

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**รายงานการวิจัย**

**อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซที่ใช้ชั้นความนำพื้นผิวบนฟิล์มเพชร**

Gas sensor using surface conductive layer on diamond films



RCH  
TK  
7841.16  
.D53  
ย 842 ๒

โยธิน วงศ์ประเสริฐ

เลขหมู่.....**81640**  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....**19 ส.ย. 2551**

**ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ได้รับนำไปใช้

11925677

## บทคัดย่อ

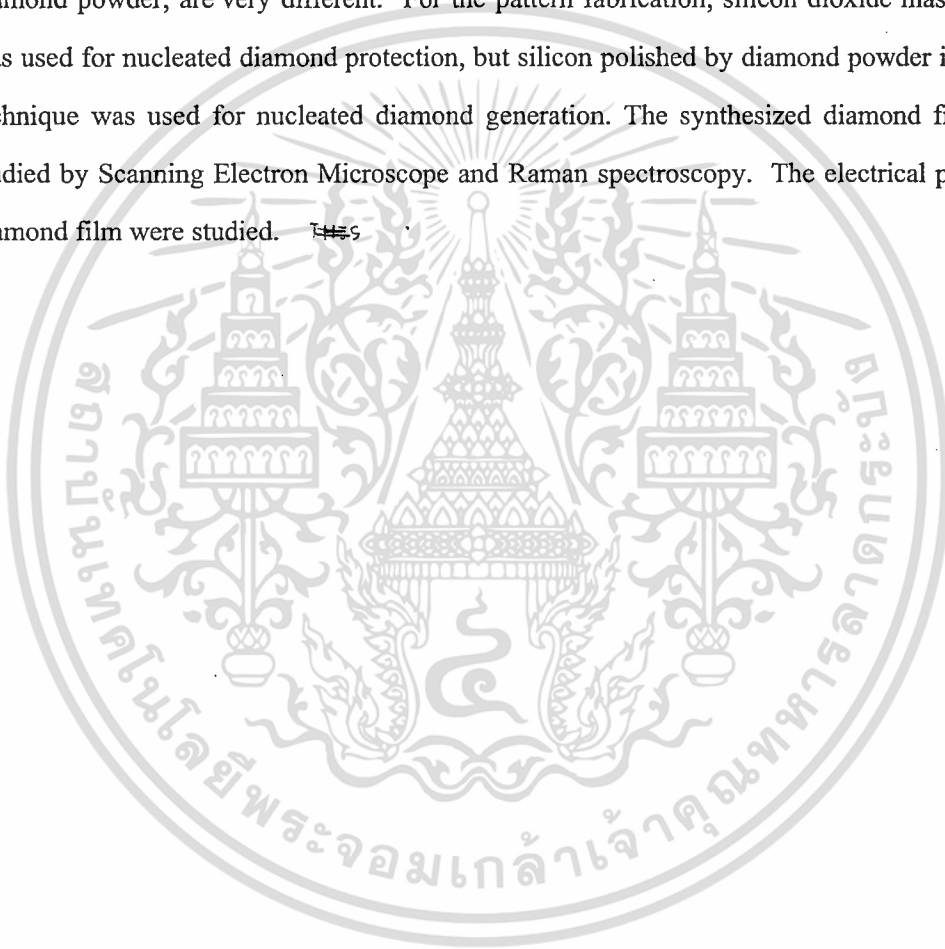
โครงการวิจัยฉบับนี้นำเสนอกระบวนการเลือกพื้นที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion Activation Chemical Vapor Deposition (CACVD) ด้วยก๊าซอะเซทิลีน( $C_2H_2$ )กับก๊าซออกซิเจน( $O_2$ )ที่ความดันบรรยากาศ จุดประสงค์หลักเพื่อพัฒนาเทคนิค CACVD สำหรับสังเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำเพื่อประยุกต์ใช้ในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลการทดลองพบว่าการเตรียมผิวหน้าของฐานรองซิลิคอนจากวิธีต่างกันจะเป็นปัจจัยสำคัญในการนิวคลีเอชัน (Nucleation) และอัตราการนิวคลีเอชัน ของผลึกเพชรด้วยวิธี CACVD บนซิลิคอน(Silicon) ซิลิคอนขัดด้วยผงเพชร ซิลิคอนไดออกไซด์และซิลิคอนไดออกไซด์ขัดด้วยผงเพชร มีค่าแตกต่างกันอย่างมาก ซิลิคอนขัดด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคในผงเพชรและซิลิคอนไดออกไซด์ได้นำมาเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุป้องกันและเลือกการเกิดนิวคลีเอชัน โดยผลของการสังเคราะห์จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และ เทคนิค Raman spectroscopy นอกจากนี้ยังได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรที่ได้จากวิธีการสังเคราะห์นี้ ซึ่งฟิล์มที่ได้เหมาะสมในนำมาเป็นวัสดุของหัววัดก๊าซได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ABSTRACT

This project presents the technique of selected area synthesis of diamond films using combustion activation chemical vapor deposition (CACVD) by acetylene ( $C_2H_2$ ) and oxygen ( $O_2$ ) gas at atmospheric pressure. The main point of thesis is the development of CACVD technique for synthesized semiconductor material which is developed for application in electronics devices. The surface nucleation of substrate was studied by using surface pretreatment. The resulting of surface nucleation, silicon polished diamond powder, silicon dioxide and silicon dioxide polished diamond powder, are very different. For the pattern fabrication, silicon dioxide mask technique was used for nucleated diamond protection, but silicon polished by diamond powder in ultrasonic technique was used for nucleated diamond generation. The synthesized diamond films can be studied by Scanning Electron Microscope and Raman spectroscopy. The electrical properties of diamond film were studied.



# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ขอขอบพระคุณ Prof.Dr.Kazunori Sato ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น สำหรับคำแนะนำทางวิชาการ คำปรึกษา แนวความคิดที่เป็นประโยชน์อย่างมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	4
2.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM).....	4
2.2 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy.....	5
2.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	8
2.4 การวิเคราะห์ด้วย Seebeck effect.....	9
บทที่ 3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรอง.....	11
3.1 บทนำ.....	11
3.2 การเตรียมชิ้นงาน.....	11
3.3 การทดลอง.....	13
บทที่ 4 การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	25
4.1 บทนำ.....	25
4.2 คุณสมบัติภายใต้อุณหภูมิสูง.....	26
4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	39
บรรณานุกรม.....	40
ภาคผนวก.....	44



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	เปรียบเทียบการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ต่างๆ..... 2
1.2	เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรจากการเตรียมพื้นผิวฐานรอง ด้วยวิธีต่าง ๆ..... 3
2.1	ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆของคาร์บอน..... 7
2.2	ค่า Inter-planar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติ (ASTM6-675)..... 9
2.3	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Seebeck effect..... 10
3.1	สรุปเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร..... 13
3.2	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาในเปลวไฟ..... 15
3.3	เงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD..... 24
4.1	ค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ..... 32
4.2	ค่าแรงดันพันธันท์ $V_{pt}$ (V) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไข... 34
4.3	ค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ..... 35
4.4	ค่าพิคัดความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาการไฮโดรเจนเทอมิ เนทต่าง ๆ..... 37
4.5	ค่าความหนาแน่นประจุโฮลของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาการไฮโดรเจน เทอมิเนทต่าง ๆ..... 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แผนภาพการทำงานของ SEM.....	5
2.2	แผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น.....	6
2.3	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก.....	8
2.4	แผนภาพการวิเคราะห์ด้วยปรากฏการณ์ Seebeck.....	10
3.1	กระบวนการเตรียมฐานรอง.....	12
3.2	ภาพถ่ายพื้นผิวของฐานรองซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการเตรียมฐานรอง.....	14
3.3	ภาพถ่ายการนิ่วกลีเอชันบนพื้นผิวต่าง ๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 5 นาที.....	16
3.4	ภาพถ่ายการเกิดนิ่วกลีเอชันบนพื้นผิวต่าง ๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 10 นาที.....	17
3.5	ภาพถ่ายการเกิดนิ่วกลีเอชันบนพื้นผิวต่าง ๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 15 นาที.....	18
3.6	ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 5 นาที.....	19
3.7	ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 10 นาที.....	20
3.8	ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 15 นาที.....	20
3.9	ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 20 นาที.....	21
3.10	ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์ความหนาต่างๆที่เวลาสังเคราะห์ 15 นาที.....	22
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรกับอุณหภูมิ.....	27
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ.....	28
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ.....	29
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ.....	29
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมิเนทที่อุณหภูมิ 500 °C.....	31
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมิเนทที่อุณหภูมิ 600 °C.....	31
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมิเนทที่อุณหภูมิ 700 °C.....	32
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจนเทอมิเนท.....	33
4.9	แผนภาพการวัดชิ้นงานตัวอย่างของชั้นความนำเพชร.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจนเทอ- มิเนท.....	36
4.11 แผนภาพกระบวนการเกิดโหนดในฟิล์มเพชร.....	36
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองแสงที่ความยาวคลื่นแสงต่างๆของฟิล์มเพชร.....	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของปัญหาซึ่งเป็นเหตุผลในการทำวิจัยและได้กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัยและส่วนประกอบวิทยานิพนธ์ไว้ดังนี้

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการใช้ในชีวิตประจำวันเพื่ออำนวยความสะดวก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ในปัจจุบันใช้ซิลิคอน (Silicon) เป็นวัสดุพื้นฐานในการผลิต ด้วยเหตุผลนี้ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีขอบเขตการใช้ อย่างจำกัดด้วยสมบัติทางกายภาพ ไฟฟ้า และแสง จึงมีกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มได้ศึกษาหาวัสดุที่สามารถนำมาใช้แทนซิลิคอน และวัสดุที่ได้รับความสนใจมากวัสดุหนึ่งได้แก่ คาร์บอน (Carbon) ซึ่งวัสดุคาร์บอนนี้มีโครงสร้างมีหลายแบบ เช่น  $sp^1$   $sp^2$  และ  $sp^3$  โครงสร้าง  $sp^3$  เป็นโครงสร้างแบบ เพชร (Diamond structure) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับซิลิคอน (Silicon) และเจอร์มาเนียม (Germanium) และเมื่อได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้ายังพบว่า เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่นกัน[1-4]

ในการศึกษาคาร์บอนในโครงสร้างเพชรนั้นเริ่มต้นจากการใช้เพชรจากธรรมชาติเป็นวัสดุจึง ทำให้ มีราคาแพงไม่คุ้มค่าในการนำไปใช้ได้จริง โดยต่อมาได้มีนักวิจัยได้ทำการสังเคราะห์เพชร ขึ้น โดยศึกษาจากการเกิดตามธรรมชาติจะพบว่าเพชรเกิดจากคาร์บอนในที่มีอุณหภูมิและความดันสูง จึงได้ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีการใช้คาร์บอนในรูปของแกรไฟต์อัดที่แรงดันประมาณ 1 ล้านปอนด์ต่อ ตารางนิ้วและให้ความร้อนประมาณ  $1800^{\circ}C$  (HTHP : High Temperature High Pressure) และได้มีการพัฒนาจนกระทั่งสามารถสังเคราะห์ได้ที่ความดันต่ำ (CVD : Chemical Vapor Deposition)[5-8] และในปัจจุบันการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายได้แก่ Hot filament CVD (HFCVD)[9], DC plasma CVD[10], DC plasma jet CVD[11-12], RF plasma CVD, Microwave plasma CVD[13-14], Electron cyclotron resonance microwave plasma CVD[15] และ Combustion activation CVD (CACVD)[16-24] และในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกวิธี CACVD ในการสังเคราะห์

ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD นี้สามารถแบ่งได้หลายวิธีสามารถเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 1.1 ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกการสังเคราะห์แบบ CACVD เนื่องจากมีข้อได้เปรียบวิธีอื่น[25] ดังนี้

1. สามารถสังเคราะห์ในอากาศได้ ไม่ต้องใช้ Chamber และ บีมสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารของ 25. อุปกรณ์ห้องฯ ราชภัฏกาญจนา เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าขณะสังเคราะห์
4. มีอัตราการเกิดผลึกเร็ว
  - เพชรสูงสุดถึง 200  $\mu\text{m/h}$
  - พิล์มเพชร 100  $\mu\text{m/h}$  ค่าเฉลี่ยที่ 30-50  $\mu\text{m/h}$  และ
  - Diamond Like Carbon (DLC) 200-500  $\mu\text{m/h}$
5. สามารถสังเคราะห์ให้ได้ฟิล์มบริเวณกว้างได้
6. สามารถสร้างบนฐานรองที่เป็นส่วนโค้งได้

ในการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD นี้เป็นวิธีที่เกิดขึ้นใหม่ยังไม่มีการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร อัตราส่วนของก๊าซ อุณหภูมิของฐานรอง ชนิดของฐานรอง และอื่นๆ ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอตัวแปรต่างๆที่มีต่อการเกิดของฟิล์มเพชร

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ต่างๆ[25]

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

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในงานวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซที่ใช้ขึ้นความนำพื้นผิวบนฟิล์มเพชร
2. ศึกษาสมบัติของฟิล์มเพชรที่ความดันทานค่าต่างๆ ที่มีผลต่ออุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุด
3. วิเคราะห์สมบัติความไวของอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซที่ศึกษาในก๊าซต่างๆ เพื่อนำไป

ประยุกต์ใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

การเกิดนิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน เช่น การเกิดฟิล์มเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร สถานะเริ่มต้นของการเกิดนิวคลีเอชันจะช้ามากอีกทั้งค่าความหนาแน่นในการนิวคลีเอชันยังต่ำ แต่ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดย การเตรียมพื้นผิวฐานรองให้มีความเหมาะสม เพื่อเร่งอัตราการนิวคลีเอชันและความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันให้มีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันยังเป็นตัวกำหนดความหนาและขนาดของผลึก การเชื่อมต่อระหว่างผลึกเพชร การยึดเกาะกับฐานรอง ผิวหน้า และ ความสม่ำเสมอของฟิล์มที่ได้ โดยทั่วไปความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันมีค่าสูงจะทำให้ผิวหน้าของฟิล์มที่ได้มีความเรียบ

จากการทดลองศึกษาถึงผลจากการนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรด้วยวิธีการเตรียมพื้นผิวฐานรองต่างๆ กัน พบว่าความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันมีค่าตั้งแต่  $10^3 \text{ cm}^{-2}$  (บนฐานรองที่ไม่มีการเตรียมพื้นผิว) จนถึง  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  (บนฐานรองที่เตรียมพื้นผิวด้วยการขัด) ซึ่งผลของการนิวคลีเอชันบนพื้นผิวดังกล่าวนำมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการเลือกใช้วิธีการต่างๆ ในการเตรียมพื้นผิวดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรจากการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยวิธีต่าง ๆ [25-27]

วิธีการเตรียม	ความหนาแน่นการเกิดนิวคลีเอชัน ( $\text{cm}^{-2}$ )
No pretreatment	$10^3-10^5$
Scratching	$10^6-10^{10}$
Ultrasonic scratching	$10^7-10^{11}$

โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ ขนาดของผลึก ความหนา ด้วยกล้องจุลทรรศน์และ SEM ส่วนระนาบของฟิล์มจะวิเคราะห์ด้วย XRD และใช้ Raman spectrum ในการยืนยันพันธะของอะตอมคาร์บอนว่าเป็นโครงสร้างเพชรรวมถึงคุณภาพของฟิล์มเพชรด้วย ในการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มจะศึกษาในสภาวะอุณหภูมิสูงและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

## บทที่ 2

### การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ผลึกเพชรหรือฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์จะทำการศึกษาขั้นพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 - 1,000 เท่า เพื่อดูลักษณะการเกิดของผลึกนิวเคลียสของฟิล์มเพชร ขนาดของผลึก พื้นที่การเกิด รวมทั้งความหนาแน่นของผลึกว่าเกิดเป็นฟิล์มวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ( SEM ) ในการศึกษาระนาบที่เกิดขึ้นนั้นจะต้องใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ( X-ray diffraction หรือ XRD ) สามารถแสดงระนาบของฟิล์มเพชรได้อย่างละเอียด ต่อจากนั้นจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติว่าฟิล์มเพชรที่ได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น พี หรืออินทรีนซิค และการวิเคราะห์จะใช้ Raman spectroscopy ศึกษาฟิล์มเพชรว่ามีรูปของคาร์บอนใดบ้างเช่น แกรไฟต์ ออสถูนาคาร์บอน และ DLC เป็นต้น

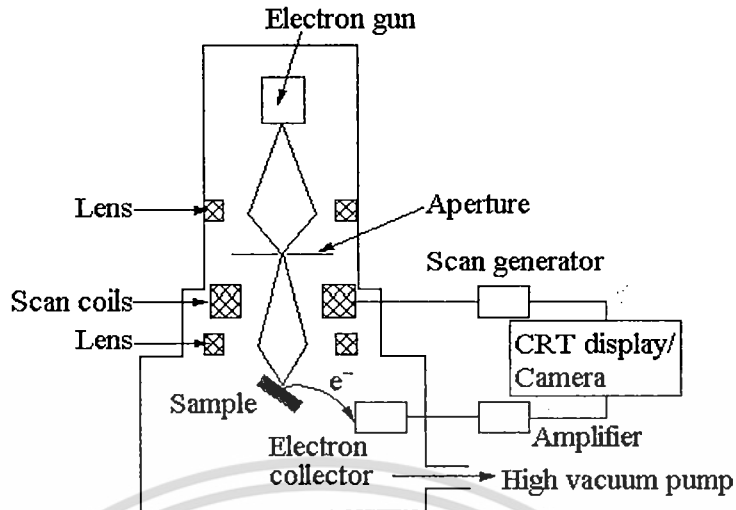
การวิเคราะห์นั้นจะเน้นส่วนที่นำมาวิเคราะห์เฉพาะฟิล์มเพชรมีรายละเอียดของแต่ละเทคนิคมีดังต่อไปนี้

#### 2.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นการศึกษาลักษณะของผิวชิ้นงาน โดยมีกำลังขยาย 50 - 40,000 เท่า สามารถแสดงผลเป็นภาพสามมิติ มีความคมชัดสูงถึง 2.5 - 10 nm โดยหลักการทำงานของ SEM ทำให้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิวขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 2.1

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำงานของ SEM

## 2.2 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscope

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและแกรไฟต์สูง แม้ว่าจะมีแกรไฟต์เพียงเล็กน้อยก็ตามเนื่องจากประสิทธิภาพการกระเจิงของแกรไฟต์มีค่ามากกว่าของเพชรมาก ตำแหน่งและความกว้างของยอดกราฟจาก Raman spectrum เป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่วิเคราะห์ได้

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

$$P = \alpha E \tag{2.1}$$

โดยที่ P คือ โมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

E คือ สนามไฟฟ้า

$\alpha$  คือ Polarizability

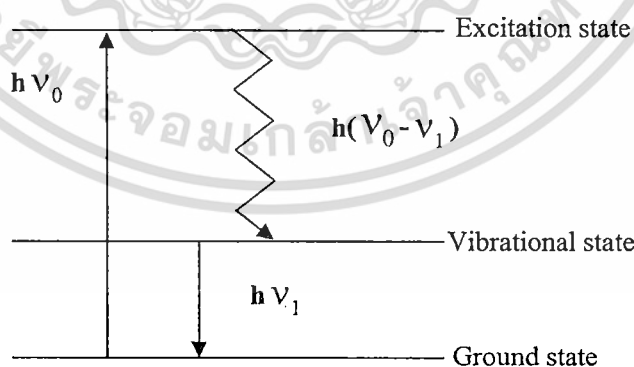
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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  
 $\nu_0$  คือ ความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ  
 $\nu_n$  คือ ความถี่ของโฟนอน  
 $\alpha_n$  คือ Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

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



รูปที่ 2.2 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น

จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงการเกิดปรากฏการณ์ Raman scattering เมื่อยิงลำแสงเลเซอร์ เอกสารนี้ผ่านเข้าไปในชิ้นงานตัวอย่าง รังโฟตอนจากลำแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน  $h\nu_0$  จะเข้าไปอิเล็กตรอน ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอะตอมชิ้นงานตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานไปบางส่วน ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเกิดการกระโดดข้ามไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า “สถานะกระตุ้น” (Excitation state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงตกกลับมาสู่สถานะเดิม โดยมีการคายพลังงานออกมามีค่า  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ส่วนพลังงานที่สูญเสียไปคือ  $h\nu_1$  ถูกใช้สำหรับทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงสร้างผลึก โดยพลังงาน  $h\nu_1$  ที่สูญเสียไปนี้อยู่ในย่านอินฟราเรด พลังงานที่เหลือ  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ก็คือพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั่นเอง สำหรับสเปกตรัมของแสง ที่ได้ จะถูกเรียกว่า “Stoke line”

จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร แกรไฟต์ อีเสียนคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอนแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆของคาร์บอน [27]

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 ( $< 0.1 \mu\text{m}$ )
1,315-1,326 $\text{cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	Broad band, Observed in shock wave produced diamond
1,332 $\text{cm}^{-1}$	Cubic diamond	First order peak with FWHM of $1.9 \text{ cm}^{-1}$ 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

### 2.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

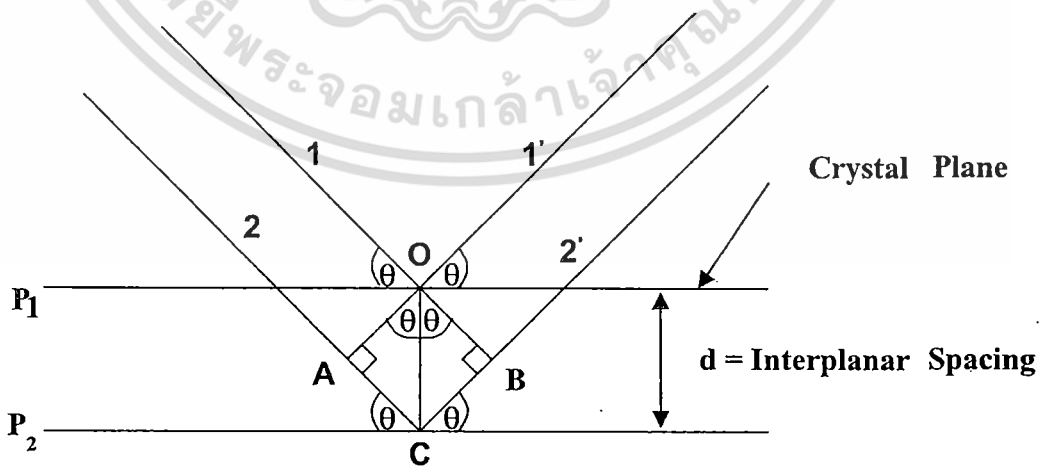
เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) จะใช้พื้นฐานจาก “Bragg’s diffraction law” ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการง่าย ๆ ได้ดังสมการ 2.3 โดยคิดว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบในโครงผลึก ซึ่งสมการของ Bragg พิจารณาจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบในโครงผลึก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

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

$$2d \sin \theta = n \lambda \tag{2.3}$$

เมื่อ

- d = Interplanar spacing
- $\theta$  = มุม Diffraction
- n = ลำดับของการเลี้ยวเบน (n = 1, 2, 3...)
- $\lambda$  = ความยาวคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ รูปที่ 2.3 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สำหรับฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้วัดค่าตัวแปรของโครงสร้างผลึกและพิจารณาลักษณะรูปร่างของฟิล์มได้ รูปแบบคุณลักษณะของผลึกรวมของเพชรที่ได้นั้น ผลึกเพชรต้องมีขนาดใหญ่ (ประมาณ 10 nm หรือ มากกว่านั้น) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกของเพชรเป็นแบบ Cubic ซึ่งมีความสมมาตรสูง การคำนวณแฟคเตอร์ของโครงสร้างทำให้ระนาบของการเลี้ยวเบนมีจำนวนน้อย (ระนาบของการเลี้ยวเบนที่ได้  $\{hkl\}$  คือ  $\{111\}$ ,  $\{220\}$ ,  $\{311\}$ ,  $\{400\}$ ,  $\{331\}$  และอื่น ๆ โดย  $h, k, l$  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
-	222
0.8916	400
0.8182	331
0.7280	422
0.6864	511, 333
0.6305	440
0.6029	531

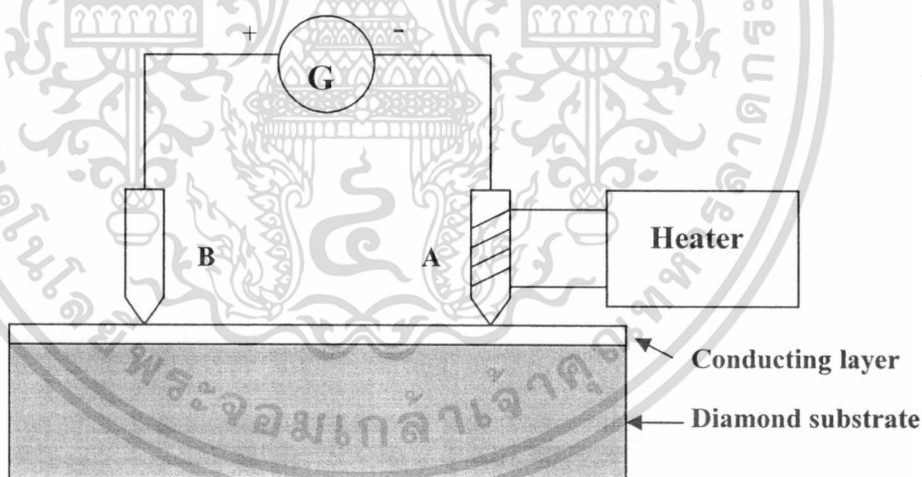
#### 2.4 การวิเคราะห์ด้วย Seebeck effect

ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการทำให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่ปลายด้านหนึ่งซึ่งทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามแท่งวัสดุความร้อน และพบว่ามีปรากฏการณ์เกิดขึ้นคือมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุพาหะ เนื่องจากความเข้มของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความเข้มข้นของประจุพาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะในแก๊สคู่ขึ้น จากหลักการดังกล่าวจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรว่ามีพาหะหลักชนิดใด การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าวจะใช้อุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 2.4 จากรูปที่ 2.4 พบว่าชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเข็ม 2 เล่ม กคบนฟิล์มเพชรโดยเข็ม A ทำหน้าที่เป็นเข็มร้อนมีลวดทั้งสแตนพินอยู่โดยรอบ ส่วนเข็ม B ทำหน้าที่เป็นเข็มเย็นที่อุณหภูมิห้อง นำกัลวานอมิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกของกัลวานอมิเตอร์ต่อกับเข็ม B และที่ขั้วลบต่อกับเข็ม A เมื่อให้ความร้อนกับเข็ม A ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Seebeck effect

กัลวานอมิเตอร์	ชนิดประจุพาหะ
บวก	โฮล
ลบ	อิเล็กตรอน
ศูนย์	โฮล เท่ากับ อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.4 แผนภาพการวิเคราะห์ด้วยปรากฏการณ์ Seebeck

## บทที่ 3

### การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรอง

ในบทนี้นำเสนอกลไกการเกิดฟิล์มเพชรจากกระบวนการ CVD เนื่องจากการเกิดของฟิล์มเพชรนั้นต้องมีความเข้าใจในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีในสถานะก๊าซที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง โดยศึกษากระบวนการแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามลักษณะของฐานรองที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งเน้นการวิเคราะห์จากปฏิกิริยาก๊าซเปลวไฟ ปฏิกิริยาที่ผิวฐานรอง และปรากฏการณ์นิวคลีเอชัน การอธิบายผลการสังเคราะห์นั้นจะกล่าวโดยละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

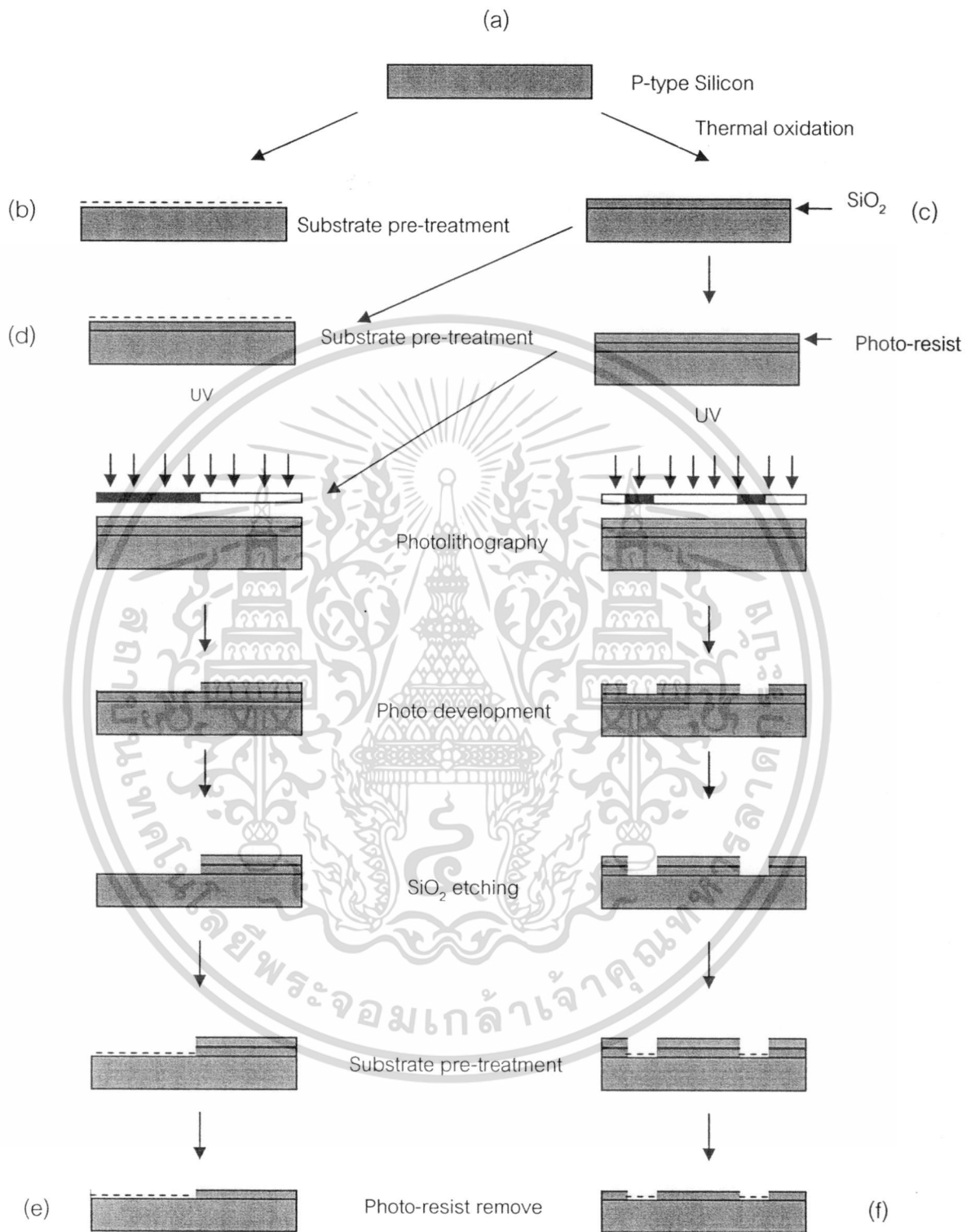
#### 3.1 บทนำ

ความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันจะใช้ภาพถ่ายซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นของการเกิดนิวคลีเอชัน 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 ก. ซึ่งเป็นชุดทดลองที่ออกแบบมาเพื่อการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ได้กำหนดขึ้นจากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ ในการเตรียมชิ้นงานได้แก่ กระบวนการทำความสะอาดฐานรองด้วยกระบวนการของสุญญากาศอิเล็กทริกอนิกส์ เมื่อทำความสะอาดฐานรองแล้วนำฐานรองผ่านกระบวนการเตรียมผิวหน้าแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลอง

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

ตารางที่ 3.1 สรุปเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ตัวแปร	เงื่อนไขการทดลอง
ความดัน	1 บรรยากาศ
อัตราส่วนก๊าซออกซิเจนกับอะเซทิลีน	0.7 - 0.95 โดยปริมาตร
ก๊าซออกซิเจน (cc/min)	99.5% , อัตราการไหล 140-950 cc/min
ก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	99.95% , อัตราการไหล 200-1000 cc/min
ขนาดของหัวเชื่อม	100
ฐานรอง	ซิลิคอนขัดมัน ซิลิคอนขัดด้วยครีมเพชร ซิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชร ซิลิคอนไดออกไซด์ และซิลิคอนไดออกไซด์อัลตราโซนิกในผงเพชร
อุณหภูมิฐานรอง	500-1,350 °C
ระยะห่างระหว่างแปลวกับฐานรอง	แปลวชั้นกลาง และแปลวชั้นนอก (0.1 - 1.1 mm)
เวลาในการสังเคราะห์	5 - 20 นาที

ในการทดลองการสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองชนิดต่างๆนี้เป็นการศึกษาถึงการนิวคลีเอชันของฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการเตรียมพื้นผิวด้วยเทคนิคต่าง ๆ กัน[27, 30-32] ดังนี้

1. ผิวหน้าซิลิคอนขัดมัน
2. ผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์
3. ผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์อัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5 \mu\text{m}$

4. ผิวหน้าซิลิคอนที่ขัดด้วยครีมเพชรขนาด  $0.25 \mu\text{m}$
5. ผิวหน้าซิลิคอนอัลตราโซนิคในผงเพชรขนาด  $0.5 \mu\text{m}$

ลักษณะผิวหน้าของซิลิคอนที่เตรียมด้วยวิธีการขัดด้วยครีมเพชรและการอัลตราโซนิคในผงเพชรแสดงดังรูปที่ 3.13 โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ 5 10 และ 15 นาที จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรจะเกิดขึ้นน้อยมากบนพื้นผิวที่มีความเรียบได้แก่ซิลิคอนไดออกไซด์ และผิวซิลิคอนขัดมัน แต่พื้นผิวที่มีรอยขีดจากครีมเพชรหรืออัลตราโซนิคในผงเพชรความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรมากแสดงดังรูปที่ 3.2-3.16 ซึ่งผลการทดลองสามารถแบ่งตามความหนาแน่นการนิวคลีเอชันได้แก่ วัสดุป้องกันการนิวคลีเอชันและวัสดุกระตุ้นการนิวคลีเอชัน โดยความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของวัสดุต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.12



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายพื้นผิวของฐานรองซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการเตรียมฐานรอง

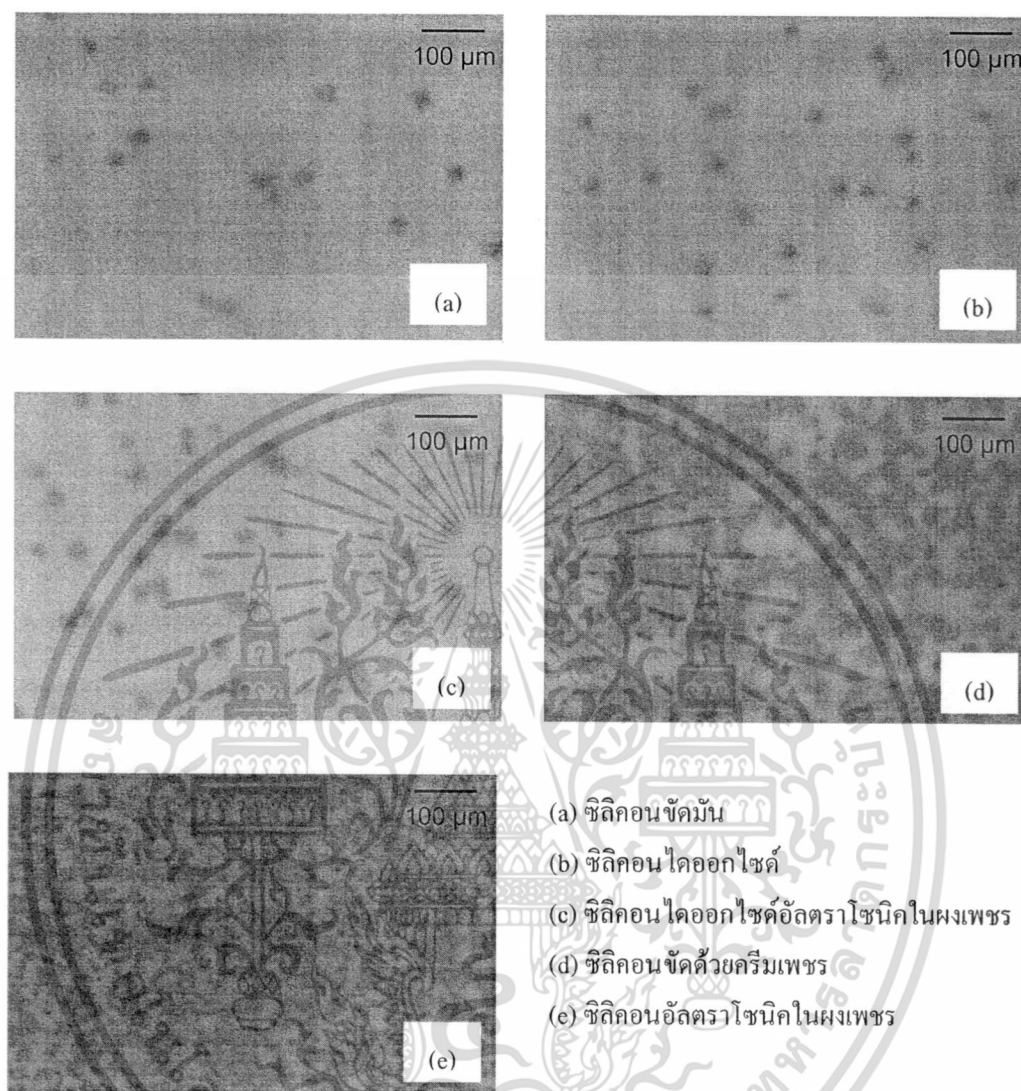
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของผิวหนังด้วยวิธีต่างๆ

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

ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของการเกิดฟิล์มเพชรแต่มีความสำคัญอย่างมากเพราะถ้ามีความหนาแน่นการนิวคลีเอชันมาก[33-36] แต่ไม่มีความสม่ำเสมอก็ไม่เป็นผลดีต่อฟิล์มเพชร เนื่องจากฟิล์มที่มีการนิวคลีเอชันที่ไม่สม่ำเสมอจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของผลึกแตกต่างกันเป็นผลให้ฟิล์มเพชรที่ได้มีค่าความหนาที่ไม่เท่ากัน

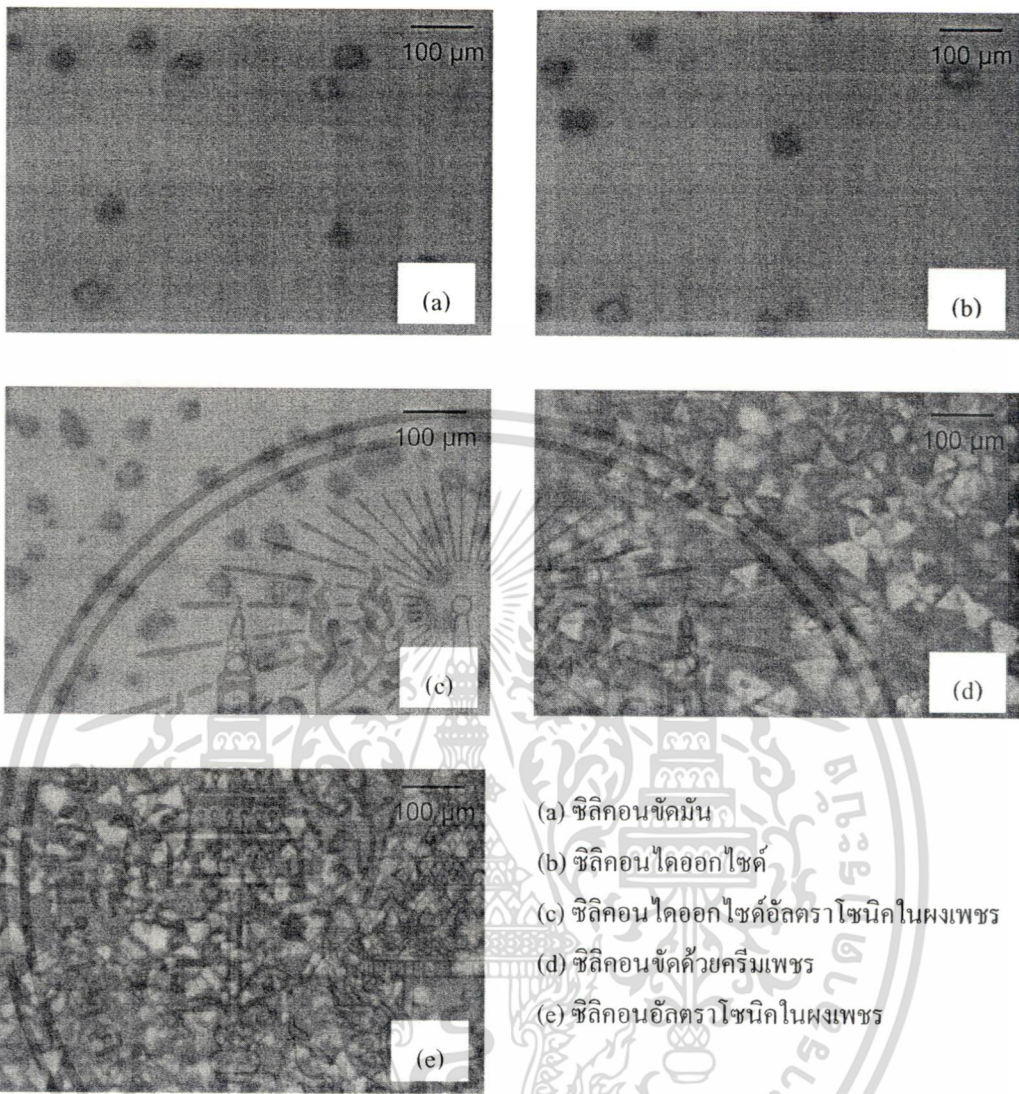
การหาค่าความหนาแน่นจะใช้วิธีสุ่มนับจำนวนของนิวคลีเอชันที่เกิดขึ้นที่เวลาสังเคราะห์ที่ 5 นาทีดังรูปที่ 3.3 และหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน ผลการสังเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างความหนาแน่นการนิวคลีเอชันอย่างเด่นชัด และทำการสังเคราะห์ที่เวลา 10 และ 15 นาที เพื่อหาเวลาสังเคราะห์ที่น้อยสุดในการเกิดเป็นฟิล์มเพชร



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายการนิวเคลียเซชันบนพื้นผิวต่างๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 5 นาที

จากรูปที่ 3.3 การนิวเคลียเซชันนั้นสามารถเกิดได้บนผิวหน้าซัลฟอนไดออกไซด์ และซัลฟอนไดออกไซด์ที่อัลตราโซนิกในผงเพชร และที่ผิวหน้าซัลฟอนอัลตราโซนิกในผงเพชรมีความหนาแน่นสูงที่สุด และทำการทดลองโดยใช้เวลาสังเคราะห์เป็น 10 นาที ผลการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



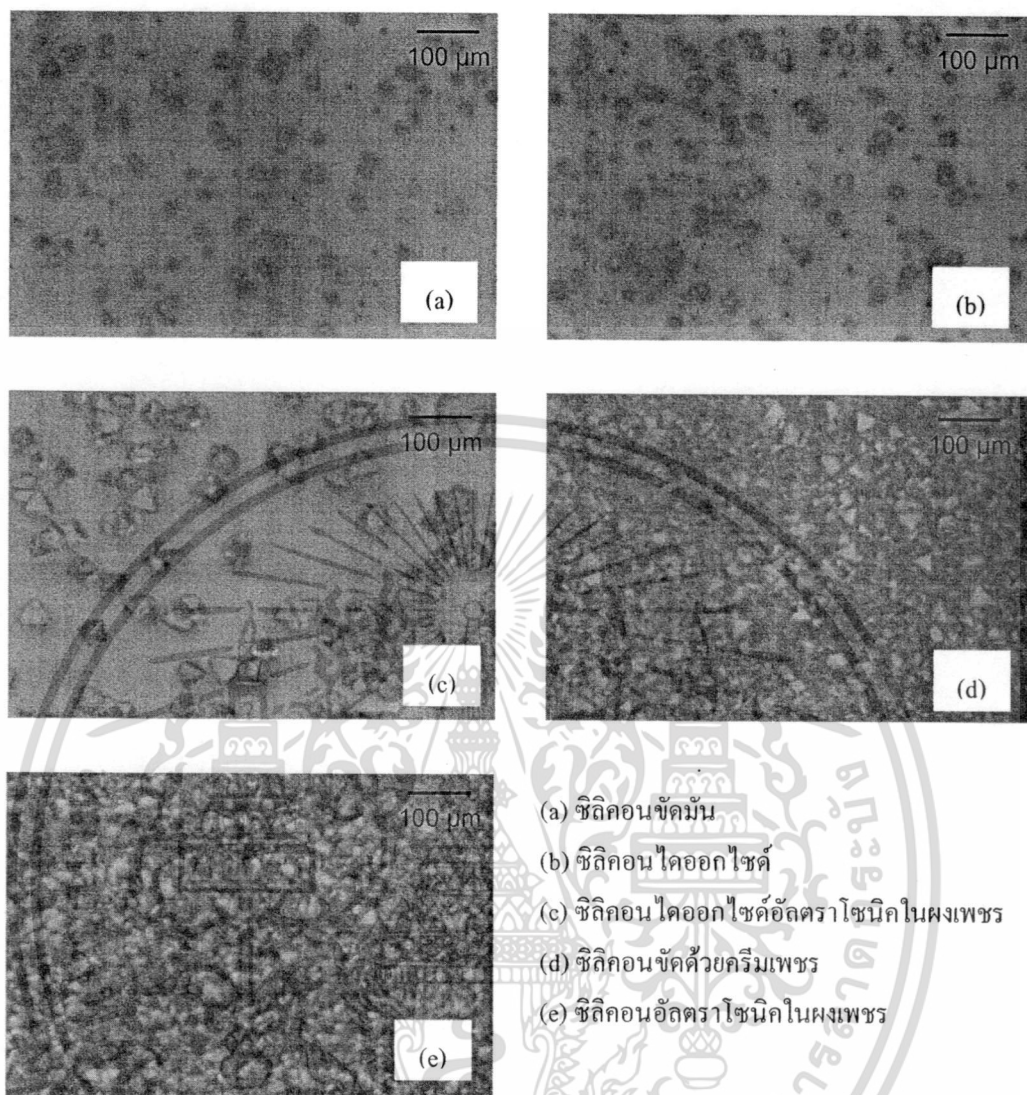
- (a) ซิลิโคนขัดมัน
- (b) ซิลิโคนไดออกไซด์
- (c) ซิลิโคน ไดออกไซด์อัลตราโซนิคในผงเพชร
- (d) ซิลิโคนขัดด้วยครีมเพชร
- (e) ซิลิโคนอัลตราโซนิคในผงเพชร

รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายภาพการเกิดนิวเคลียสบนพื้นผิวต่างๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 10 นาที

จากรูปที่ 3.4 เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีผลึกเพชรขนาดเล็กเกิดกันต่อเนื่องจนเกิดเป็นฟิล์มเพชรซึ่งเกิดบนฐานรองซิลิโคนที่มีการเตรียมพื้นผิวเท่านั้น แต่ผลึกบนซิลิโคนไดออกไซด์จะมีขนาดของผลึกขนาดใหญ่กระจายทั่วทั้งฐานรอง และทำการสังเคราะห์โดยใช้เวลาเท่ากับ 15 นาที ผลการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.5

81640

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายการเกิดนิวเคลียชันบนพื้นผิวต่าง ๆ เมื่อเวลาสังเคราะห์ 15 นาที

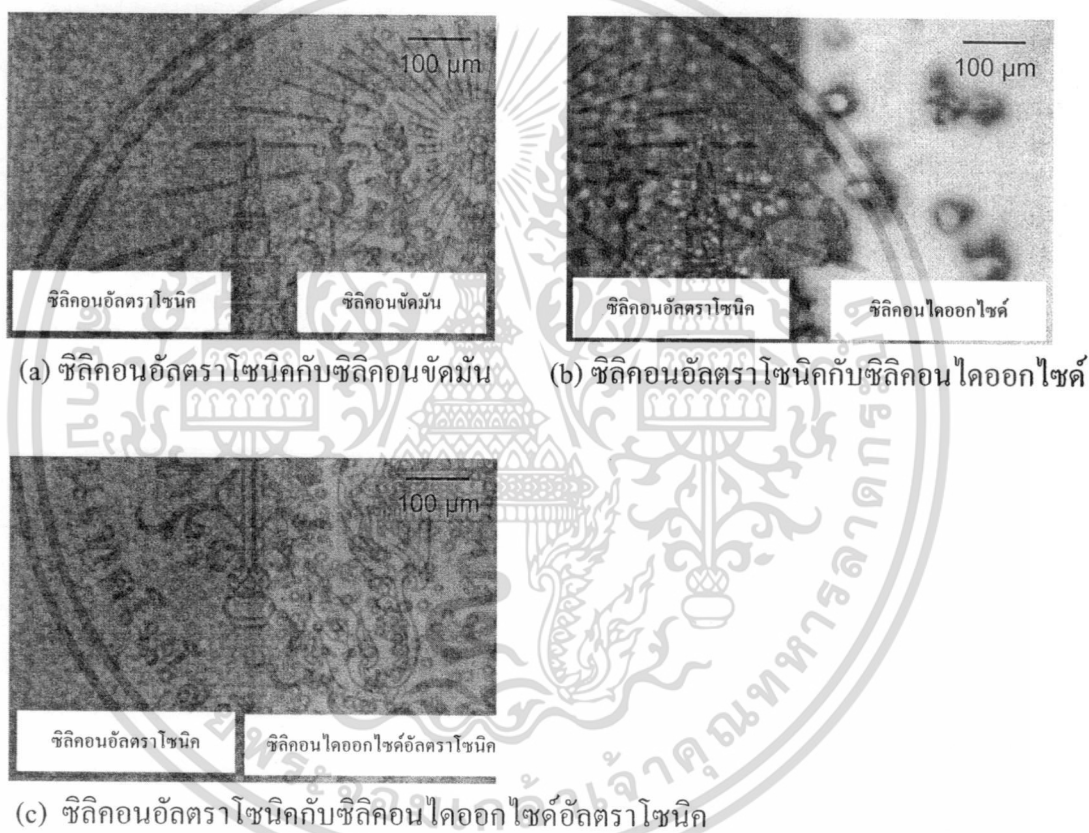
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวัสดุที่เหมาะสมกับการเป็นตัวป้องกันการเกิดนิวเคลียชัน ได้แก่ ซิลิกอนขัดมัน ซิลิกอนไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์อัลตราโซนิคในผงเพชร ส่วนวัสดุที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นได้แก่ซิลิกอนที่อัลตราโซนิคในผงเพชร ซึ่งมีความหนาแน่นการนิวเคลียชันแตกต่างกันประมาณ 100,000 เท่า และขนาดของผลึกที่เกิดบนผิววัสดุเรียบจะมีขนาดใหญ่ แต่ที่บริเวณที่มีการเตรียมผิวหน้าจะมีขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาถึงความสม่ำเสมอของผลึกแล้วพบว่าผิวหน้าที่อัลตราโซนิคในผงเพชรมีความสม่ำเสมอดีกว่าการขัด เพราะการขัดด้วยครีมเพชรมีขีดจำกัดเนื่องจากขึ้นกับประสิทธิภาพในการขัดซึ่งไม่สามารถควบคุมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

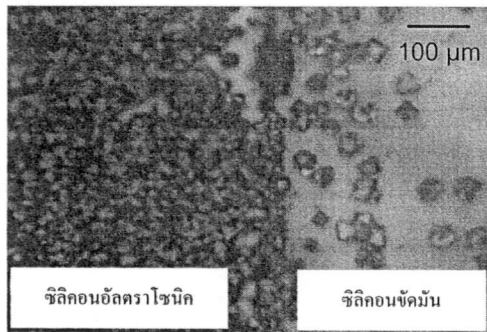
เมื่อเลือกวัสดุที่ป้องกันและกระตุ้นการเกิดนิวเคลียเอชันแล้วต่อไปจะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยการสังเคราะห์ในเวลาเดียวกันทั้งสองวัสดุ จึงต้องมีกระบวนการเตรียมฐานรองซึ่งมีสองวัสดุดังนี้

- ซิลิคอนอัลตราโซนิคกับซิลิคอนขัดมัน
- ซิลิคอนอัลตราโซนิคกับซิลิคอนไดออกไซด์
- ซิลิคอนอัลตราโซนิคกับซิลิคอนไดออกไซด์อัลตราโซนิค

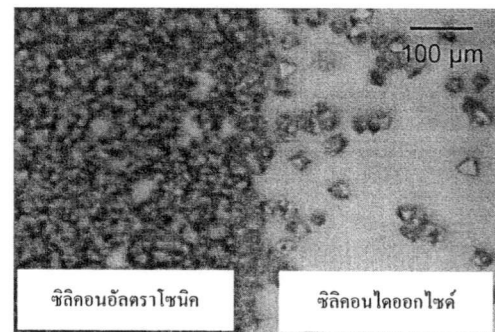
การสังเคราะห์ใช้เวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป ผลการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.6 - 3.9



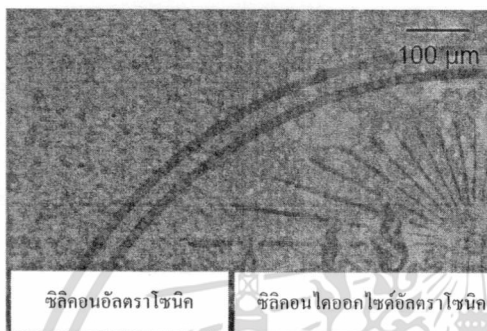
รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 5 นาที



(a) ชิตอนอัลตราไวโชนิกกับชิตอนข้ามมัน

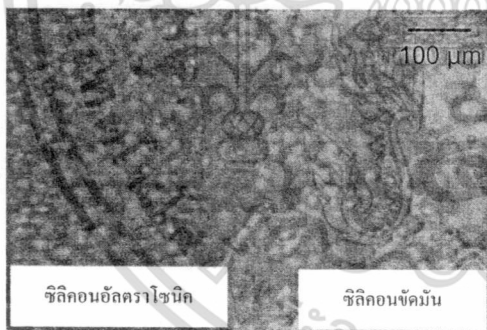


(b) ชิตอนอัลตราไวโชนิกกับชิตอนไดออกไซด์

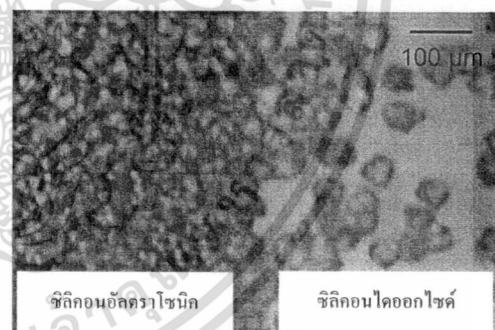


(c) ชิตอนอัลตราไวโชนิกกับชิตอนไดออกไซด์อัลตราไวโชนิก

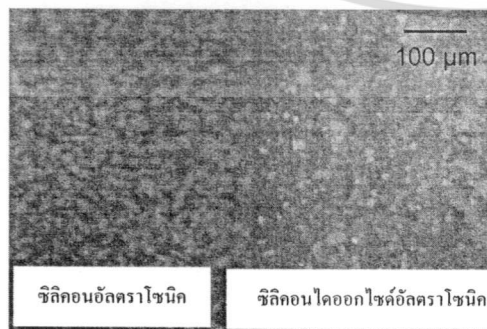
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 10 นาที



(a) ชิตอนอัลตราไวโชนิกกับชิตอนข้ามมัน



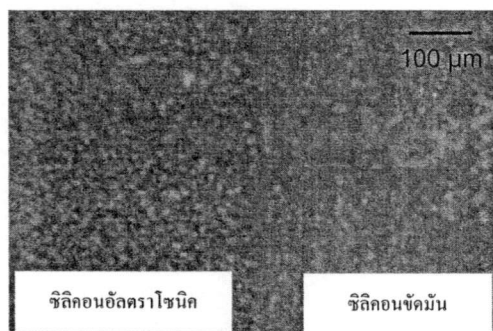
(b) ชิตอนอัลตราไวโชนิกกับชิตอนไดออกไซด์



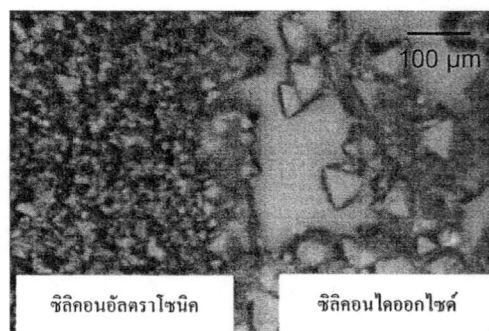
(c) ชิตอนอัลตราไวโชนิกกับชิตอนไดออกไซด์อัลตราไวโชนิก

รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 15 นาที

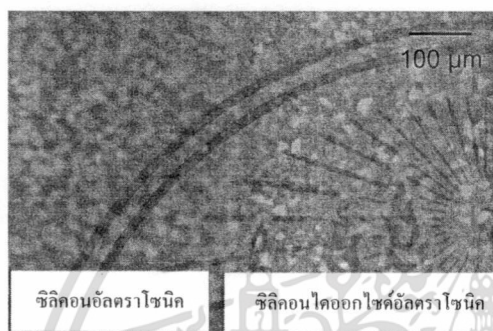
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมดโดยไม่มีการนำออกไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ซิลิคอนอัลตราโซนิคกับซิลิคอนซัดมัน



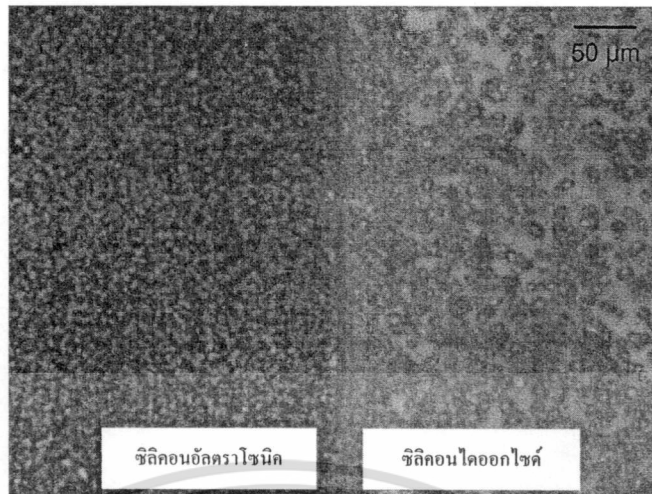
(b) ซิลิคอนอัลตราโซนิคกับซิลิคอนไดออกไซด์



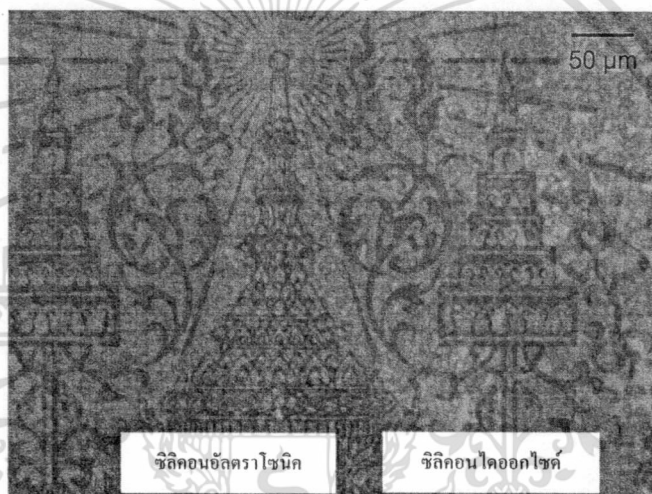
(c) ซิลิคอนอัลตราโซนิคกับซิลิคอนไดออกไซด์อัลตราโซนิค

### รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนฐานรองต่างชนิดกันใช้เวลาสังเคราะห์ 20 นาที

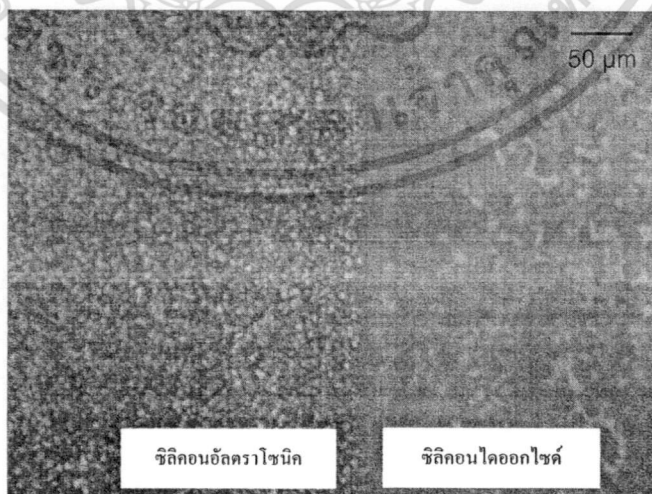
ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มและจำนวนผลึกจะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการสังเคราะห์ผ่านมากกว่า 10 นาที จะได้ฟิล์มเพชรที่มีความต่อเนื่องและพบว่าความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์มีผลต่อการป้องกันการนิวเคลียชัน ซึ่งความหนาของฟิล์มเพชรที่เกิดบริเวณขอบของซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อต้องการจะลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกนั้นทำได้ยาก 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

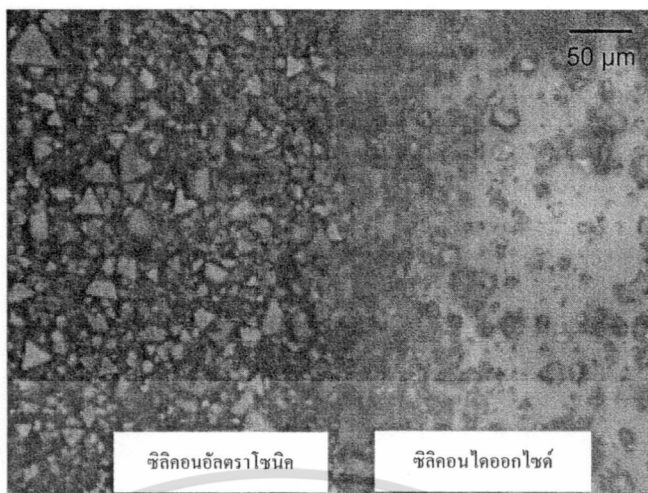


(b) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 10,000 Å

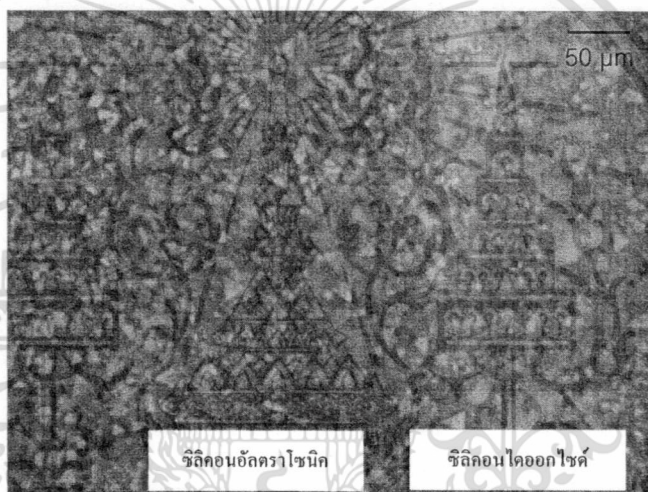


(c) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 20,000 Å

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3.10 ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ความหนาต่างๆที่เวลาสังเคราะห์ 15 นาที  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) ซิลิคอน ไดออกไซด์ ที่ความหนา 25,000 Å



(e) ซิลิคอน ไดออกไซด์ ที่ความหนา 30,000 Å

รูปที่ 3.10 (ต่อ) ภาพถ่ายฟิล์มเพชรที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์ความหนาต่างๆที่เวลาสังเคราะห์ 15 นาที

จากผลการทดลองเมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างนำไปวิเคราะห์ความหนาด้วยเครื่อง Ellipsometer เพื่อวัดความหนาของซิลิคอน ไดออกไซด์พบว่าความหนาของฟิล์มลดลงในอัตราเฉลี่ย 200 Å/min ฉะนั้นจึงต้องทำการสร้างชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ที่มีความหนามากกว่าความหนาของฟิล์มที่สร้าง และต้องเพิ่มความหนาสำหรับการชดเชย

ความหนาของซิลิคอน ไดออกไซด์ที่หนาเกินไปก็ไม่เหมาะสมกับการสังเคราะห์เนื่องจาก ซิลิคอน ไดออกไซด์จะอยู่ใกล้เปลวไฟมากกว่าฐานรองจึงได้รับความร้อนมากกว่ารวมทั้งมีการนำ ความร้อนที่ไม่ดีนักจึงมีอุณหภูมิสูงกว่าฐานรอง การมีอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยา สูงไปด้วยและเหตุผลอีกประการหนึ่งคือการสร้างซิลิคอน ไดออกไซด์ที่ความหนามากเกินความ จำเป็นต้องใช้เวลานานเกินไปสำหรับใช้เป็นชั้นป้องกันการเกิดนิวเคลียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าการสังเคราะห์เพชรในรูปของผลึก ฟิล์ม และ เฉพาะที่นั้นต้องคำนึงถึงความหนาแน่นการนิวคลีโอซันดังตารางที่ 3.2 ซึ่งเมื่อต้องการสังเคราะห์ เพชรบนฐานรองใดๆ ต้องใช้เวลานั้นอยู่กับความหนาแน่นการนิวคลีโอซัน ส่วนค่าพารามิเตอร์ของ การสังเคราะห์สรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD

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

ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ตามลวดลายที่ออกแบบไว้จะได้ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้ในการสร้าง ลวดลายของฟิล์มเพชรระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลาย 10  $\mu\text{m}$  และขนาดความกว้างต่ำสุดของ ลวดลาย 10  $\mu\text{m}$  และความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ต้องมีความหนามากกว่าความหนา ของฟิล์มเพชรที่ต้องการรวมกับอัตราการกัด 200  $\text{\AA}/\text{min}$

## บทที่ 4

### การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

ในบทนี้กล่าวถึงคุณสมบัติของฟิล์มเพชรเนื่องจากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติในอุณหภูมิสูงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติตอบสนองทางแสง โดยจะกล่าวถึงผลการทดลองและทฤษฎีไปพร้อมกัน

#### 4.1 บทนำ

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

ความนำความร้อน (Thermal conductivity) เพชรมีค่าความนำความร้อนสูงที่สุดคือมีค่า 20 W/cm<sup>2</sup>·K เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ในภาคผนวก ข ค่าความนำความร้อนนี้จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับตัวแปรต่างๆ เช่น ลักษณะของผลึกมีส่วนต่อค่าความนำความร้อนคือฟิล์มเพชรที่เป็นผลึกรวม (Polycrystalline) จากการสร้างที่ดีมีความนำความร้อนเป็น 55 % ของผลึกเดี่ยวในระนาบทิศทางการวัดเดียวกัน ส่วนในทิศทางระนาบของการปลูกผลึกความนำความร้อนของผลึกเดี่ยวจะมีค่ามากกว่า 25 % โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก

ความจุความร้อนต่อโมล (Molar heat capacity) ค่าความจุความร้อนต่อโมล หมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารที่มีปริมาณหนึ่งโมลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา จากตารางที่ ข-4 ในภาคผนวก ข แสดงการเปรียบเทียบค่าความจุความร้อนต่อโมลระหว่างเพชรกับวัสดุชนิดอื่นๆ จะพบว่าค่าความจุความร้อนต่อโมลของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ แสดงว่าเพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีหรือเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อน

การขยายตัวจากความร้อน (Thermal expansion) คือค่าอัตราส่วนของความยาวของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเปรียบเทียบกับความยาวที่อุณหภูมิ 0 °C ค่าการขยายตัวจากความร้อนนี้จะเป็นส่วนโดยตรงกับค่าความจุความร้อนต่อโมล สำหรับของแข็งค่าสัมประสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงข้อมูลเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการกระจายความร้อนเชิงปริมาตรจะมีค่ามากกว่าเชิงเส้นประมาณ 3 เท่า ค่าการขยายตัวจากความร้อนของเพชรและวัสดุอื่นๆ เปรียบเทียบไว้ในตารางที่ ข-3 ในภาคผนวก ข

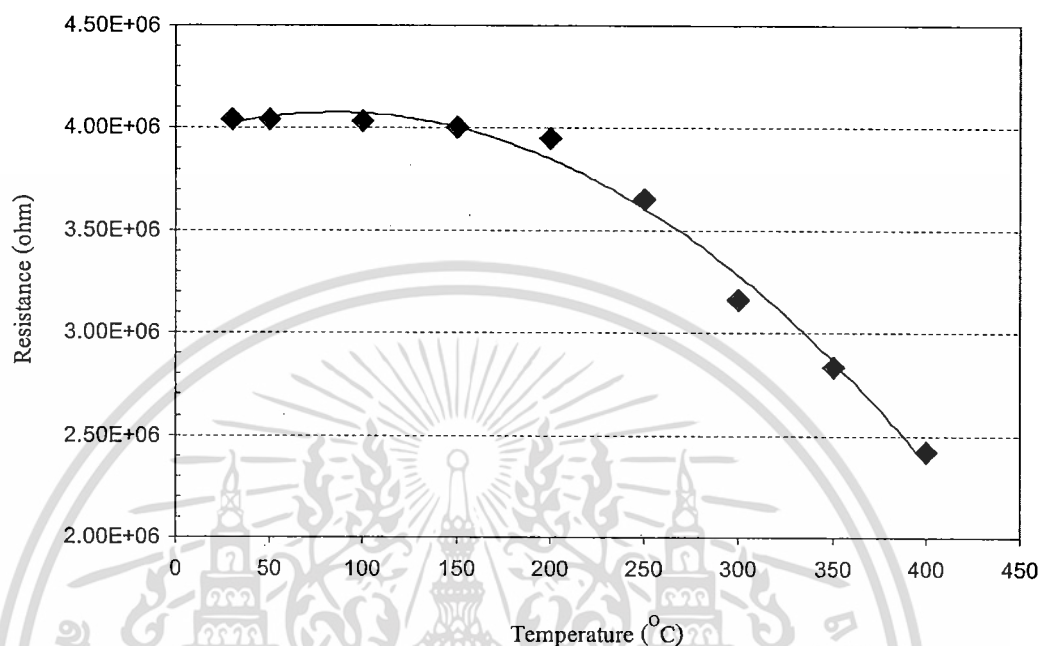
คุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง  $1,800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า  $2,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่  $2.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$  ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง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

สำหรับกรณีของสารเจือผู้ให้ (Donor) หากพิจารณาในโตรเจนพบว่าไม่สามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นของไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าแถบความนำมาก คือมีค่าถึง  $1.57 \text{ eV}$  ดังนั้นจึงไม่เกิด Shallow level ขึ้น อีกทั้งอะตอมของไนโตรเจนยังทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ส่วนกรณีของฟอสฟอรัสซึ่งมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าคาร์บอนการคำนวณจากทฤษฎีทำนายว่าฟอสฟอรัสสามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ Okano et al. รายงานในปี ค.ศ. 1990 ว่าได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอื่นขึ้นมา โดยใช้ไอระเหยของสารละลาย  $\text{P}_2\text{O}_5$  ในเมทานอล ซึ่งถูกเจือจางด้วยอะซิโตน ค่าความหนาแน่นประจุพาหะวัดได้  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  และความคล่องตัวของอิเล็กตรอน  $50 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  แต่ปัญหาที่พบคือ ไม่สามารถควบคุมค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์ยังไม่มี ความแน่นอน และอะตอมฟอสฟอรัสมีขนาดใหญ่ เมื่อสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนแล้วมีผลทำให้โครงผลึกของเพชรเสียรูปไป ดังนั้นลิเทียมจึงเป็นสารที่ได้รับความนิยมและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์มเพชรที่ทำการเจือสารลิเทียมด้วยวิธี Ion-implantation แสดงคุณสมบัติเป็นฟิล์มชนิดอื่น แต่ในการเจือสารแบบ In-situ และ In-diffusion จะไม่เกิดผลตามต้องการ เนื่องจากเกิดการชดเชยด้วยความหนาแน่นสูงของสถานะผู้รับที่กระจายอยู่ในแถบพลังงานต้องห้ามตลอดจนลิเทียมในเพชรมีการกระจายตัวสูงอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้องซึ่งทำให้การเจือสารไม่มีความแน่นอน

#### 4.2 คุณสมบัติในอุณหภูมิสูง

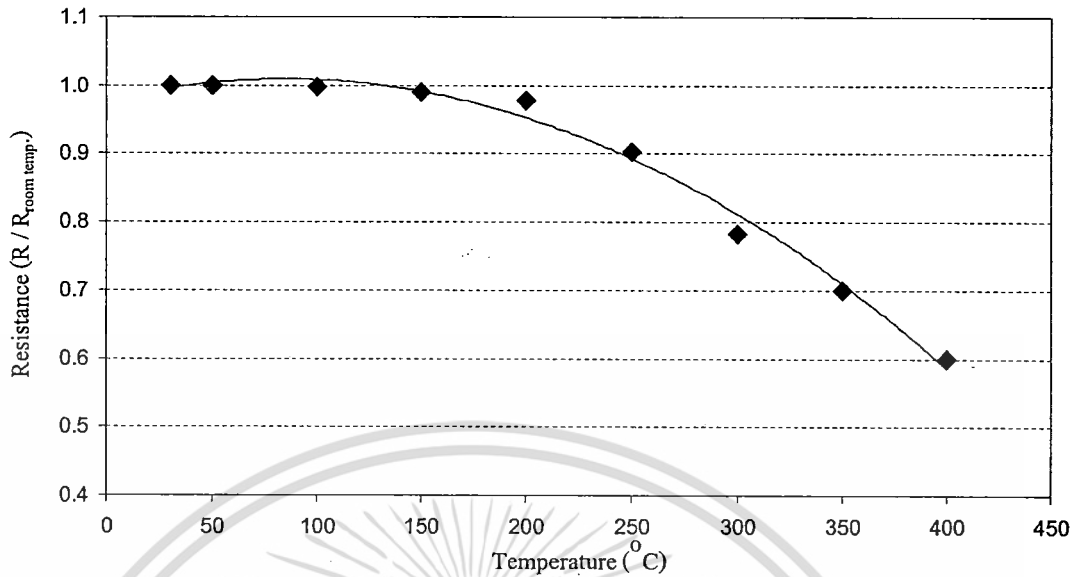
การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องทราบว่ามีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สภาพความต้านทานลดลง [37-39] เพราะมีประจุพาหะเกิดเพิ่มขึ้นทั้งโฮลและอิเล็กตรอนจึงทำให้ความต้านทานลดลง คุณสมบัตินี้เป็นลักษณะพิเศษของสารกึ่งตัวนำโดยใช้การวัดความต้านทานภายในเตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ด้วยเครื่อง Takedariken digital multimeter ก่อนเริ่มทำการทดลองจำเป็นต้องสร้างรอยต่อโลหะเพื่อทำการเชื่อมต่อสายลวดออกมาจากเตาเผา โลหะที่จะนำมาทำเป็นรอยต่อต้องเป็นแบบโอห์มมิกเพื่อให้รอยต่อไม่มีผลต่อความต้านทานและมีจุดหลอมเหลวสูงซึ่งได้แก่ ทองคำ (Au) และ เงิน (Ag) โดยฟิล์มเพชรนี้มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง ( $30^{\circ}\text{C}$ ) เท่ากับ  $4.04\text{ M}\Omega$  จากนั้นทำการแปรค่าอุณหภูมิตั้งแต่  $30^{\circ}\text{C}$  ถึง  $400^{\circ}\text{C}$  เพื่อดูค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ดังผลที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรกับอุณหภูมิ

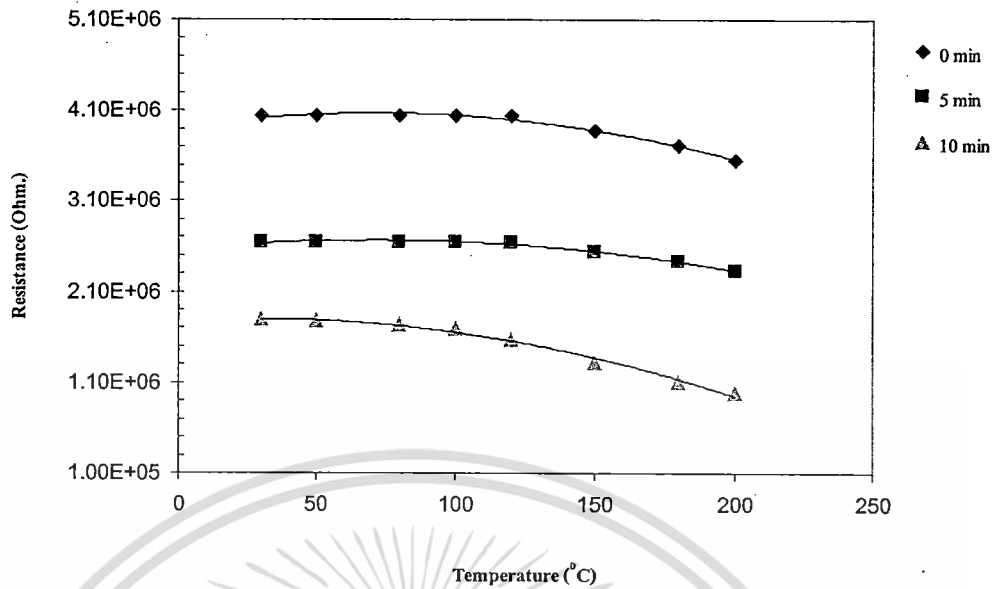
จากรูปที่ 4.1 พบว่าความต้านทานของฟิล์มเพชรแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ นั่นคือที่อุณหภูมิเพิ่มฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานจะลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า  $200^{\circ}\text{C}$  และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่  $250^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไปค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น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



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ

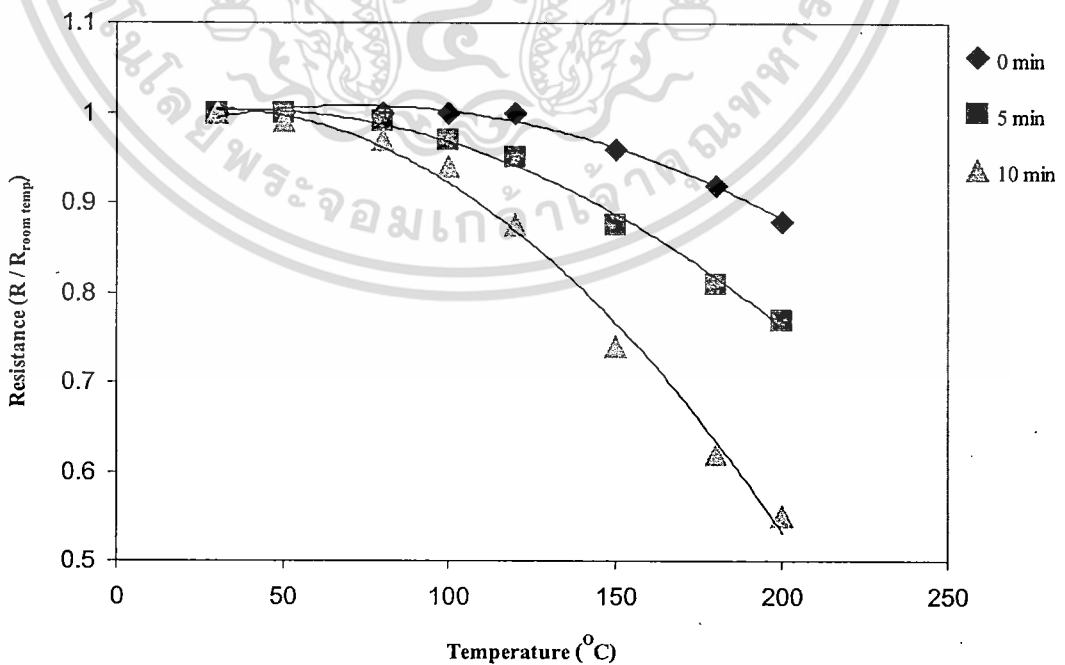
การวิเคราะห์ชนิดประจุพาหะด้วยเทคนิค Seebeck effect ทำการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้ด้วยชุดเครื่องมือตามรูปที่ 2.6 ในการทำการทดลองได้จ่ายความร้อนกับฮีตเตอร์อุณหภูมิประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$  เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกัลวานอมิเตอร์ได้อย่างเด่นชัดขึ้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ว่าฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD กัลวานอมิเตอร์ชี้ไปยังตำแหน่งศูนย์ แสดงว่าจำนวนพาหะที่เคลื่อนที่จากฮีตเตอร์ไปยังฮีตเย็นนั้นมีเท่ากันทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้ไม่เกิดความต่างศักย์ระหว่างฮีตร้อนและฮีตเย็นขึ้น จึงสรุปได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก

เมื่อทำกระบวนการไฮโดรเจนเทอร์มิเนชันที่เวลา 5 นาที เปรียบเทียบกับที่เวลา 10 นาที จะเห็นว่าเมื่อเวลานานจะทำให้ความต้านทานที่ได้ในการทำกระบวนการไฮโดรเจนเทอร์มิเนชันลดลง ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้คือชนิดพาหะโฮลแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการไฮโดรเจนเทอมีเนชันความต้านทานของฟิล์มจะลดลง ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานจะลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วง อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้อง  $R/R_r$  แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมาตรฐานกับอุณหภูมิ

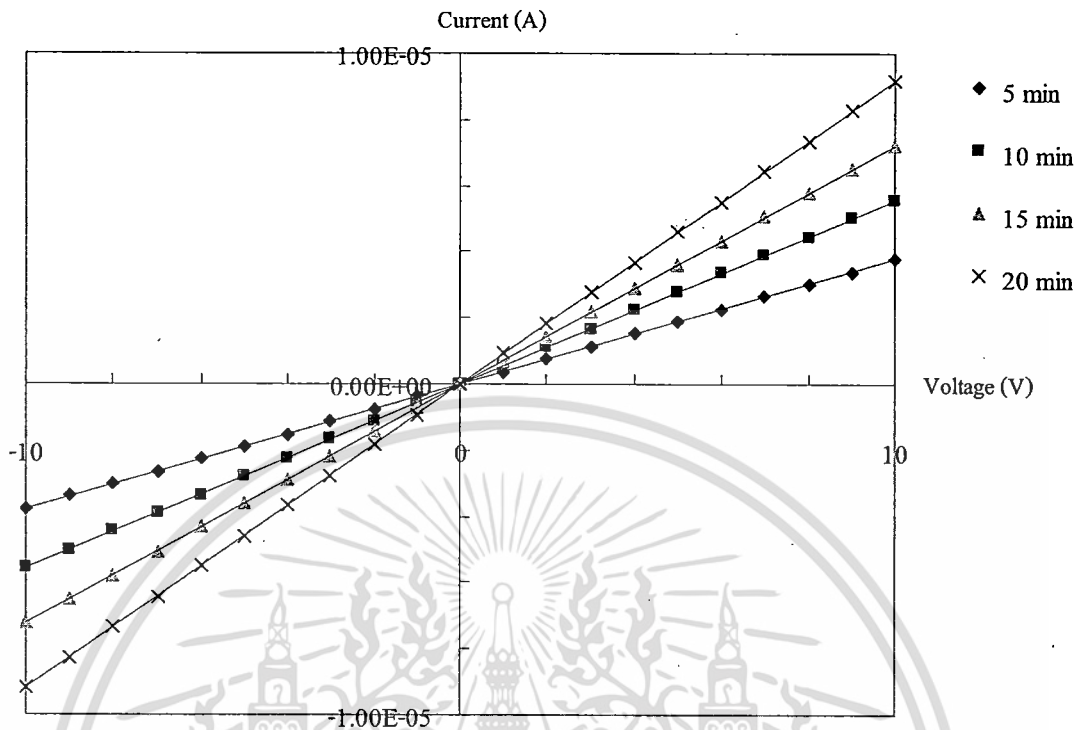
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การเรียงพิมพ์โดยทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธี ไฮโดรเจนเทอมิเนชัน ซึ่งมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์คือ เวลาที่ใช้คือ 5 และ 10 นาที ผลการทดลองที่ได้หลังจากให้ความร้อนแก่เข็ม A ปรากฏว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้เอนไปทางด้านบวก เนื่องจากที่บริเวณเข็มร้อน(เข็ม A) พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้มีประจุโฮลเพิ่มขึ้น และประจุโฮลเหล่านี้จะมีพลังงานสูงกว่าประจุโฮลที่บริเวณอื่นๆ ดังนั้นประจุโฮลเหล่านี้จะแพร่กระจายออกไปรอบๆ และทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุโฮล โดยไหลจากเข็มร้อน ไปยังเข็มที่เย็นกว่าบริเวณเข็มร้อนจึงขาดประจุไฟฟ้าบวก และทำให้มีศักย์เป็นลบ ส่วนด้านเข็มเย็นจะมีศักย์เป็นบวก ดังนั้นกระแสสุทธิจึงไหลออกจากเข็มเย็นผ่านมิเตอร์ไปยังเข็มร้อน แสดงว่ามีประจุเคลื่อนที่จากเข็ม A ไปยังเข็ม B แล้วผ่านกัลวานอมิเตอร์ทางขั้วบวก ทำให้เข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้เบนไปทางบวก ดังนั้นพหุผลหลักในการนำกระแสของชั้นความนำไฟฟ้าที่ทำการวัดนี้คือ โฮล จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าชั้นความนำไฟฟ้าที่สร้างได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

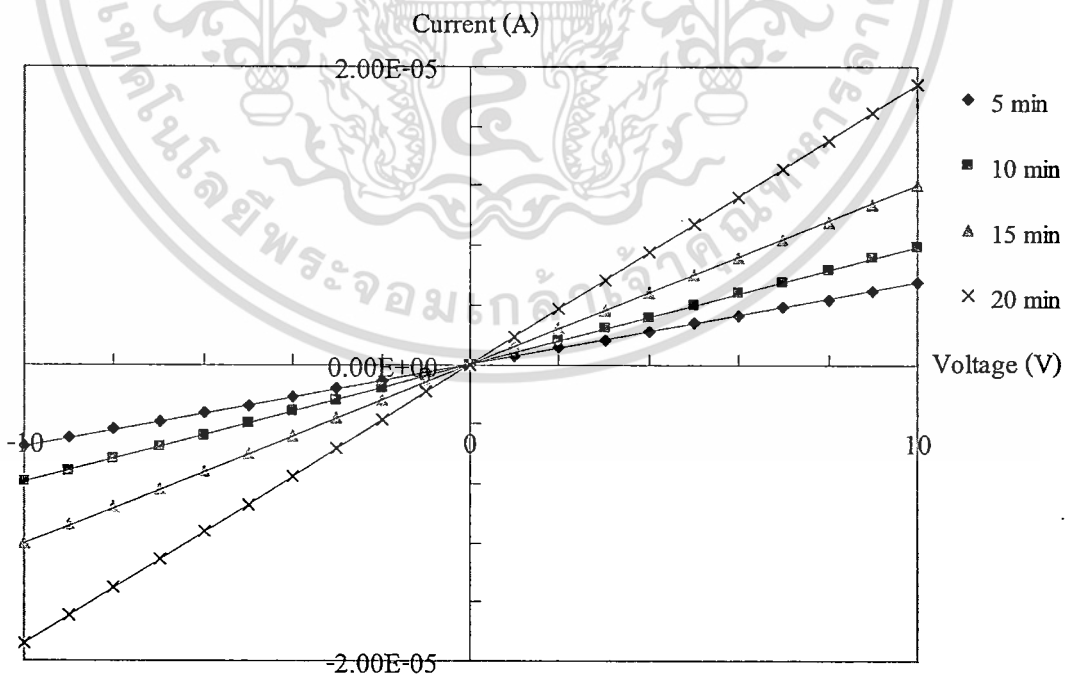
#### 4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

เมื่อนำฟิล์มที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการ ไฮโดรเจนเทอมิเนชันที่เวลา 5 นาที เปรียบเทียบกับที่เวลา 10 นาที จะเห็นว่าเมื่อเวลานานจะทำให้ความต้านทานที่ได้ในการทำกระบวนการ ไฮโดรเจนเทอมิเนชันลดลง ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเข็มร้อนสรุปได้คือชนิดพาหะโฮล

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

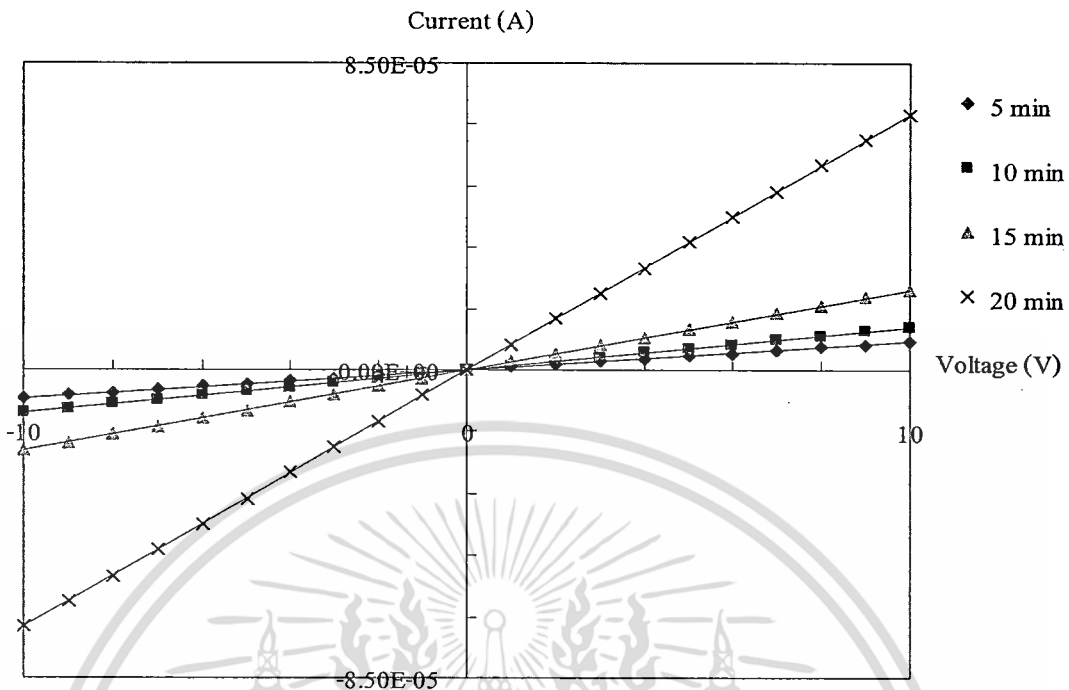


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมิเนทที่อุณหภูมิ 500 °C



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมิเนทที่อุณหภูมิ 600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

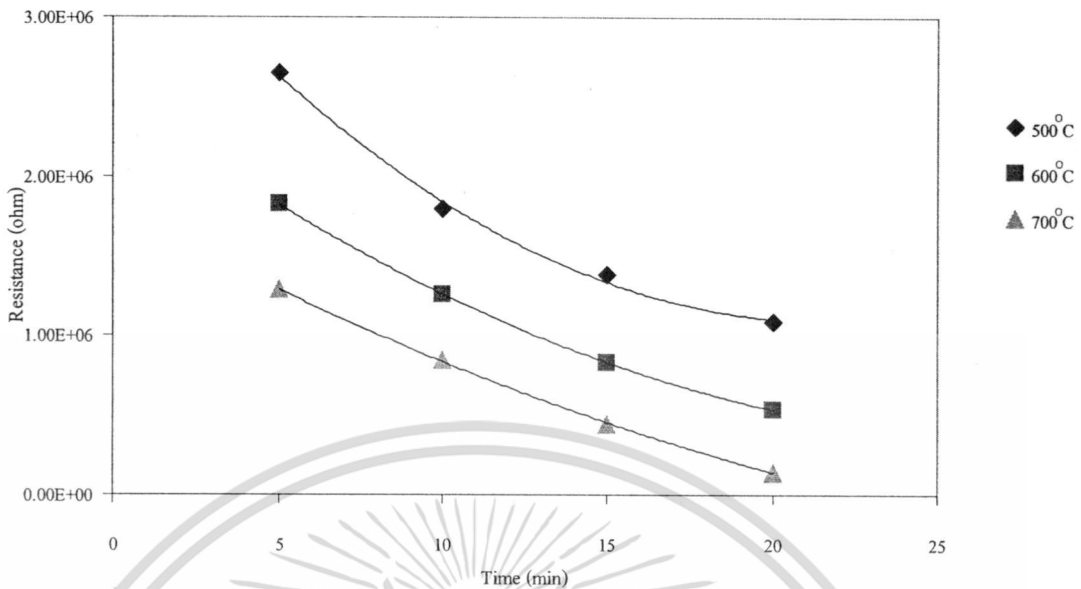


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชั้นความนำไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมีเนทที่อุณหภูมิ 700 °C

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 ( $\Omega$ ) ของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

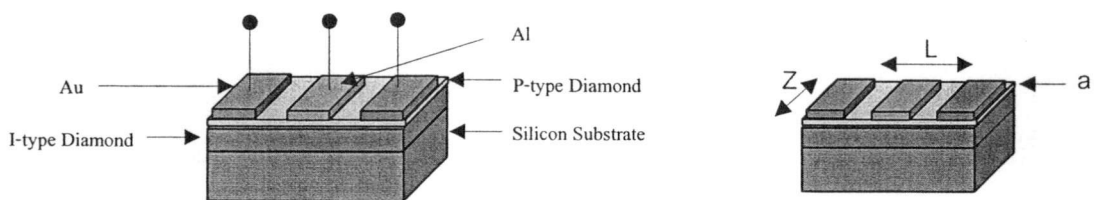
เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)		
	500	600	700
5	$2.65 \times 10^6$	$1.82 \times 10^6$	$1.29 \times 10^6$
10	$1.79 \times 10^6$	$1.26 \times 10^6$	$8.46 \times 10^5$
15	$1.38 \times 10^6$	$8.34 \times 10^5$	$4.46 \times 10^5$
20	$1.09 \times 10^6$	$5.33 \times 10^5$	$1.41 \times 10^5$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจนเทอมีนท

พิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเจนเทอมีนทมากขึ้นแต่ใช้เวลาในการสังเคราะห์เท่ากัน 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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.9 แผนภาพการวัดชิ้นงานตัวอย่างของชั้นความนำเพชร ระโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันพังทลาย  $V_{pt}$  (V) ของชั้นความนำไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ

เวลา(นาทีก)	ค่าแรงดันพังทลาย $V_{pt}$ (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

จากค่าแรงดันพังทลายที่วัดได้ในตารางที่ 4.2 นี้สามารถนำมาคำนวณหาความหนาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.1)-(4.5)

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

โดยที่  $V_{pt}$  คือ แรงดันพังทลาย  
 $a$  คือ ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า  
 $q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน  
 $p$  คือ จำนวนอะตอมสารเจือผู้รับ  
 $\epsilon$  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  
 $\mu_p$  คือ ค่าความคล่องตัว ของประจุโฮล

จากสมการที่(4.2) จะได้ค่า  $p$  ดังสมการที่ (4.3)

$$p = \frac{L}{Rq\mu_p Z a} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่(4.1) จะได้ค่า  $p$  ดังสมการที่ (4.4)

$$p = \frac{V_{pt} 2\epsilon}{q} \frac{1}{a^2} \quad (4.4)$$

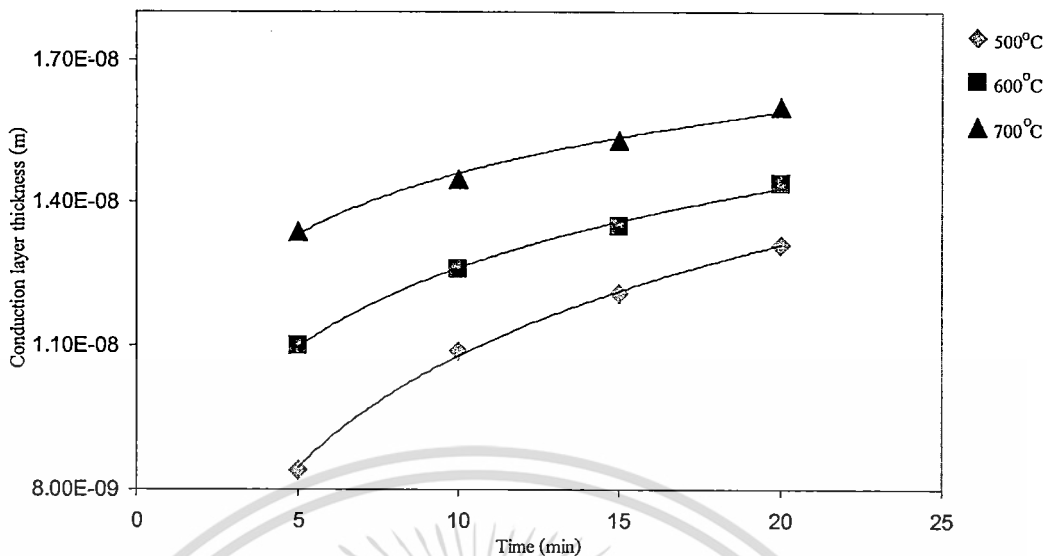
จากสมการที่(4.3) และ (4.4) จะได้ค่าความหนาดังสมการที่ (4.5)

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

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่ได้จากการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

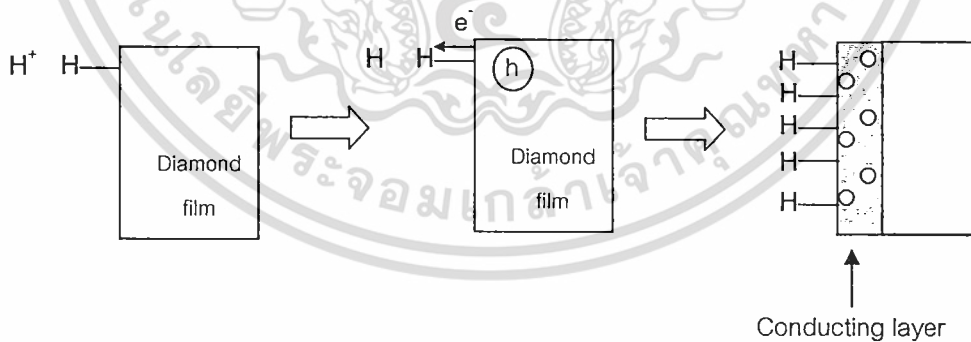
เวลา(นาท)	ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง (nm)		
	500 °C	600 °C	700 °C
5	84	110	134
10	109	126	145
15	121	135	153
20	131	144	160

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



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นความนำไฟฟ้ากับเวลาในการไฮโดรเจนเทอมีนท

จากผลการทดลองที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่ออะตอมของไฮโดรเจนได้รับความร้อน จะเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และไฮโดรเจนไอออนเหล่านี้เมื่อปกคลุมบริเวณผิวหน้าของฟิล์มเพชรจะดึงอิเล็กตรอนจากอะตอมไฮโดรเจนที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มเพชรทำให้อะตอมไฮโดรเจนเหล่านี้มีประจุบวก และอะตอมไฮโดรเจนจะทำการดึงอิเล็กตรอนในพันธะของอะตอมคาร์บอนออกมาทำให้เกิดที่ว่างขึ้นในพันธะของอะตอมคาร์บอนนั้นคือมีโฮลเกิดขึ้น[40] ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แผนภาพกระบวนการเกิดโฮลในฟิล์มเพชร

จากค่าความต้านทานและความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นที่ได้จากผลการทดลองข้างต้น สามารถนำมาคำนวณหาค่าพื้นฐานต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้า ได้แก่ ค่าพิคัดความต้านทาน (Resistivity :  $\rho$ ) ค่าความหนาแน่นประจุโฮล (Hole concentration :  $p$ ) ระดับพลังงานเฟอร์มิเทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์ ( $E_F - E_V$ ) ได้จากสมการที่(4.6)-(4.7) ซึ่งค่าทั้งหมดที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.4-4.5

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

$$p = \frac{1}{q\mu_p\rho} = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \quad (4.7)$$

โดยที่  $N_V$  คือ ความหนาแน่นประจุโฮล

$E_V$  คือ พลังงานของแถบวาเลนซ์

$E_C$  คือ พลังงานของแถบความนำ

ตารางที่ 4.4 ค่าพิคัดความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาการไฮโดรเจนเทอมีเนตต่าง ๆ

เวลา(นาทื)	ค่าพิคัดความต้านทานที่อุณหภูมิ ( $\Omega$ -cm)		
	500 $^{\circ}$ C	600 $^{\circ}$ C	700 $^{\circ}$ 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 ค่าความหนาแน่นประจุโฮลของชั้นความนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิและเวลาการไฮโดรเจนเทอมีเนตต่าง ๆ

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

ในบทนี้เป็นการศึกษาถึงสถานะการนำไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก โดยไม่มีการเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่น ๆ เลยด้วยวิธีไฮโดรเจนเทอมีเนทที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 5 และ 10 นาที และนำผลการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของฟิล์มนำมาเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมีเนท 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

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

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยทั้งหมดการพัฒนาการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยวิธี CACVD และการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชรนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

ผลการวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นการศึกษาถึงการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่กำหนด เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำฟิล์มเพชรไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ต่อไป ฟิล์มเพชรถูกสร้างด้วยระบบ CACVD ฐานรองจะถูกเตรียมพื้นผิวเพื่อกระตุ้นให้เกิดการนิวเคลียชันของเพชร ด้วยการขัดผิวหน้าฐานรองด้วยเทคนิคการอัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5 \mu\text{m}$  ส่วนวัสดุที่นำมาเป็นวัสดุป้องกันเกิดการนิวเคลียชันได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ ลวดลายที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรถูกออกแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบวงจรร่วม คือค่าขนาดความกว้างต่ำที่สุด และระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของลวดลาย จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของลวดลายฟิล์มเพชร ได้ผลดังนี้ คือ ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชรมีค่า  $10 \mu\text{m}$  ขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลายฟิล์มเพชร  $10 \mu\text{m}$  ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการสร้างเป็นไปตามตารางที่ 3.3 ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งเนื่องจากถ้าความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์บางเกินไปจะทำให้เกิดฟิล์มเพชรบริเวณขอบซิลิคอนไดออกไซด์เกิดขึ้นและเกิดฟิล์มเพชรข้ามลวดลาย ซึ่งเมื่อทำการใช้เทคนิคการ Lift off โดยการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้วจะไม่สามารถกำจัดฟิล์มเพชรส่วนที่เกินออกไปได้ เมื่อทำการสังเคราะห์จะมีปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าของซิลิคอนไดออกไซด์เป็นผลให้ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ลดลงประมาณ  $200 \text{ \AA}/\text{min}$  ด้านคุณสมบัติของฟิล์มเพชรเมื่อสังเคราะห์แล้วพบว่าเป็นสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือความต้านทานของฟิล์มเพชรจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม โดยมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า  $200^\circ\text{C}$  และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่  $250^\circ\text{C}$  ขึ้นไป ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น  $2.42 \text{ M}\Omega$  ที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  จากการทดสอบด้วย Seebeck effect พบว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิกคือมีอิเล็กตรอนและโฮลเท่ากัน

เมื่อศึกษาชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกโดยไม่มีการเติมอะตอมสารเจือชนิดอื่นๆ เลย เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเจนเทอมีนท ที่อุณหภูมิ 500, 600 และ  $700^\circ\text{C}$  และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่า มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยความหนาและความหนาแน่นของโฮลของชั้นความนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้นี้ จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยความหนาที่ได้อยู่ในช่วง 84-160 nm ส่วนค่าความหนาแน่น

ของโฮลจะมีค่าอยู่ในช่วง  $5.62 \times 10^{16} - 5.52 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ซึ่งสามารถนำไปวัดด้วยไฮโดรเจนไดอาร์คไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Glass, J. T., Fox, B. A., Dreifus, D. L. and Stoner, B. R. **“Diamond for electronics: future prospects of diamond SAW devices,”** MRS Bulletin, 1998, 23(9), 49–55.
- [2] Swain, G. M., Anderson, A. B. and Angus, J. C. **“Applications of diamond films in electrochemistry,”** MRS Bulletin, 1998, 23(9), 56–60.
- [3] Glass, J. T. et al. , **High quality semiconducting diamond films and devices.** In Advances in New Diamond Science and Technology, Tokyo, 1994.
- [4] Rameshan, R. **“Fabrication of diamond microstructures for microelectromechanical systems (MEMS) by a surface micromachining process,”** Thin Solid Films, 1999, 340, 1–6.
- [5] Spitsyn, B. V., Bouilov, L. L. Derjaguin, B. V. **“Vapor growth of diamond on diamond and other Surfaces,”** Journal of Crystal Growth 1981, 52, 219–226.
- [6]. Angus, J. C., Buck, F. A., Sunkara, M., Groth, T. F., Hayman, C. C. and Gat, R. **“Diamond growth at low pressures,”** MRS Bulletin 1989, 14(10), 38–47.
- [7] Celii, F. G. and Butler, J. E. **“Diamond chemical vapor deposition,”** Annual Review of Physical Chemistry, 1991, 42, 643–684.
- [8] Goodwin, D. G. and Butler, J. E., **Theory of diamond chemical vapor deposition. In: Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films,** New York, 1996.
- [9] McMaster, M. C., Hsu, W. L., Coltrin, M. L. and Dandy, D. S. **“Experimental measurements and numerical simulations of the gas composition in a hot-filament-assisted diamond chemicalvapor- deposition reactor,”** Journal of Applied Physics, 1994, 76, 7567–7577.
- [10] Yu, B. W. and Girshick, S. L. **“Atomic carbon vapor as a diamond growth precursor in thermal plasmas,”** Journal of Applied Physics, 1994, 75, 3914–3923.
- [11] Raiche, G. A. and JeKries, J. B. **“Observation and spatial distribution of C3 in a dc arc jet plasma during diamond deposition using laser-induced,”** Cuorescence. SRI International, MP 96-020a, 1996.

- [12] Raiche, G. A., Smith, G. P. and JeKries, J. B. **“Diagnostics of a diamond-depositing DC-arc-jet plasma. in: New Diamond Science and Technology II,”** Materials Research Society, Warrendale, PA, 1991, pp. 251–256.
- [13] Gruen, D. M., Liu, S., Krauss, A. R. and Pan, X. **“Buckyball microwave plasmas: fragmentation and diamond-film growth,”** Journal of Applied Physics, 1994, 75, 1758–1763.
- [14] Gruen, D. M., Zuiker, C. D., Krauss, A. R. and Pan, X. Z. **“Carbon dimer, C<sub>2</sub>, as a growth species for diamond films from methane=hydrogen=argon Deposition by Vapor Transport 141 microwave plasmas,”** Journal of Vacuum Science and Technology A, 1995, 13, 1628–1632.
- [15] Wei, J., Kawarada, H., Suzuki, J. and Hiraki, A. **“Growth of diamond films at low pressure using magneto-microwave plasma CVD,”** Journal of Crystal Growth, 1990, 99, 1201–1205.
- [16] Hirose, Y. et al. **“The synthesis of high-quality diamond in combustion flames,”** J. Appl. Phys., 1990, (12) : 6401-6405.
- [17] Komaki, K. et al. **“Synthesis of Diamond in Combustion Flame under Low Pressures.”** Jpn.J.Appl.Phys., 1993, (32) : 1814-1817.
- [18] Matsui, Y. et al. **“Flame Structure and Diamond Growth Mechanism of Acetylene Torch.”** Jpn. J. Appl. Phys., 1989, 28(9) : 1718-1724.
- [19] Matsui, Y. et al. **“The Growth Mechanism of Diamond Crystals in acetylene Flames,”** J. Appl. Phys., 1990, 29(8) : 1552-1560.
- [20] Hoff, H. A. et al. **“Columnar growth in combustion deposited diamond thin films.”** Appl. Phys. Lett., 1991, 59(14) : 1693-1695.
- [21] Hirabayashi, K. and Hirose, Y. **“Synthesis and growth mechanism of flattened crystals by chemical vapor deposition,”** Diamond and Related Materials, 1996, (4) : 48-52.
- [22] Hirabayashi, K. and Hirose, Y. **“Growth mechanism of flattened crystals synthesized by chemical vapor deposition.”** Journal of Crystal Growth, 1994, (142) : 140-146.
- [23] Hirabayashi, K. et al. **“Surface structures of high-quality diamond crystals synthesized by the oxy-acetylene flame method.”** Appl. Phys. Lett., 1992, 60(5) : 574-576.

- [24] Graham, R. J. and Ravi, K. V. "Cathodoluminescence investigation of impurities and defects in single crystal diamond grown by the combustion-flame method," *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 60(11) : 1310-1312.
- [25] Wilks, E. and Wilks, J., **Properties and Applications of Diamond**. Cambridge : British Library Cataloguing in Publication Data, 1994.
- [26] Davis, R. F., **Diamond films and coatings : Development, Properties, and Applications**. USA : Noyes Publication, 1992.
- [27] Kania, D. R., **Diamond Electronic Properties and Applications**. London : Kluwer Academic publishers, 1995.
- [28] Singh, J. "Nucleation and growth mechanism of diamond during hot-filament chemical vapor deposition," *Journal of Materials Science*, 1994, 29, 2761-2766.
- [29] Y. Wongprasert and W. Titiroongruang "Selective-Area Deposition of Diamond Films by Combustion Activation CVD," *Proceedings of the 7th international conference on properties and applications of dielectric materials*, 786-789
- [30] Cassidy, W. D., Morrison Jr. P. W. and Angus, J. C. "Growth rates and quality of diamond growth by hot-filament assisted chemical vapor deposition," *Proceedings of the Fourth International Symposium on Diamond Materials*. Electrochemical Society, 1995.
- [31] Liu, H. and Dandy, D. S. "Studies on nucleation process in diamond CVD: an overview of recent development," *Diamond and Related Materials* 1995, 4, 1173-1188.
- [32] Singh, J. "Nucleation and growth mechanism of diamond during hot-filament chemical vapor deposition," *Journal of Materials Science*, 1994, 29, 2761-2766.
- [33]. Gruen, D. M. "Nucleation, growth, and microstructure of nanocrystalline diamond films," *MRS Bulletin*, 1998, 23(9), 32-35.
- [34] Zhuo, S., Zheng, Z. and Xu, N. "In Cuence of pretreatments and deposition parameters on diamond nucleation density in diamond film deposition by hot filament CVD," *Proceedings of SPIE 2364, Second International Conference on Thin Film Physics and Applications*, 1994, pp. 582-587.
- [35] Zhang, R. Q., Wang, W. L., Estevea, J. and Bertran, E. "Molecular mechanics simulation of the diamond nucleation and growth on silicon (0 0 1) and (1 1 1) surfaces," *Thin Solid Films*, 1998, 317, 6-9.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] Borges, C. F. M., Schelz, S., Martinu, L. and Moisan, M. “**Efect of silicon substrate orientation on the nucleation and adhesion of CVD diamond films,**” Proceedings of the International Symposium on Diamond Materials. The Electrochemical Society, 1995, pp. 136–141.
- [37] Sakamoto, Y., Takaya, M., Sugimura, H., Takai O. and Nakagiri, N. “**Site-selective diamond growth using a platinum film and a silicon oxide mask,**” Applied Physics Letters, 1998, 73, 1913–1915.
- [38] Regel, L. L. and Wilcox, W. R. “**Selective patterned deposition of diamond using a new technique,**” Journal of Materials Research Letters 1999, 18, 427–430.
- [39] Y. Wongprasert and W. Titiroongruang “**Selective-Area Deposition of Diamond Films by Combustion Activation CVD**”, 2nd International conference on materials processing for properties and performance (MP3) ,Japan, pp.482-485, October 2003.
- [40] S.Ri, T. Mizumasa, Y. Akiba, Y. Hirose, T. Kurosu and M. Ikda “**Formation Mechanism of p-Type Surface Conductive Layer,**” J. Appl. Phys., 1995, 34 : 5550-5555.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 คุณสมบัติของผลึกและฟิล์มเพชรจากกระบวนการ CVD

	CVD diamond	Single-crystal diamond
Density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	3.515	2.8–3.51 [1]
Thermal capacity at 27 °C ( $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	6.12	6.195
Standard entropy at 27 °C ( $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	2.4	28
Standard enthalpy of formation at 27 °C ( $\text{J mol}^{-1}$ )	1.8	84
Effective Debye temperature at 0 – 827 °C, (K)	1860 ± 10	
Thermal conductivity at 25 °C * ( $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	2100****	2200
Thermal expansion coefficient at 25–200°C**(10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> )	~2.0 [2, 3]	0.8–1.2 [2, 3]
Band gap (eV)	5.45	5.45
Electrical resistivity ( $\Omega\text{-cm}$ )	1012–1016	1016
Dielectric constant at 45 MHz – 20 GHz	5.6	5.7
Dielectric strength ( $\text{V cm}^{-1}$ )	106	106
Loss tangent at 45 MHz – 20 GHz	< 0.0001	
Saturated electron velocity ( $10^7 \text{ cm s}^{-1}$ )	2.7	2.7
Carrier mobility ( $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )		
electron (n)	1350–1500	480
positive hole (p)	2200	1600
Young's modulus * (GPa) at 0–800 °C [4]	820–900***	910–1250
Compression strength (GPa)	8.68–16.53	
Poisson's ratio	0.10–0.16	
Coefficient of friction in air	0.035–0.3 [5]	0.05–0.15
Vickers hardness * (GPa) [varies with crystal orientation]	50–100	57–104
Index of refraction at 10 $\mu\text{m}$	2.34–2.42	2.40

\* higher than any other known materials

\*\* lower than Invar

\*\*\* Young's modulus=895 GPa), where T in °C[6].

\*\*\*\* Anisotropic characteristic of thermal conductivity of a thick CVD diamond film

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivity

Material	Conductivity (Watt/cm $\cdot$ $^{\circ}$ 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity

Material	Capacity (J/mol $\cdot^{\circ}$ 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	

ตารางที่ ข-5 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

ตารางที่ ข-6 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 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

ตารางที่ ข-8 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 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

ตารางที่ ข-10 แสดงการเปรียบเทียบค่า Density

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-11 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