให้เกิดฟิล์มเพชรบริเวณขอบซิลิคอนไดออกไซด์เกิดขึ้นและเกิดฟิล์มเพชรข้ามลวดลาย ซึ่งเมื่อทำการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้วจะไม่สามารถกำจัดฟิล์มเพชรส่วนที่เกินออกไปได้ เมื่อทำการสังเคราะห์จะมีปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าของซิลิคอนไดออกไซด์เป็นผลให้ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ลดลงประมาณ $200 \text{ \AA} / \text{min}$ ด้านคุณสมบัติของฟิล์มเพชรเมื่อสังเคราะห์แล้วพบว่าเป็นสารกึ่งตัวนำกล่าวคือความต้านทานของฟิล์มเพชรจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม โดยมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200°C และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250°C ขึ้นไป ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น $2.42 \text{ M}\Omega$ ที่อุณหภูมิ 400°C จากการทดสอบด้วย Seebeck effect พบว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิกคือมีอิเล็กตรอนและโฮลเท่ากัน

เมื่อศึกษาชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกโดยไม่มีการเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่นๆ เลย เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมีเนท ที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่า มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยความหนา และความหนาแน่นของโฮลของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้นี้ จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยความหนาที่ได้อยู่ในช่วง 84-160 nm ส่วนค่าความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าอยู่ในช่วง $5.62 \times 10^{16} - 5.52 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งสามารถนำไปวัดไอกรดได้

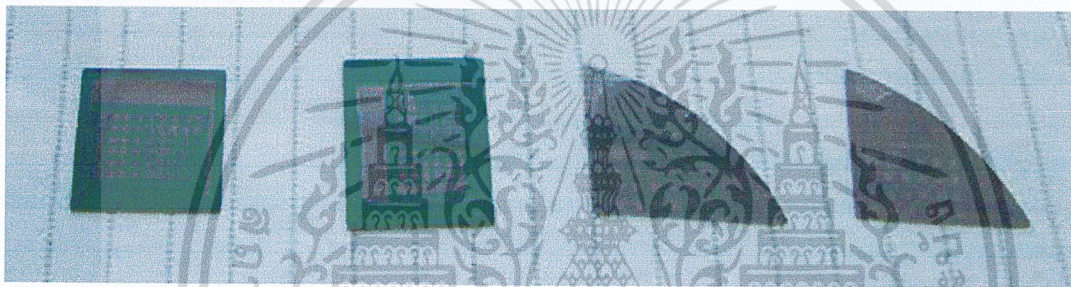




ภาคผนวก

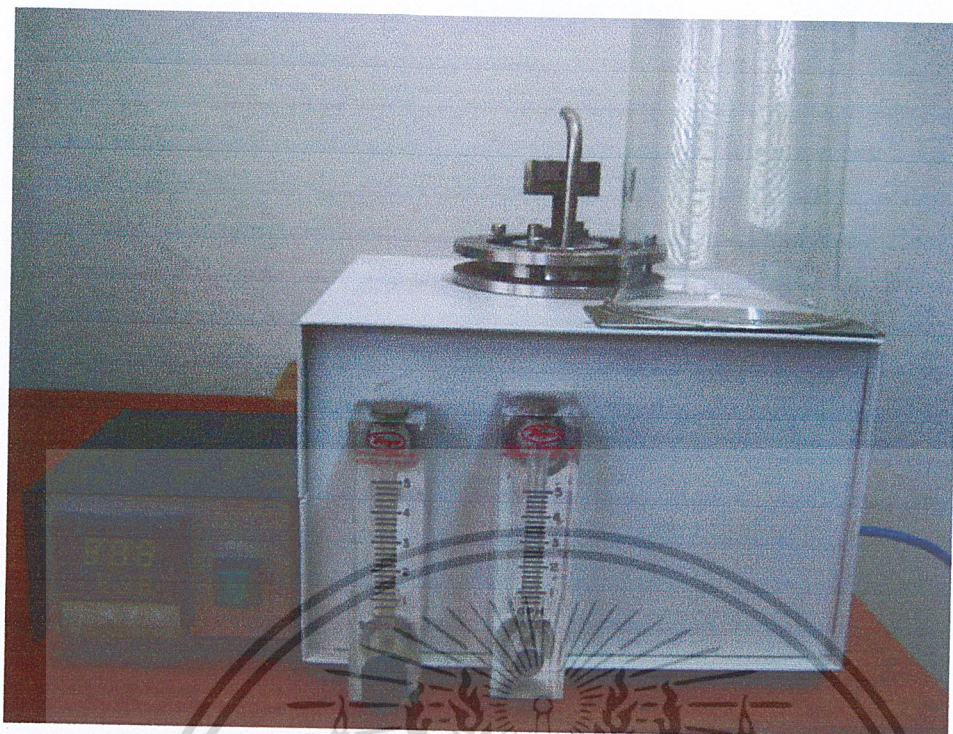


ตัวอย่างรูปฟิล์มซีลิกอนไดออกไซด์บนฐานรองซีลิกอนขนาด 250 x 300 มิลลิเมตร



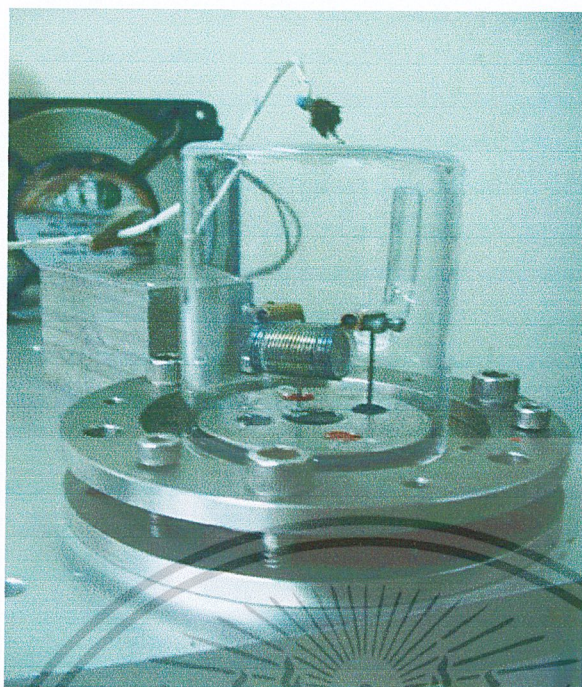
ตัวอย่างรูปฟิล์มซีลิกอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการสร้างลวดลาย

รายละเอียด	
ความต้านทาน	ซีลิกอน ชนิดเอ็น 20 Ω - cm
ขนาด	250 x 300 มิลลิเมตร
ความหนาฟิล์ม ซีลิกอนไดออกไซด์	5000 \pm 50 Å จำนวน 4 แผ่น
	10,000 \pm 100 Å จำนวน 4 แผ่น
	15,000 \pm 150 Å จำนวน 4 แผ่น
	20,000 \pm 200 Å จำนวน 4 แผ่น
	25,000 \pm 250 Å จำนวน 4 แผ่น



ชุดวัดความชื้น

คุณสมบัติ	
ผนังชุดเครื่องวัด	ท่อ Pyrex ทนความร้อนสูง
ก๊าซเข้า	ท่อน้ำก๊าซ เกจวัดความดัน ตัวอัตราวัดการไหลก๊าซ
ก๊าซออก	ระบบสูญญากาศก๊าซ
อุณหภูมิฐานรอง	50 – 300° C
ใช้ไฟ	แรงดันไฟ 100~240V AC 50/60Hz 24V AC/DC 50/60Hz
สภาพแวดล้อม	อุณหภูมิแวดล้อม : 0~50°C, ความชื้นแวดล้อม : 35~85% RH (ไม่ควมแน่นเป็นหยดน้ำ)



อุปกรณ์เทอมีเนตฟิล์ม

คุณสมบัติ	
จอแสดงผล	ตัวเลข LED สีแดง 4 หลัก, ขนาด : 16x7.2 มม. (สูงxกว้าง)
ความเที่ยงตรง	$\pm 0.2\%$ ของแต่ละช่วงอินพุต ± 1 digit หรือ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (4°F)
เวลาในการสุ่มวัด	0.25 วินาที
การส่งสัญญาณเอาต์พุต	กระแสไฟ DC : 4~20 mA DC (โหลดแบบความต้านทาน สูงสุด 550) ความเที่ยงตรงของเอาต์พุต : ภายในช่วง $\pm 0.3\%$ ของช่วงเอาต์พุต
ใช้ไฟ	แรงดันไฟ 100~240V AC 50/60Hz 24V AC/DC 50/60Hz
สภาพแวดล้อม	อุณหภูมิแวดล้อม : 0~50°C, ความชื้นแวดล้อม : 35~85% RH (ไม่ควมแน่นเป็นหยดน้ำ)

บรรณานุกรม

Michael Quirk and Julian Serda, "Semiconductor manufacturing technology", Prentice Hall,

2001.

Singh, J. "Nucleation and growth mechanism of diamond during hot-filament chemical vapor deposition," Journal of Material Science, 1994,29,2761-2766.

Kania, D.R,Diamond Electronic Properties and Application. London : Kluwer Academic Publishers,1995.

