

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

การศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD

The study on process of electronic device from diamond films by CVD



RCH

TK

7871.15

.D53

ข 842 ก

เลขหมู่..... 105787

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี..... - 2 S.ค. 2552

b. 101606244  
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2551

โยธิน วงศ์ประเสริฐ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรด้วยวิธีCVD

The study on process of electronic device from diamond films by CVD

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2551 จำนวนเงิน 495,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2550 ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2551

หน่วยงานและผู้ดำเนินการวิจัย

นายโยธิน วงศ์ประเสริฐ

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 02326-0643

## บทคัดย่อ

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

This research 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

studied by Scanning Electron Microscope and Raman spectroscopy. The electrical properties of diamond film were studied.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และทั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญเรื่อง

|                                                                | หน้า |
|----------------------------------------------------------------|------|
| กิตติกรรมประกาศ.....                                           | I    |
| บทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ.....                              | II   |
| สารบัญเรื่อง.....                                              | IV   |
| สารบัญตาราง.....                                               | VI   |
| สารบัญรูป.....                                                 | VII  |
| สัญลักษณ์และคำย่อ.....                                         | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                              | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....                                    | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                               | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย.....                                        | 2    |
| บทที่ 2 ทฤษฎี.....                                             | 5    |
| 2.1 บทนำ.....                                                  | 5    |
| 2.2 คุณสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำเพชร.....                     | 5    |
| 2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอน.....               | 6    |
| 2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....                                   | 8    |
| 2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึกเพชร.....                      | 9    |
| 2.3.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)..... | 10   |
| 2.3.2 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscope.....                 | 10   |
| 2.3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....    | 13   |
| 2.3.4 การวิเคราะห์ด้วย Seebeck effect.....                     | 15   |
| 2.4 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....             | 16   |
| 2.5 สรุป.....                                                  | 19   |
| บทที่ 3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรอง.....                    | 20   |
| 3.1 บทนำ.....                                                  | 20   |
| 3.2 กระบวนการเตรียมฐานรอง.....                                 | 20   |
| 3.2.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิกอน.....         | 20   |
| 3.2.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร.....         | 21   |

## สารบัญเรื่อง(ต่อ)

|                                                                 | หน้า      |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3 การเตรียมชิ้นงาน.....                                       | 22        |
| 3.4 การทดลอง.....                                               | 24        |
| 3.5 สรุป.....                                                   | 37        |
| <b>บทที่ 4 การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....</b>               | <b>38</b> |
| 4.1 บทนำ.....                                                   | 38        |
| 4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....                      | 38        |
| 4.3 คุณสมบัติในอุณหภูมิสูง.....                                 | 40        |
| 4.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....                                      | 41        |
| 4.4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอตัดก็.....       | 42        |
| 4.4.2 ผลการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม.....                          | 43        |
| 4.4.3 ผลการศึกษาการตอบสนองความถี่ของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์..... | 46        |
| 4.4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....               | 47        |
| 4.5 สรุป.....                                                   | 48        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>                 | <b>50</b> |
| บรรณานุกรม.....                                                 | 52        |
| ภาคผนวก.....                                                    | 57        |
| ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....               | 58        |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                        | หน้า |
|----------|------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1      | ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน..... | 13   |
| 2.2      | ค่า Inter-planar spacing มาตรฐานของเพชรธรรมชาติ (ASTM6-675).....       | 15   |
| 2.3      | ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Seebeck effect.....                           | 15   |
| 3.1      | สรุปเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....                                | 24   |
| 3.2      | ความหนาแน่นการนิวเคลียชันของผิวหน้าด้วยวิธีต่างๆ.....                  | 25   |
| 3.3      | เงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD.....                               | 37   |



## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                              | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 แผนภาพระบบ Hot filament CVD method.....                                         | 3    |
| 1.2 แผนภาพระบบ Combustion Activation CVD.....                                       | 4    |
| 2.1 แบบจำลองโครงสร้างเพชร.....                                                      | 7    |
| 2.2 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะโควาเลนต์ $sp^3$ ของเพชร.....                        | 7    |
| 2.3 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะโควาเลนต์แบบ $sp^2$ ของแกรไฟต์.....                  | 8    |
| 2.4 แผนภาพการทำงานของ SEM.....                                                      | 10   |
| 2.5 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น.....                 | 12   |
| 2.6 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก.....                             | 14   |
| 2.7 ลักษณะไดโอดโครงสร้าง MIS.....                                                   | 18   |
| 2.8 แผนภาพการวัดชิ้นงานตัวอย่างของชั้นความนำเพชร.....                               | 19   |
| 3.1 ครีမ်เพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิคอนขนาดเม็ดผลึก 0.25 ไมครอน.....        | 21   |
| 3.2 ภาพถ่ายพื้นผิวของฐานรองซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการเตรียมฐานรอง.....                 | 22   |
| 3.3 กระบวนการเตรียมฐานรอง.....                                                      | 23   |
| 3.4 ภาพถ่ายตัวอย่างลวดลายที่ใช้ในการทดลอง.....                                      | 26   |
| 3.5 ภาพถ่ายฐานรองที่เตรียมสำหรับการสังเคราะห์เฉพาะที่.....                          | 27   |
| 3.6 ภาพถ่ายผลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่ใช้เวลาสังเคราะห์ 5 นาที.....            | 28   |
| 3.7 ภาพถ่ายผลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่ใช้เวลาสังเคราะห์ 10 นาที.....           | 29   |
| 3.8 ภาพถ่ายผลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่ใช้เวลาสังเคราะห์ 15 นาที.....           | 30   |
| 3.9 ภาพถ่ายผลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่ใช้เวลาสังเคราะห์ 20 นาที.....           | 31   |
| 3.10 ภาพถ่ายระยะห่างระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร.....                                  | 32   |
| 3.11 ภาพถ่ายระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร.....                        | 32   |
| 3.12 ภาพถ่ายมุมของลวดลายฟิล์มเพชร.....                                              | 33   |
| 3.13 ภาพถ่ายลวดลายอักษรของลวดลายฟิล์มเพชร.....                                      | 32   |
| 3.14 ภาพถ่ายขนาดความกว้างต่ำสุดของฟิล์มเพชร.....                                    | 32   |
| 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม ซิลิคอน ไดออกไซด์และเวลาสังเคราะห์..... | 34   |
| 3.16 ภาพถ่ายตัวอย่างของลวดลายฟิล์มเพชรสร้างในอุณหภูมิสูงเกินไป.....                 | 35   |
| 3.17 ภาพถ่ายแสดงข้อผิดพลาดของลวดลายฟิล์มเพชรเนื่องจากกระจกต้นแบบ.....               | 35   |
| 3.18 ภาพถ่ายความผิดพลาดของลวดลายฟิล์มเพชรจากกระบวนการเตรียมพื้นผิวฐานรอง....        | 36   |
| 3.19 ภาพถ่ายความผิดพลาดจากการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์.....                          | 36   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ |                                                                                       | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.20   | ภาพถ่ายลวดลายฟิล์มเพชรที่เกิดจากการฉลิกอนไดออกไซด์บางเกินไป.....                      | 36   |
| 4.1    | ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์.....                            | 39   |
| 4.2    | ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่สังเคราะห์ได้.....                            | 39   |
| 4.3    | ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์.....                        | 42   |
| 4.4    | คุณลักษณะกระแส-แรงดันของขั้วเกต-ซอส.....                                              | 42   |
| 4.5    | คุณลักษณะกระแส-แรงดันของขั้วเกต-ครน.....                                              | 43   |
| 4.6    | ค่าแรงดันขีดเริ่มของชั้นความนำไฟฟ้า หนา 76 nm.....                                    | 44   |
| 4.7    | ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ $V_{GS}$ ของ ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm.....    | 45   |
| 4.8    | ความสัมพันธ์ระหว่าง $\sqrt{I_{DS}}$ กับ $V_{GS}$ ชั้นความนำไฟฟ้าที่ความหนา 92 nm..... | 45   |
| 4.9    | ผลการทดสอบการตอบสนองความถี่.....                                                      | 46   |
| 4.10   | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่.....                                      | 47   |
| 4.11   | ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่ากระแส $I_{DS}$ ของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....                 | 48   |

## สัญลักษณ์และคำย่อ

| สัญลักษณ์                   | ความหมาย                                       | หน่วย                             |
|-----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|
| a-C                         | คาร์บอนอสัณฐาน                                 | -                                 |
| a-Si                        | ซิลิคอนอสัณฐาน                                 | -                                 |
| C <sub>d</sub>              | อะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าของเพชร               | -                                 |
| C <sub>d</sub> <sup>*</sup> | อะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น         | -                                 |
| d                           | ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม                    | Å                                 |
| DLC                         | Diamond-Like Carbon                            | -                                 |
| h                           | ค่าคงที่ของพลังค์                              | J•s                               |
| N <sub>d</sub>              | ความหนาแน่นของการนิวเคลียเอชันที่บริเวณพื้นผิว | cm <sup>-2</sup>                  |
| N <sub>r</sub>              | อัตราการนิวเคลียเอชันที่บริเวณพื้นผิว          | cm <sup>-2</sup> •h <sup>-1</sup> |
| P                           | ความดัน                                        | Pa                                |
| ppm                         | ความเข้มข้น                                    | ต่อล้านส่วน                       |
| sccm                        | ปริมาณการไหลของก๊าซ                            | cm <sup>3</sup>                   |
| t                           | อุณหภูมิ                                       | °C                                |
| T                           | อุณหภูมิสัมบูรณ์                               | K                                 |
| V                           | แรงดันไฟฟ้า                                    | Volt                              |
| W                           | กำลัง                                          | Watt                              |
| λ                           | ความยาวคลื่น                                   | Å                                 |
| θ                           | มุม                                            | Degree                            |
| ε                           | ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก                           | F/cm                              |
| μ                           | ค่าความคล่องตัว                                | cm <sup>2</sup> /V•s              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของปัญหาซึ่งเป็นเหตุผลในการทำวิจัยและได้กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัยและส่วนประกอบงานวิจัยไว้ดังนี้

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้งานมากที่สุดได้แก่ซิลิคอน ในขณะที่เดียวกันมีการศึกษาวิจัยเพื่อค้นหาวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ๆอีกด้วย วัสดุคาร์บอนจัดเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว(element semiconductor)เช่นเดียวกับซิลิคอนแต่ยังไม่มีการนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไวงาน(active device)เช่นซิลิคอน ทั้งนี้เนื่องจากปกติโดยทั่วไปคาร์บอนมักจะอยู่ในรูปของออสลิก หรืออาจอยู่ในรูปของกราฟิตซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี นอกจากนี้ยังอาจอยู่ในรูปของผลึกที่เรียกว่าเพชร(diamond) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดช่องว่างพลังงานกว้าง(Large band gap semiconductor) และเหมาะที่จะนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติพิเศษต่างจากซิลิคอนได้ ปกติเพชรมักเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยอาศัยสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ความดันสูง ดังนั้นเพชรธรรมชาติจึงเกิดขึ้นที่ชั้นใต้ดินซึ่งลึกมากและใช้เวลานาน ทำให้เป็นวัสดุที่หายากประกอบกับเพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายอย่างที่เด่นเป็นพิเศษเหนือกว่าวัสดุอื่นๆ เช่นแข็งแรงที่สุด ทนต่อการกัดกร่อนมากที่สุด ทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถนำความร้อนได้ดีและมีคุณสมบัติเป็นวัสดุโปร่งแสง โดยเฉพาะเมื่อนำไปเจียรนัยจะเป็นเครื่องประดับที่มีความงดงามมากที่สุด ดังนั้นเพชรธรรมชาติจึงมีราคาแพงเหมาะที่จะเป็นเครื่องประดับมากกว่า อย่างไรก็ตามได้มีการมีความพยายามของนักวิจัยจำนวนมาก ที่จะสังเคราะห์เพชรขึ้นมาเพื่อนำไปใช้งานในด้านต่างๆ รวมทั้งการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ประมาณกลางปี ค.ศ. 1950 ก็มีรายงานถึงความสำเร็จในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการต่างๆเช่น กระบวนการ High Pressure High Temperature หรือ HPHT และกระบวนการ Chemical Vapor Deposition หรือ CVD [1-4] แต่ในระยะแรกๆการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรมีข้อจำกัด และสามารถสังเคราะห์ขึ้นบนวัสดุฐานรองที่เป็นเพชรเท่านั้น กระทั่งต่อมาราวปี ค.ศ. 1970 จึงประสบความสำเร็จสามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นบนแผ่นฐานรองที่ไม่ใช่วัสดุเพชรได้ ซึ่งความสำเร็จนี้นับเป็นก้าวสำคัญเพราะเป็นการเปิดประตูกว้างสู่ตลาดเทคโนโลยีของเพชรอย่างแท้จริง ฟิล์มเพชรถูกนำไปประยุกต์ใช้ด้านต่างๆอย่างกว้างขวางและจริงจังมากยิ่งขึ้น สำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์

ในการศึกษาคาร์บอนในโครงสร้างเพชรนั้นเริ่มต้นจากการใช้เพชรจากธรรมชาติเป็นวัสดุจึงทำให้ มีราคาแพงไม่คุ้มค่าในการนำไปใช้ได้จริง โดยต่อมาได้มีนักวิจัยได้ทำการสังเคราะห์เพชรขึ้น โดยศึกษาจากการเกิดตามธรรมชาติจะพบว่าเพชรเกิดจากคาร์บอนในที่มีอุณหภูมิและความดันสูง จึงได้ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีการใช้คาร์บอนในรูปของแกรไฟต์อัดที่แรงดันประมาณ 1 ล้านปอนด์ต่อตารางนิ้วและให้ความร้อนประมาณ  $1800^{\circ}\text{C}$  (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] และในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธี CACVD ในการสังเคราะห์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในงานวิจัยสรุปได้ดังนี้

- ศึกษาปรากฏการณ์การเกิดนิวคลีเอชันของเพชรด้วยวิธี CACVD บนฐานรองที่มีการเตรียมเพื่อการป้องกันและกระตุ้นการเกิดนิวคลีเอชัน
- ศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่และหาข้อจำกัดของการเกิดฟิล์มเพชรเฉพาะที่
- ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชร

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาวิจัยและการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CACVD และการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้นด้วยการกำหนดพื้นที่การสร้างฟิล์ม การเติมสารเจือ การเทอร์มินเทฟิล์มเพชรที่ได้ ซึ่งรวมถึงการทดลองและศึกษาเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร อัตราการเกิด ลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยใช้การวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อุปกรณ์ Energy Dispersive X-ray spectrometer และ Raman Spectroscopy ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทดลองและศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่จะมผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงหรือใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง โดยมีปริมาณสมบัติต่างๆของฟิล์มหลายค่า เช่นความเข้มข้นของอะตอมโบรอนใน

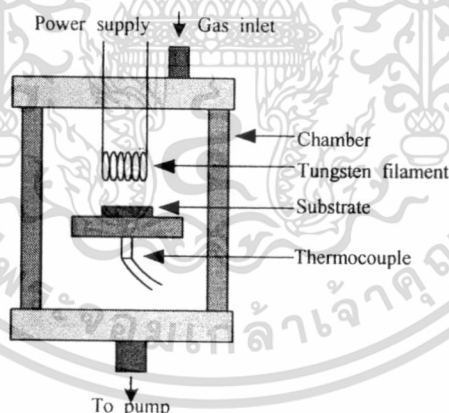
ฟิล์มเพชร ความหนาของฟิล์มเพชร, ความหนาของชั้นอินทรีนซิค-ซิลิคอน และลักษณะของขั้วสัมผัสโลหะ เพื่อให้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CACVD และ HFCVD นี้ ต้องมีการพัฒนาการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อจะสามารถสร้างลวดลายฟิล์มเพชรให้อยู่ในพื้นที่ที่กำหนด ซึ่งการสร้างลวดลายได้ตามต้นแบบเป็นการพัฒนาวัสดุสารกึ่งตัวนำให้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำซิลิคอนมาตรฐานและประยุกต์ใช้งานร่วมกันได้ วิธี CACVD และ HFCVD มีพื้นฐานของเครื่องมือและหลักการดังนี้

### 1. Hot Filament CVD (HFCVD)

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

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



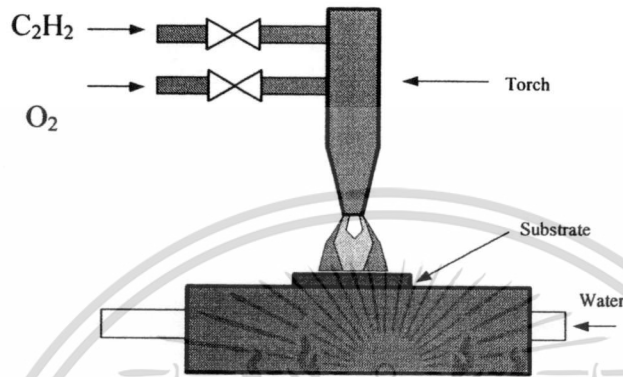
รูปที่ 1.1 แผนภาพระบบ Hot filament CVD method

### 2 Combustion Activation CVD (CACVD)

วิธีการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย หัวเชื่อม แหล่งจ่ายก๊าซออกซิเจนและไฮโดรคาร์บอนเป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือ ทำการเผาก๊าซออกซิเจนกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรคาร์บอนในอัตราส่วน ประมาณ 0.70-0.95 จะปรากฏเปลวไฟเป็นสามเปลว ทำการปรับให้เปลวไฟชั้นกลางสัมผัสกับฐานรองซิลิกอน ควบคุมอุณหภูมิของฐานรองในช่วง  $800-1,000^{\circ}\text{C}$  อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้จะตกลงบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มเพชร ฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นมีคุณภาพที่ดี อัตราการเกิดของฟิล์มเพชรสูงสุดประมาณ  $100\ \mu\text{m/h}$  และอัตราเฉลี่ย  $30-50\ \mu\text{m/h}$



รูปที่ 1.2 แผนภาพระบบ Combustion Activation CVD

การประยุกต์ใช้งานของฟิล์มเพชรนั้นได้มีการนำไปใช้จากเทคนิค CVD นั้นได้นำไปใช้งาน ได้จริง ซึ่งการใช้นั้นจะต้องศึกษาคุณสมบัติของเพชรจากวิธีต่างๆว่าวิธีใดสามารถให้คุณสมบัติของฟิล์มได้เหมาะสมที่สุดกับงานที่จะนำไปใช้ ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งานมีดังนี้

1. อุปกรณ์ระบายความร้อน
2. เครื่องมือตัด
3. อุปกรณ์ Surface Acoustic Wave (SAW)
4. อุปกรณ์ตรวจวัดกัมมันตรังสี
5. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 บทนำ

สารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้งานในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของผลึก โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทธาตุเดี่ยว(Element semiconductor) และประเภทสารประกอบ(Compound Semiconductor)

- สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวหมายถึง สารกึ่งตัวนำที่เกิดจากธาตุเดี่ยว และเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ 4 ของตารางธาตุ เช่น ซิลิคอน, และเยอรมันเนียม, เป็นต้น สารกึ่งตัวนำประเภทนี้ถูกนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานทั่วไป

- สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบหมายถึง สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพเป็นสารประกอบ โดยเกิดจากธาตุ 2 ธาตุรวมกันเป็นสารประกอบ ได้แก่ สารประกอบของธาตุในกลุ่มที่ 3 และ กลุ่มที่ 5 หรือสารประกอบของธาตุในกลุ่มที่ 2 และ ธาตุในกลุ่มที่ 6 เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์, แกลเลียมฟอสไฟด์ เป็นต้น สารกึ่งตัวนำประเภทนี้มักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดพิเศษ เช่น อุปกรณ์ชนิดความถี่สูง หรือเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

นอกจากนี้สารกึ่งตัวนำทั้งสองประเภทนี้แล้ว ยังมีสารกึ่งตัวนำแบบธาตุเดี่ยวอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเด่น และน่าสนใจ คือ คาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุอยู่ในหมู่ที่ 4 คาบที่ 2 ของตารางธาตุ และมีลักษณะโครงสร้างอะตอมได้หลายแบบ เช่น กราไฟต์ และเพชร เป็นต้น สำหรับเพชรถือเป็นผลึกที่สมบูรณ์ของคาร์บอนซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ และมีคุณสมบัติ ที่พิเศษหลายอย่าง เช่น มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง, มีความหนาแน่นสูง, มีความทนทานต่อสารเคมี, ทนต่อการกัดกร่อน, เป็นตัวนำความร้อนที่ดี, มีค่า Dielectric constant ต่ำ, มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

#### 2.2 คุณสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำเพชร

การศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชรนั้น ได้มีการจำแนกประเภทเพชรที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยพิจารณาชนิดและปริมาณของสารเจือปนที่พบในเพชรนั้นๆเป็นเกณฑ์กำหนดซึ่งสามารถถูกแบ่งได้เป็น 4 ประเภทคือ

1. เพชรชนิด  $I_u$  พบมากที่สุด ในธรรมชาติ มีความเข้มข้นของสารเจือในโตรเจนเป็นจำนวนมาก (ตั้งแต่ 0.3 % โดยอะตอม) โดยในโตรเจนอยู่ร่วมกันซึ่งเป็นลักษณะที่พบในเพชรธรรมชาติ

2. เพชรชนิด  $I_u$  พบได้น้อยมากในธรรมชาติประมาณ 0.1 % ส่วนมากพบในเพชรที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น มีความเข้มข้นของสารเจือในโตรเจนน้อยมากประมาณ 0.0005 % โดยอะตอม และในโตรเจนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

3. เพชรชนิด  $II_u$  พบได้น้อยมากในธรรมชาติ มีความเข้มข้นของสารเจือในโตรเจนอยู่จำนวนน้อยมากทำให้การตรวจสอบด้วยการวัดการดูดกลืน IR หรือ UV ทำได้ยาก และไม่มีโบรอนเจือปน ทำให้มีความเป็นฉนวนสูง

4. เพชรชนิด  $II_u$  เพชรชนิดนี้พบได้ยากที่สุดในธรรมชาติ มีความเข้มข้นของสารเจือในโตรเจนน้อยที่สุด (น้อยกว่าชนิด  $II_u$ ) และมีจำนวนโบรอนเจือปนมากกว่าในโตรเจน ดังนั้นเพชรชนิด  $II_u$  นี้จึงมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ

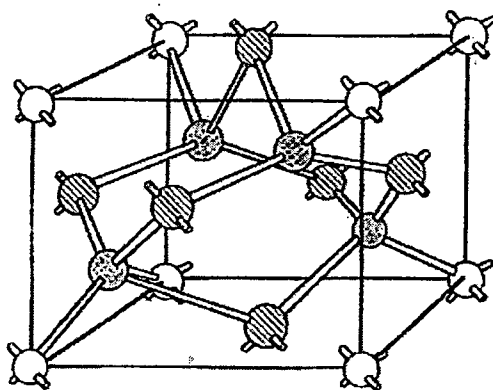
นอกจากนี้เพชรยังมีคุณสมบัติอีกหลายประการที่น่าสนใจ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอน และคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิสูง ซึ่งคุณสมบัติแต่ละชนิดจะแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

### 2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอน

การเกิดพันธะของคาร์บอนเป็นการเกิดจากพันธะโควาเลนต์ซึ่งแตกต่างกันที่ชนิดของพันธะ ( $sp^2$  หรือ  $sp^3$ ) ก็จะมีโครงสร้างต่างกันคือ

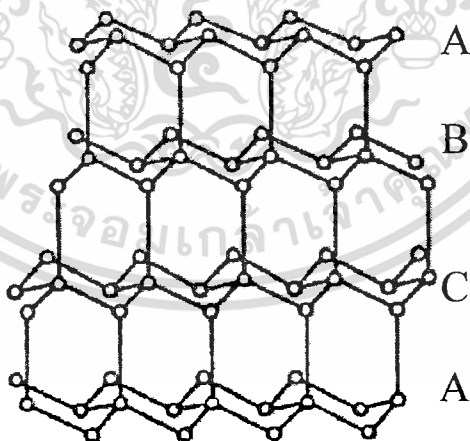
#### 1. โครงสร้างเพชร

โครงสร้างนี้เกิดขึ้นจากอะตอมคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ  $sp^3$  เรียกว่า โครงสร้างเพชร โดยมียูนิเซลล์ดังรูปที่ 2.1 ในหนึ่งยูนิเซลล์จะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนจำนวน 18 อะตอม คือที่ตำแหน่งที่มุมของยูนิเซลล์ 8 อะตอม ซึ่งจะแบ่งกับยูนิเซลล์ข้างเคียงทั้งหมด 8 ยูนิเซลล์ อะตอมที่บริเวณ Face center จำนวน 6 อะตอม ซึ่งแบ่งกับยูนิเซลล์ข้างเคียง 2 ยูนิเซลล์ และอะตอมภายในยูนิเซลล์ที่ตำแหน่งหนึ่งส่วนสี่จากมุมของยูนิเซลล์ เมื่อรวมอะตอมต่อหนึ่งยูนิเซลล์ที่เซลล์จะมี 8 อะตอมต่อยูนิเซลล์



รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างเพชร

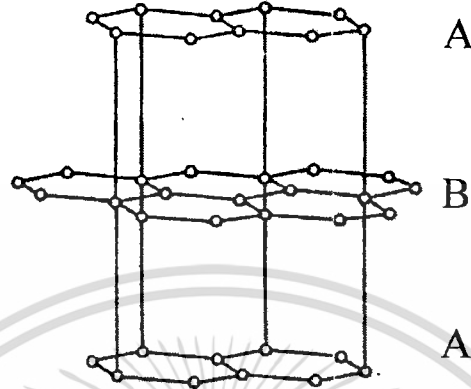
เมื่อพิจารณาถึงพันธะที่อะตอมคาร์บอนนั้นมีการยึดเหนี่ยวกับอะตอมข้างเคียงแบบ Tetrahedral โดยที่จะยึดเหนี่ยวกับอะตอมรอบข้างด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ  $sp^3$  เมื่อพิจารณาในระนาบ  $\{111\}$  พบว่าการยึดเหนี่ยวพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนเป็นแบบวงแหวนหกเหลี่ยมมีการสลับขึ้นลงโดยมีอะตอมที่ตำแหน่งหนึ่งส่วนสี่ เป็นระนาบ  $\{111\}$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 จะเสมือนว่าวงแหวนหกเหลี่ยมก็มีการเรียงซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบแบบ ABCABCABC... เมื่อพิจารณาที่ยูนิทเซลล์พบว่ามีความยาวของโครงผลึกเท่ากับ  $3.567 \text{ \AA}$  ความยาวของอะตอมข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดเท่ากับ  $1.54 \text{ \AA}$  มีค่า Ramman shift ของรูป Cubic ที่  $1,332 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1,284 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับคาร์บอน 12 และคาร์บอน 13 ตามลำดับ

รูปที่ 2.2 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะ โควาเลนต์  $sp^3$  ของเพชร

## 2. โครงสร้างแกรไฟต์

โครงสร้างที่เกิดขึ้นจากอะตอมคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ  $sp^2$  เรียกว่า โครงสร้างแกรไฟต์ อะตอมคาร์บอนจะมีการยึดเหนี่ยวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอมในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยชั้นระหว่างวงแหวนหกเหลี่ยมวางซ้อนกันแบบ ABABAB... มีค่าคงที่ของโครงผลึก  $6.707 \text{ \AA}$  ระยะระหว่างอะตอมที่ใกล้สุดเท่ากับ  $1.42 \text{ \AA}$  มีค่า Raman shift เท่ากับ  $1,580 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะโควาเลนต์แบบ  $sp^2$  ของแกรไฟต์

### 2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

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

โบรอนเป็นสารเจือที่ถูกลำเอามาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวทั้งนี้เนื่องมาจากโบรอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 3 ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor) มีขนาดอะตอมใกล้เคียงกับอะตอมคาร์บอนจึงสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้โครงผลึกเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก พลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อยลงเกิด Shallow level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่าประมาณ  $100 \text{ ppm}$  หรือ  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ  $370 \times 10^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

eV และสำหรับฟิล์มเพชรชนิด Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า  $10^{19}$ - $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>) ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าต่ำคือประมาณ  $2 \times 10^{-3}$  eV

สำหรับกรณีของสารเจือผู้ให้ (Donor) หากพิจารณาในโตรเจนพบว่าไม่สามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นของไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าแถบความนำมาก คือมีค่าถึง 1.57 eV ดังนั้นจึงไม่เกิด Shallow level ขึ้น อีกทั้งอะตอมของไนโตรเจนยังทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ส่วนกรณีของฟอสฟอรัสซึ่งมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าคาร์บอนการคำนวณจากทฤษฎีทำนายว่าฟอสฟอรัสสามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ Okano et al. รายงาน

ในปี ค.ศ. 1990 ว่าได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขึ้นมา โดยใช้ไอระเหยของสารละลาย  $P_2O_5$  ในเมทานอล ซึ่งถูกเจือจางด้วยอะซิโตน ค่าความหนาแน่นประจุพาหะวัดได้  $10^{15}$  cm<sup>-3</sup> และความคล่องตัวของอิเล็กตรอน  $50$  cm<sup>2</sup>/V•s แต่ปัญหาที่พบคือ ไม่สามารถควบคุมค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์ยังไม่มีความแน่นอนและอะตอมฟอสฟอรัสมีขนาดใหญ่ เมื่อสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนแล้วมีผลทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ดังนั้นลิเทียมจึงเป็นสารที่ได้รับความนิยมและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์มเพชรที่ทำการเจือสารลิเทียมด้วยวิธี Ion-implantation แสดงคุณสมบัติเป็นฟิล์มชนิดเอ็น แต่ในการเจือสารแบบ In-situ และ In-diffusion จะไม่เกิดผลตามต้องการ เนื่องจากเกิดการชดเชยด้วยความหนาแน่นสูงของสถานะผู้รับที่กระจายอยู่ในแถบพลังงาน ต้องห้ามตลอดจนลิเทียมในเพชรมีการกระจายตัวสูงอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้องซึ่งทำให้การเจือสารไม่มีความแน่นอน

### 2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึกเพชร

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

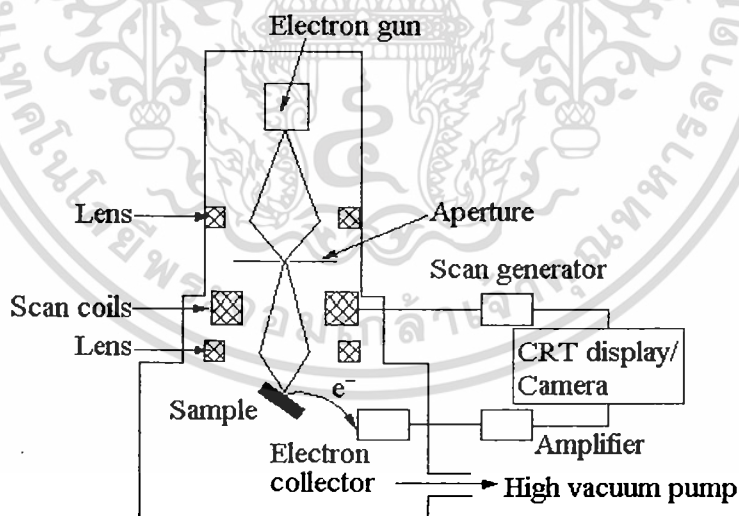
การวิเคราะห์นั้นจะเน้นส่วนที่นำมาวิเคราะห์เฉพาะฟิล์มเพชรมีรายละเอียดของแต่ละเทคนิคมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 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 คือทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 2.4

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



รูปที่ 2.4 แผนภาพการทำงานของ SEM

### 2.3.2 การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและแกรไฟต์สูง แม้ว่าจะมีแกรไฟต์เพียงเล็กน้อยก็ตามเนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการกระเจิงของแกรไฟต์มีค่ามากกว่าของเพชรมาก ตำแหน่งและความกว้างของยอดกราฟจาก Raman spectrum เป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่วิเคราะห์ได้

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

$$P = \alpha E \quad (2.1)$$

โดยที่ P คือ โมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

E คือ สนามไฟฟ้า

$\alpha$  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

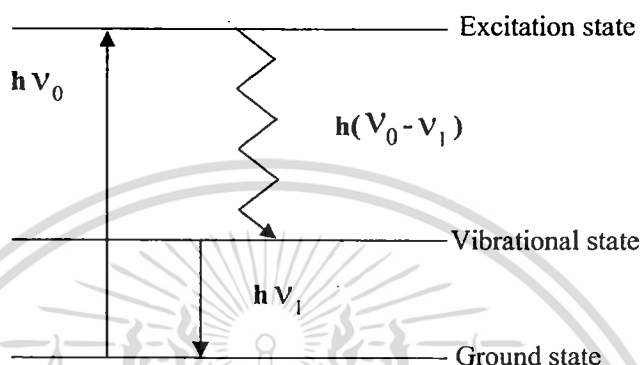
$\nu_0$  คือ ความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ

$\nu_n$  คือ ความถี่ของโฟนอน

$\alpha_n$  คือ Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.5 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงการเกิดปรากฏการณ์ Raman scattering เมื่อยิงลำแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในชิ้นงานตัวอย่าง โฟตอนจากลำแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน  $h\nu_0$  จะเข้าไปอิเล็กตรอนของอะตอมชิ้นงานตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานไปบางส่วน ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเกิดการกระโดดข้ามไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า “สถานะกระตุ้น” (Excitation state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงตกลงมาสู่สถานะเดิม โดยมีการคายพลังงานออกมามีค่า  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ส่วนพลังงานที่สูญเสียไปคือ  $h\nu_1$  ถูกใช้สำหรับทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงสร้างผลึก โดยพลังงาน  $h\nu_1$  ที่สูญเสียไปนี้อยู่ในย่านอินฟราเรด พลังงานที่เหลือ  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ก็คือพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั่นเอง สำหรับสเปกตรัมของแสง ที่ได้ จะถูกเรียกว่า “Stoke line”

จากการใช้ Raman spectroscope ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร แกรไฟต์ อัญมณีคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอนแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน [27]

| Peak position                | Type of carbon                                      | Description                                                                                             |
|------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\sim 1,140 \text{ cm}^{-1}$ | Small size ( $< 0.1 \mu\text{m}$ )<br>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                                                                                       |

### 2.3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

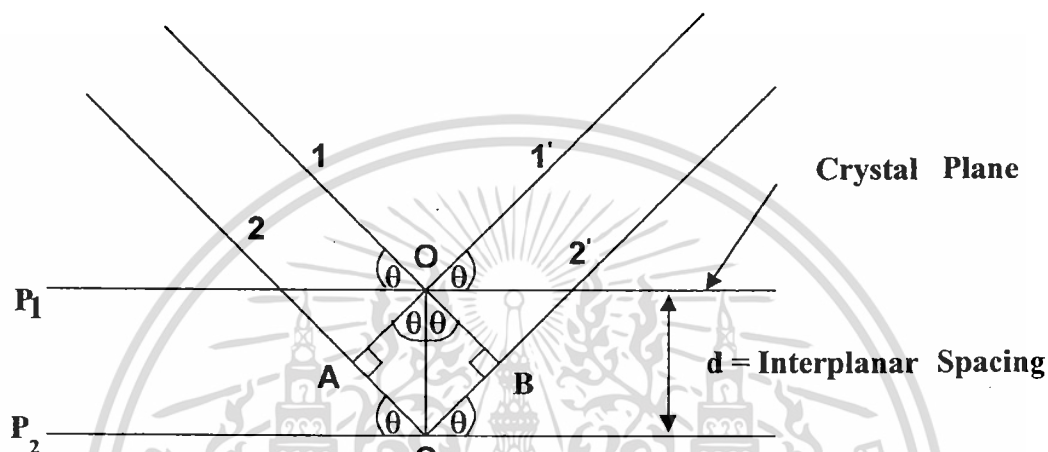
เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) จะใช้พื้นฐานจาก “Bragg’s diffraction law” ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการง่าย ๆ ได้ดังสมการ 2.3 โดยคิดว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบในโครงผลึก ซึ่งสมการของ Bragg พิจารณาจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบในโครงผลึก  $P_1$  และ  $P_2$  ที่ขนานกันดังแสดงใน รูปที่ 2.6

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 เกิดพลังงานแผ่ออกมาทุกทิศทาง พบว่าในทิศทางที่ลำรังสีที่ 1 และ 2 ออกมาทำมุม  $\theta$  เสมือนมีการสะท้อนออกมาของรังสีเอ็กซ์จะให้ความเข้มรังสีเอ็กซ์สูงสุด หรือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมขึ้น (In phase) โดยจากรูปมุม  $\hat{AOC} = \hat{BOC} = \theta$  เพราะฉะนั้น  $AC = BC = d \sin \theta$  ซึ่งจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.6 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก

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

สำหรับฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้วัดค่าตัวแปรของโครงสร้างผลึกและพิจารณาลักษณะรูปทรงของฟิล์มได้ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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      |

#### 2.3.4 การวิเคราะห์ด้วย Seebeck effect

ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการทำให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่ปลายด้านหนึ่งซึ่งทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามแท่งวัสดุความร้อน และพบว่ามีปรากฏการณ์เกิดขึ้นคือมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุพาหะ เนื่องจากความเข้มของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความเข้มข้นของประจุพาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะในแง่วัสดุขึ้น จากหลักการดังกล่าวจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรว่ามีพาหะหลักชนิดใด การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าวจะใช้อุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 2.4 จากรูปที่ 2.4 พบว่าชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเข็ม 2 เล่ม กดบนฟิล์มเพชร โดยเข็ม A ทำหน้าที่เป็นเข็มร้อนมีลวดทั้งสแตนพินอยู่โดยรอบ ส่วนเข็ม B ทำหน้าที่เป็นเข็มเย็นที่อุณหภูมิห้อง นำกัลป์วานอ-มิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกของกัลป์วานอมิเตอร์ต่อกับเข็ม B และที่ขั้วลบต่อกับเข็ม A เมื่อให้ความร้อนกับเข็ม A ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Seebeck effect

| กัลป์วานอมิเตอร์ | ชนิดประจุพาหะ          |
|------------------|------------------------|
| บวก              | โฮล                    |
| ลบ               | อิเล็กตรอน             |
| ศูนย์            | โฮล เท่ากับ อิเล็กตรอน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรสามารถสร้างเป็น ไดโอดด้วยสัณฐานสมบัติจากรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะ โดยในที่นี้จะพิจารณารอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพี และ โลหะอลูมิเนียม ดังแสดงแบบจำลองแถบพลังงานก่อนสัมผัสกัน เมื่อเปรียบเทียบความต่างของระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะอลูมิเนียม ( $E_{F_{Al}}$ ) และของฟิล์มเพชรชนิดพี ( $E_{F_p}$ ) กับระดับพลังงานสุญญากาศ ( $E_0$ ) ขณะยังไม่ได้สัมผัสกันนั้น จะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่า ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันของฟังก์ชันงาน (work function) ของทั้งสองวัสดุ นั่นคือเมื่อมีการสัมผัสกันเกิดขึ้น จะทำให้เกิดการถ่ายเทหรือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานที่สูงกว่า (อิเล็กตรอนจากโลหะอลูมิเนียม) ข้ามรอยสัมผัสไปยังระดับพลังงานที่ต่ำกว่า (ฟิล์มเพชรชนิดพี) จนกระทั่งเข้าสู่สถานะสมดุลความร้อน (ระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกัน) เป็นผลให้เกิดการโค้งงอของระดับพลังงานอื่นในส่วนของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี หรือนั่นคือ ทำให้เกิดกำแพงศักย์ (Barrier Height :  $\phi_B$ ) ขึ้นบริเวณรอยสัมผัสของฟิล์มเพชรชนิดพีกับพื้นผิวของโลหะอลูมิเนียม และพบว่าขณะที่อิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทำให้เกิดการรวมตัวกับประจุโฮลที่ระดับวาเลนซ์บริเวณพื้นผิวของฟิล์มเพชรชนิดพี ทำให้เกิดบริเวณปลดปล่อย (depletion region) ขึ้นในระยะ  $W_0$  หรือเกิดศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in voltage :  $V_{bi}$ ) ขึ้น จะเห็นว่า ค่ากำแพงศักย์ขึ้นจากโลหะอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี ( $q\phi_B$ ) ในภาวะสมดุลความร้อน สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$q\phi_B = V_{bi} + \Delta E \quad (2.4)$$

$$\Delta E = q\chi_C + E_{gc} - q\phi_{Al} \quad (2.5)$$

และเมื่อมีการนำไฟฟ้าขึ้น จะมีปริมาณกระแสไหล (I) ดังสมการที่ 2.6

$$I = I_s [\exp(qV_A / kT) - 1] \quad (2.6)$$

โดยจะมีค่า  $I_s$  เป็นกระแสในสถานะสมดุลความร้อน ( $V = 0$ ) เป็น

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.7)$$

และ

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

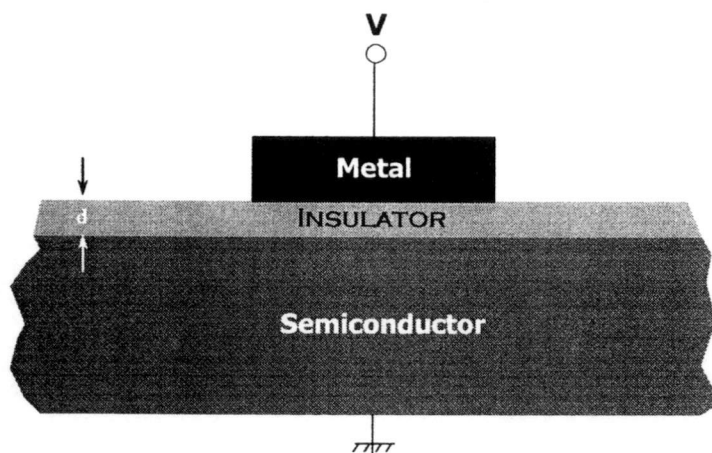
โดยที่

- $q\phi_B$  = ค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส  
 $q\phi_{Al}$  = พลังงานงานของอลูมิเนียม  
 $q\phi_{Cd}$  = พลังงานงานของฟิล์มเพชรชนิดพี  
 $q\chi_C$  = อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้ของฟิล์มเพชร  
 $q\phi_B$  = กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี  
 $E_0$  = ระดับพลังงานที่สูญญากาศ  
 $E_{fAl}$  = ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะอลูมิเนียม  
 $E_i$  = ระดับพลังงานอินทรินซิก  
 $E_{fp}$  = ระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชรชนิดพี  
 $E_{gCd}$  = ช่องว่างพลังงานของฟิล์มเพชร  
 $W_0$  = ระยะปลอดประจุพาหะในชั้นฟิล์มเพชร  
 $I_s$  = กระแสอิ่มตัวของไดโอด ในขณะที่  $V = 0$   
 $A$  = พื้นที่ของรอยสัมผัส  
 $A^*$  = ค่าคงที่ Richardson  
 $m_h^*$  = มวลยังผลโฮลของเพชร =  $3.64 \times 10^{-31}$  kg

ขอตักไดโอดมีคุณสมบัติของการเรกติไฟร์ได้ดี แต่ก็พบว่าในทางปฏิบัติจริง ขอตักไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้ มีกระแสรั่วไหลย้อนกลับเกิดขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกระแสไหลไปข้างหน้า หรือนั่นคืออัตราการกรองการไหลของกระแสต่ำ (Low current rectification ratio) ซึ่งเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ต่อการประยุกต์ใช้งานบางประเภท ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะลดปัญหาของการเกิดกระแสรั่วไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นกับรอยสัมผัสแบบนี้ นั่นคือทำการเพิ่มชั้นฉนวนขึ้นระหว่างรอยสัมผัสแบบขอตักนี้ โดยในที่นี้จะทำการศึกษาการใช้ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกเป็นชั้นฉนวนขึ้น เพราะฉะนั้นจึงควรมาทำความเข้าใจทฤษฎีที่น่าจะสอดคล้องกับแนวความคิดที่จะนำมาแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสร้างขอตักไดโอดนี้

ในปี ค.ศ.1951 Moll และ Pfann&Garette ได้เสนอโครงสร้าง MIS หรือโครงสร้างรอยต่อของโลหะ (metal) / ฉนวน (insulator) / สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ขึ้นเป็นครั้งแรก และในเวลาต่อมาก็มี Frankl และ Lindner จึงทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของโครงสร้าง MIS ดังนั้นในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงทฤษฎีของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติโดยเลือกพิจารณาเฉพาะกรณีของชั้นสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี ดังแสดงต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 105787 อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ลักษณะไดโอดโครงสร้าง MIS

1. ค่าความแตกต่างของพลังงานฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_{ms}$ ) ในภาวะสมดุลความร้อนเป็นศูนย์ หรือนั่นคือ ช่วงระดับพลังงานแบนราบ (flat-band condition) ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$\phi_{ms} \equiv \phi_m - \left( \chi_s + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad (2.9)$$

โดยที่  $\phi_{ms}$  = ค่าต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

$\phi_m$  = ฟังก์ชันงานของโลหะ

$\chi_s$  = อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ

$E_g$  = แถบพลังงานช่องว่างของสารกึ่งตัวนำ

$\psi_B$  = ค่าต่างของกัมแพกซ์ระหว่างระดับ  $E_f$  กับระดับ  $E_i$

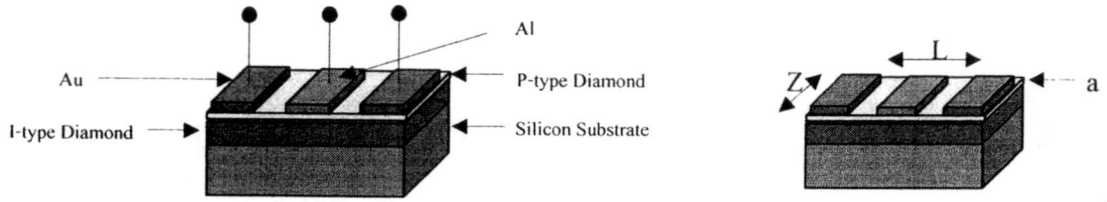
$\phi_B$  = กัมแพกซ์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

2. ประจุต่าง ๆ ไม่สามารถปรากฏอยู่ใน โครงสร้างได้แม้ในกรณีที่มีการให้ไบอัส โดยประจุเหล่านี้จะปรากฏในสารกึ่งตัวนำในปริมาณเท่ากับ โนชั้น โลหะ แต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกันที่บริเวณพื้นผิวที่ติดกับชั้นฉนวน

3. ประจุพาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นฉนวนภายใต้กรณีการให้ไบอัส นั่นคือ พิกัดความต้านทานของฉนวนมีค่าเป็นอนันต์

หลังจากทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วจะทำการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อทำการศึกษาหาความต้านทานของชั้นความนำไฟฟ้า ความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า การให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ ค่าแรงดันพังก์เจอร์ (Punch through) การตอบสนองความถี่ และอื่นๆ เพื่อเป็นการศึกษาพารามิเตอร์สำหรับการนำไปใช้หรือการประยุกต์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แผนภาพการวัดชิ้นงานตัวอย่างของชั้นความนำเพชร

## 2.5 สรุป

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าไม่ต้องทำการเคลือบโลหะก่อนทำการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ขนาดของผลึกและความหนาฟิล์มได้ เทคนิค Raman วิเคราะห์พันธะระหว่างคาร์บอนโดยพิจารณาที่ค่า Raman spectrum ที่  $520$ ,  $1,333$  และ  $1,580 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งของซิลิคอน เพชร และแกรไฟต์ ตามลำดับ และยังสามารถวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มได้จากการหาค่า Full Width at Half Maximum (FWHM) และเทคนิค Seebeck effect วัดชิ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ และ วัดหลังจากการเทอร์มิเนตด้วยก๊าซไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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 กระบวนการเตรียมฐานรอง

การทดลองนี้ เลือกใช้ซิลิกอนเป็นฐานรองในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยใช้ซิลิกอนชนิดพีระนาบ (100) มีความหนาประมาณ 400 ไมครอน ก่อนที่จะนำฐานรองซิลิกอนนี้ไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จำเป็นต้องทำความสะอาดเบื้องต้น และเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอนดังนี้

##### 3.2.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิกอน

- กำจัดเศษฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกบนผิวหน้าซิลิกอนในน้ำ DI (Deionized water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง
- ลอกชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าฐานรองด้วยสารละลายกรด HF 5% แล้วล้างออกด้วยน้ำ DI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะบริเวณผิวหน้า โดยการต้มด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$  acid)
- ล้างกรด  $\text{HNO}_3$  ด้วยการต้มในน้ำ DI และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $\text{N}_2$
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มด้วยสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene)
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง

### 3.2.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร

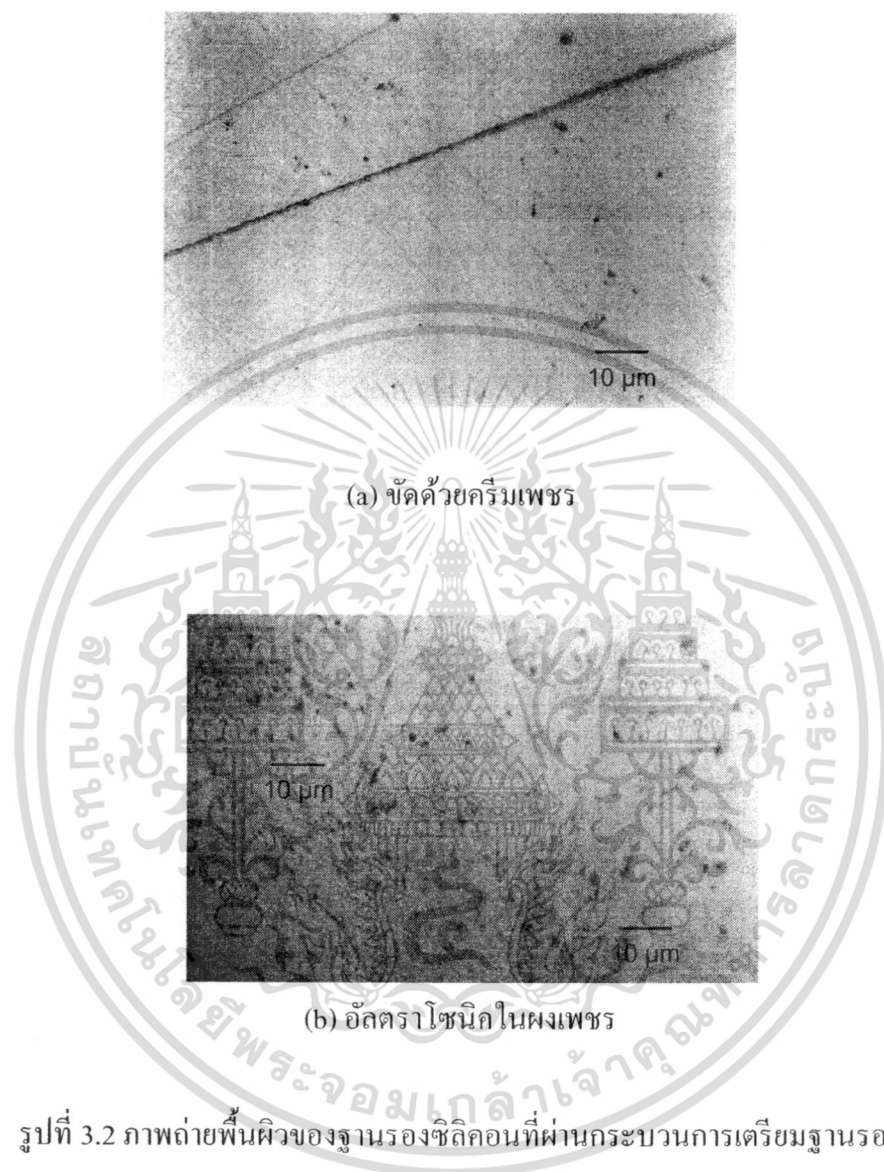
หลังจากทำความสะอาดเบื้องต้นกับฐานรองซิลิกอนครบทุกขั้นตอน แล้วจะทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอนก่อนนำไปตั้งเกาะหีฟิล์มเพชร เพื่อเป็นการกระตุ้นฐานรองให้มีความหนาแน่นของการนิวเคลียสเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรเร็วขึ้น โดยในการทดลองนี้ เลือกใช้การขัดด้วยครีมเพชรเป็นการเตรียมผิวหน้าฐานรอง ครีมเพชรที่ใช้ขัดมีขนาดของเม็ดผลึก 0.25 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนอีกครั้งเพื่อล้างครีมเพชรออกด้วยวิธีดังต่อไปนี้

- ต้มแผ่นซิลิกอนในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนเพื่อล้างครีมเพชรออก
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซีโตน โดยสั่นในเครื่องสั่นความถี่สูง
- ล้างอะซีโตนออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- กำจัดชั้นออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้นอีกครั้งด้วยสารละลายกรด HF 5%
- ล้างกรด HF 5% ออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง



รูปที่ 3.1 ครีมเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิกอนขนาดเม็ดผลึก 0.25 ไมครอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

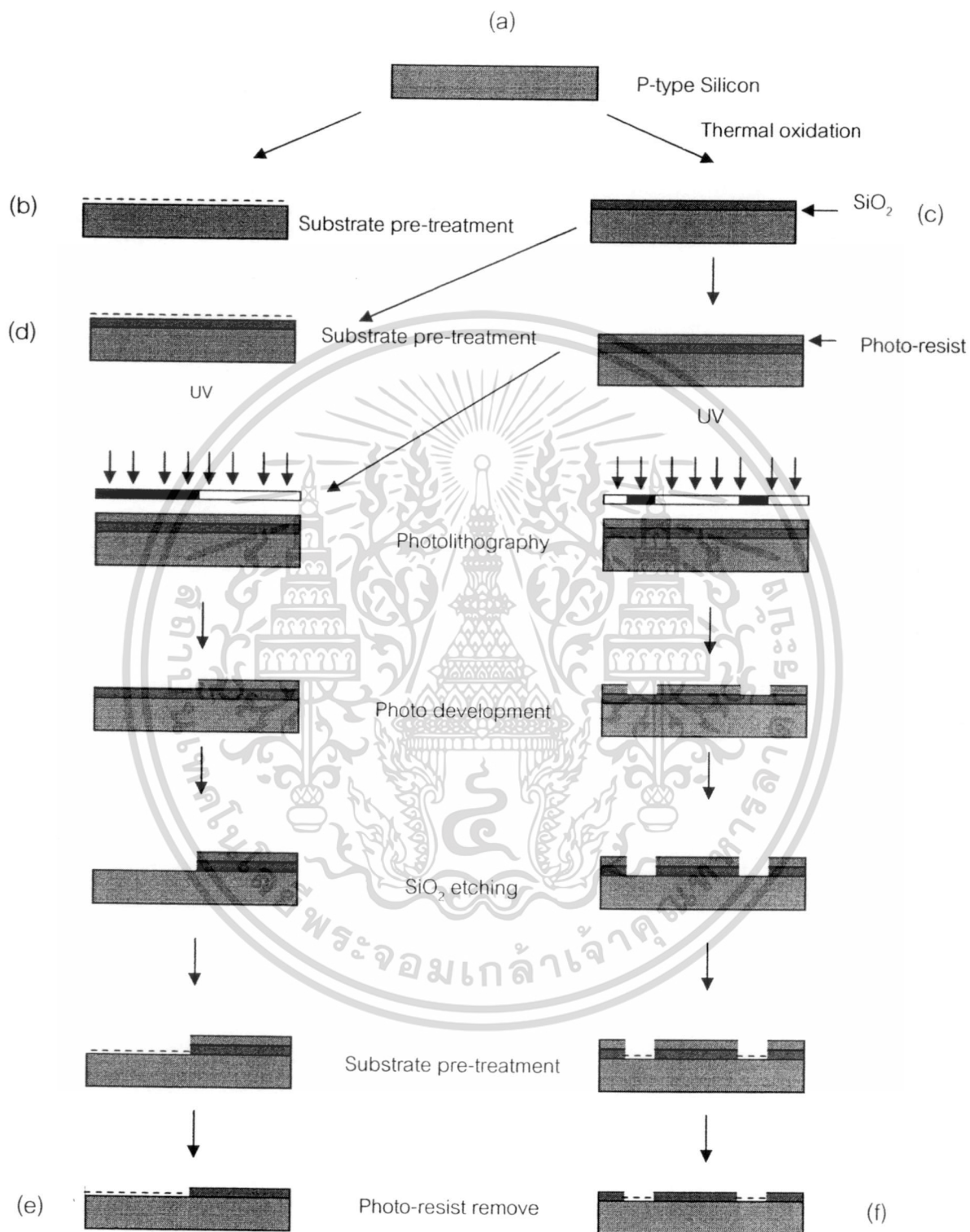
จากนั้น นำแผ่นซิลิกอนนี้ไปตรวจสอบรอยขีดที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งลักษณะผิวหน้าที่ผ่านการขีดด้วยคริมเพชรนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นฐานรองที่พร้อมจะนำไปสังเคราะห์ฟิล์มต่างๆ ได้ต่อไป



### 3.3 การเตรียมชิ้นงาน

ในเตรียมชุดเครื่องมือในการสังเคราะห์เป็นชุดทดลองที่ออกแบบมาเพื่อการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ได้กำหนดขึ้นจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ในการเตรียมชิ้นงานได้แก่ กระบวนการทำความสะอาดฐานรอง เมื่อทำความสะอาดฐานรองแล้วนำฐานรองผ่านกระบวนการเตรียมผิวหน้าแสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กระบวนการเตรียมฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 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                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ความดัน                                                                              | 1 บรรยากาศ                                                                                                                    |
| อัตราส่วนก๊าซออกซิเจนกับอะเซทิลีน<br>ก๊าซออกซิเจน (cc/min)<br>ก๊าซอะเซทิลีน (cc/min) | 0.7 - 0.95 โดยปริมาตร<br>99.5% , อัตราการไหล 140-950 cc/min<br>99.95% , อัตราการไหล 200-1000 cc/min                           |
| ขนาดของหัวเชื่อม                                                                     | 100                                                                                                                           |
| ฐานรอง                                                                               | ซิลิคอนขัดมัน ซิลิคอนขัดด้วยครีมเพชร<br>ซิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชร<br>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  $\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรรมใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ลักษณะผิวหน้าของซิลิคอนที่เตรียมด้วยวิธีการขัดด้วยครีมเพชรและการอัลตราโซนิคในผงเพชรแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ 5 10 และ 15 นาที จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรจะเกิดขึ้นน้อยมากบนพื้นผิวที่มีความเรียบได้แก่ซิลิคอนไดออกไซด์ และผิวซิลิคอนขัดมัน แต่พื้นผิวที่มีรอยขีดจากครีมเพชรหรืออัลตราโซนิคในผงเพชรความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของเพชรมาก ซึ่งผลการทดลองสามารถแบ่งตามความหนาแน่นการนิวคลีเอชันได้แก่ วัสดุป้องกันการนิวคลีเอชันและวัสดุกระตุ้นการนิวคลีเอชัน โดยความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของวัสดุต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.2

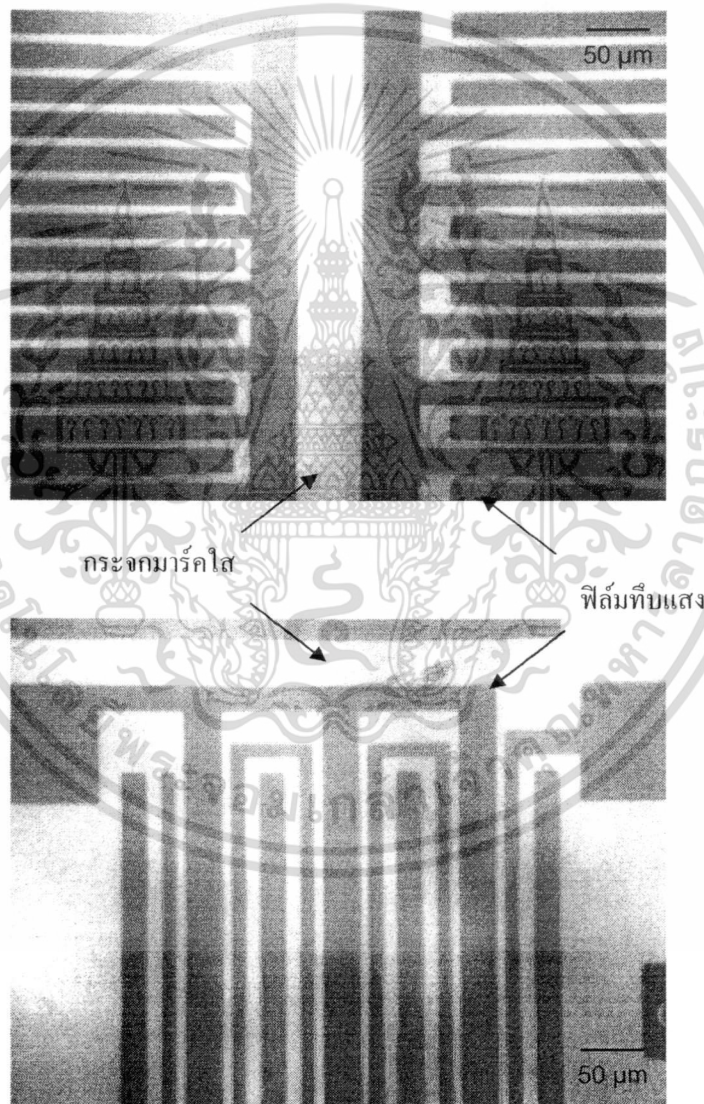
ตารางที่ 3.2 ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันของผิวหน้าด้วยวิธีต่างๆ

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

ความหนาแน่นการนิวคลีเอชันนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของการเกิดฟิล์มเพชรแต่มีความสำคัญอย่างมากเพราะถ้ามีความหนาแน่นการนิวคลีเอชันมาก[33-36] แต่ไม่มีความสม่ำเสมอก็ไม่เป็นผลดีต่อฟิล์มเพชร เนื่องจากฟิล์มที่มีการนิวคลีเอชันที่ไม่สม่ำเสมอจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของผลึกแตกต่างกันเป็นผลให้ฟิล์มเพชรที่ได้มีค่าความหนาที่ไม่เท่ากัน

การหาค่าความหนาแน่นจะใช้วิธีสุ่มนับจำนวนของนิวคลีเอชันที่เกิดขึ้นที่เวลาสังเคราะห์ที่ 5 นาที และหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน ผลการสังเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างความหนาแน่นการนิวคลีเอชันอย่างเด่นชัด และทำการสังเคราะห์ที่เวลา 10 และ 15 นาที เพื่อหาเวลาสังเคราะห์ที่น้อยสุดในการเกิดเป็นฟิล์มเพชร

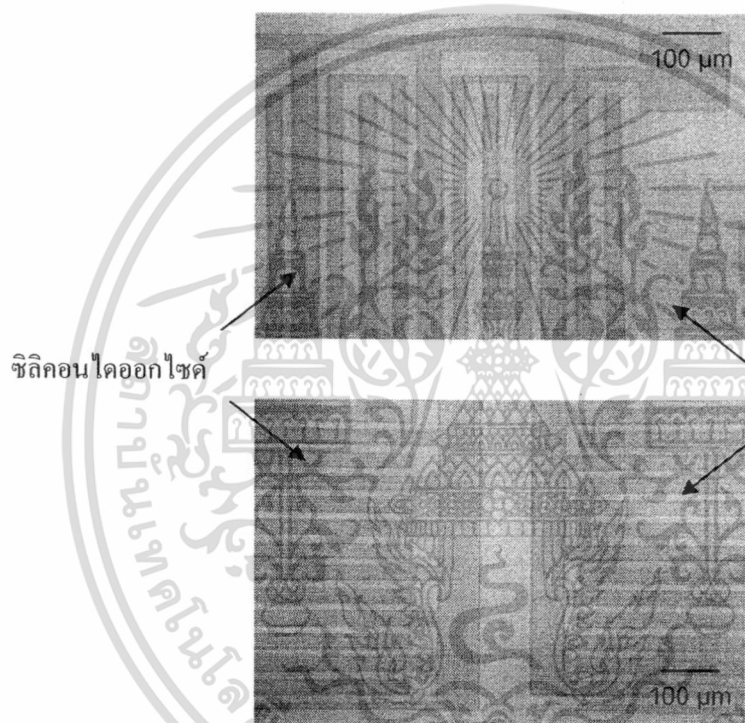
การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะถูกลงสู่สังเคราะห์ให้เกิดตามลวดลายที่ถูกออกแบบไว้ในการเตรียมฐานรองด้วยวิธีการตามที่กล่าวมาแล้ว เพื่อศึกษาถึงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการออกแบบเพื่อประยุกต์เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำในพื้นที่ที่กำหนด การสังเคราะห์เฉพาะที่นี้ใช้ผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ป้องกันได้แก่ซิลิคอนไดออกไซด์และวัสดุกระตุ้นได้แก่ซิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชร การเลือกเทคนิคการอัลตราโซนิกในผงเพชรนั้นนอกจากจะมีความหนาแน่นการนิเวศอันสูงแล้วยังเหมาะสำหรับการเตรียมผิวหน้าซิลิคอนในบริเวณที่จำกัดได้เป็นอย่างดี ลวดลายที่ใช้ในการเลือกสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายตัวอย่างลวดลายที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แล้วนำชิ้นงานไปทำวัดความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ มีความหนาหลายค่าได้แก่ 10,000 20,000 25,000 และ 30,000 Å ภายหลังจากการสร้างฟิล์มเพชรเสร็จแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้จากการสร้างว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดในแต่ละวิธีการ เช่นการเกิดฟิล์มเพชรหรือผลึกเพชรบนพื้นที่ที่ไม่ต้องการให้เกิด, ลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นในแต่ละวิธี, ความผิดพลาดของค่าระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร รวมไปถึงค่าความกว้างน้อยสุดของลวดลายฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น เมื่อเทียบกับค่าที่ได้ออกแบบไว้ รูปที่ 3.5 เป็นภาพฐานรองที่ผ่านการเตรียมซึ่งประกอบด้วยซิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชร และซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายฐานรองที่เตรียมสำหรับการสังเคราะห์เฉพาะที่

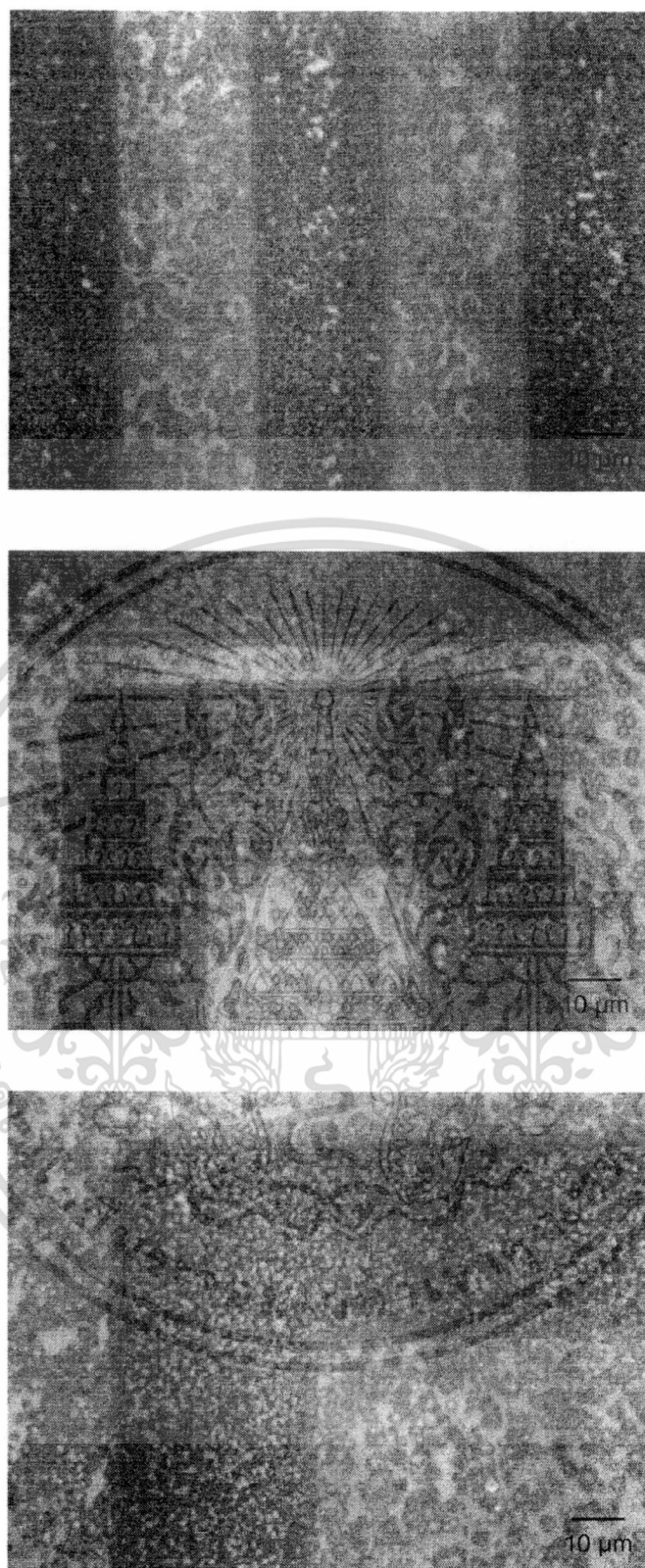
ภายหลังจากกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแล้วเสร็จ ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูลักษณะของลวดลายฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.6 - 3.9 จากรูปพบว่าภายในพื้นที่ของลวดลายที่กำหนดอันเป็นบริเวณที่ผิวหน้าแผ่นซิลิคอนอัลตราโซนิกในผงเพชรจะเกิดฟิล์มเพชรขึ้นตามลวดลายที่ออกแบบไว้ ส่วนพื้นที่บริเวณที่มีซิลิคอนไดออกไซด์ปกคลุม จะมีผลึกเพชรเดี่ยว ๆ เกิดกระจายทั่วไป ซึ่งบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรขึ้น ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกนำไปลอกในสารละลายบัฟเฟอร์เพื่อกำจัดผลึกเพชรให้หลุดออกไป ท้ายสุดจะได้ฟิล์มเพชรเกิดบนฐานรองซิลิคอนเป็นลวดลายตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



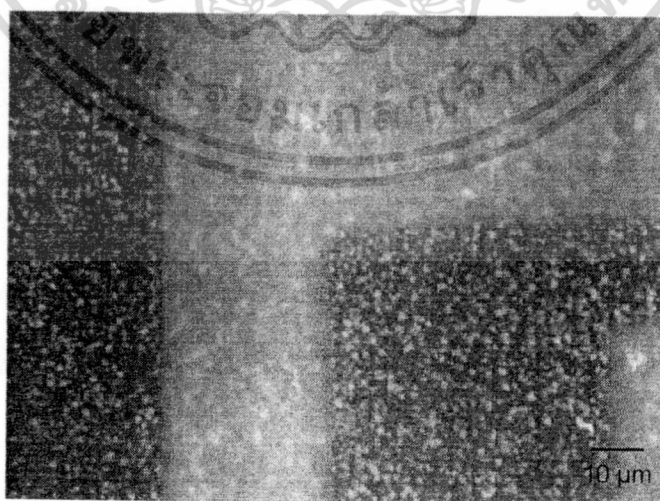
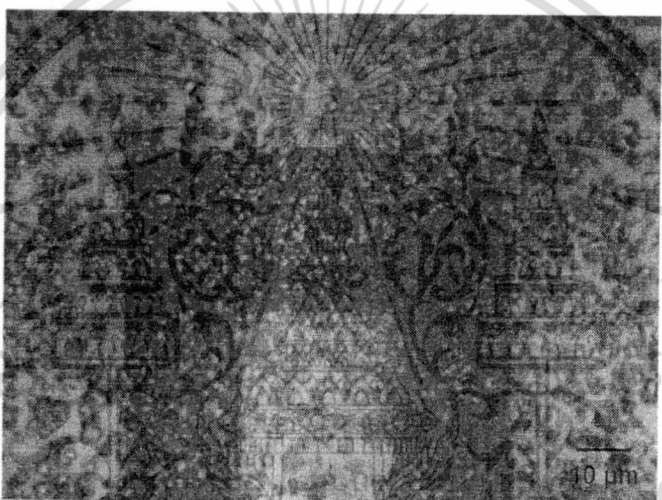
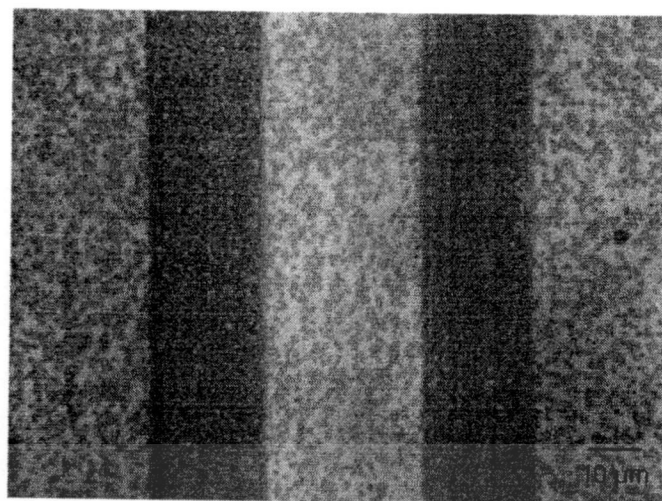
รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายผลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่ใช้เวลาสังเคราะห์ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



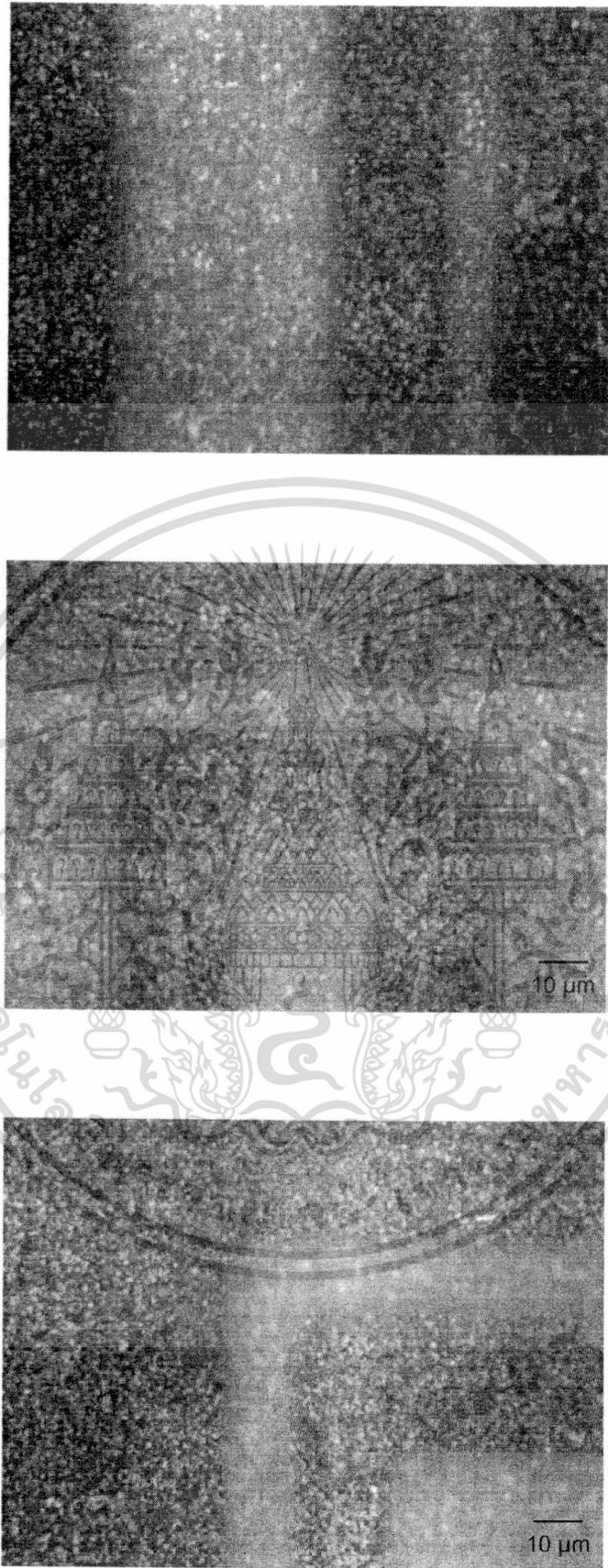
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายผลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่ใช้เวลาสังเคราะห์ 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายผลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่ใช้เวลาสังเคราะห์ 15 นาที

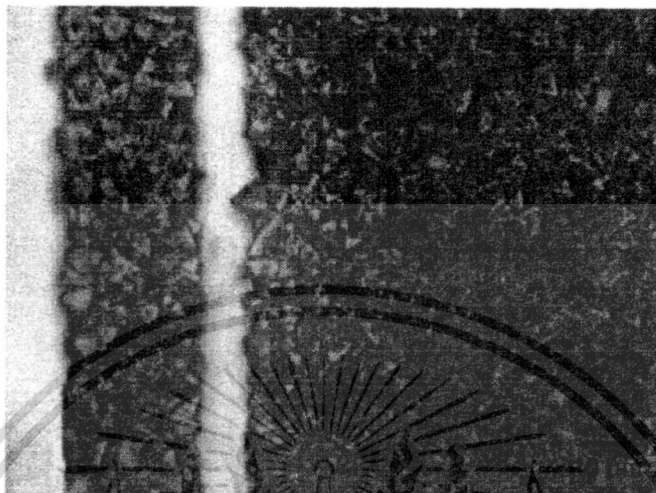
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



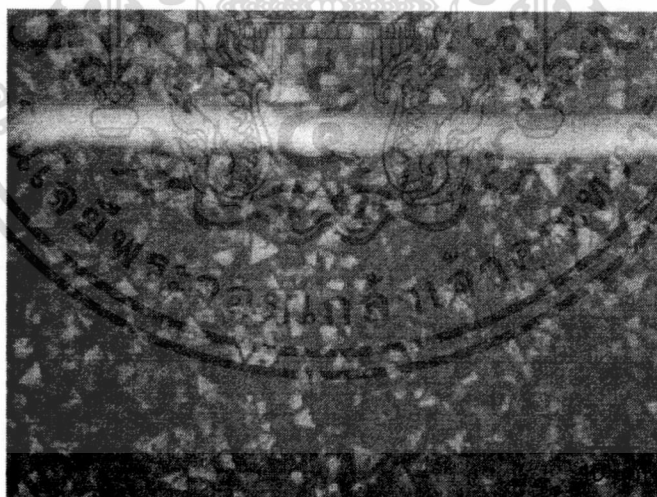
รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายผลการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่ใช้เวลาสังเคราะห์ 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาขนาดของลวดลายเพื่อหาขนาดพื้นที่ และระยะระหว่างลวดลายที่ใกล้ที่สุดของการสังเคราะห์ เพราะเมื่อสามารถทำการกำหนดพื้นที่ ความหนาของฟิล์มจึงสามารถออกแบบอุปกรณ์ในการประยุกต์ใช้งานได้ โดยขนาดของลวดลายและระยะใกล้ที่สุดแสดงดังรูปที่ 3.10 - 3.14

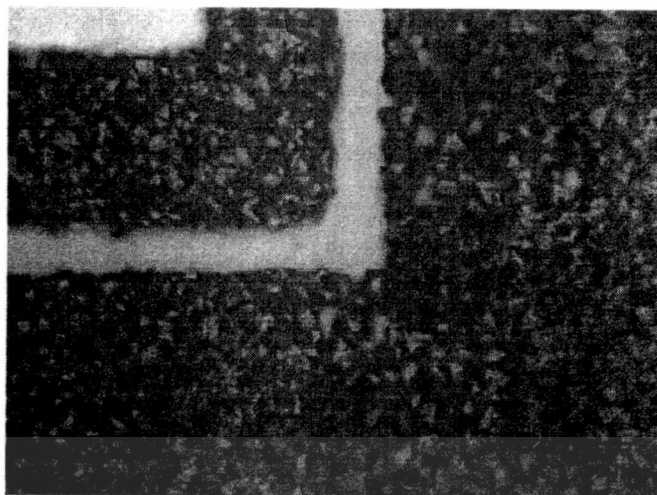


รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายระยะห่างระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร

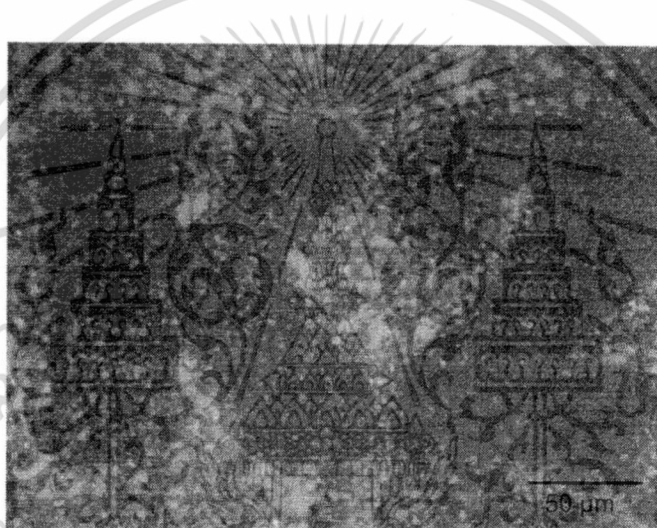


รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชร

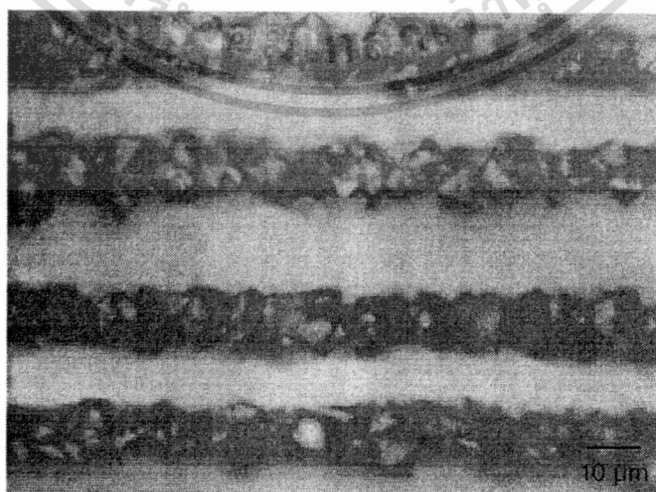
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายมุมมองของลวดลายฟิล์มเพชร



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายลวดลายอักษรของลวดลายฟิล์มเพชร



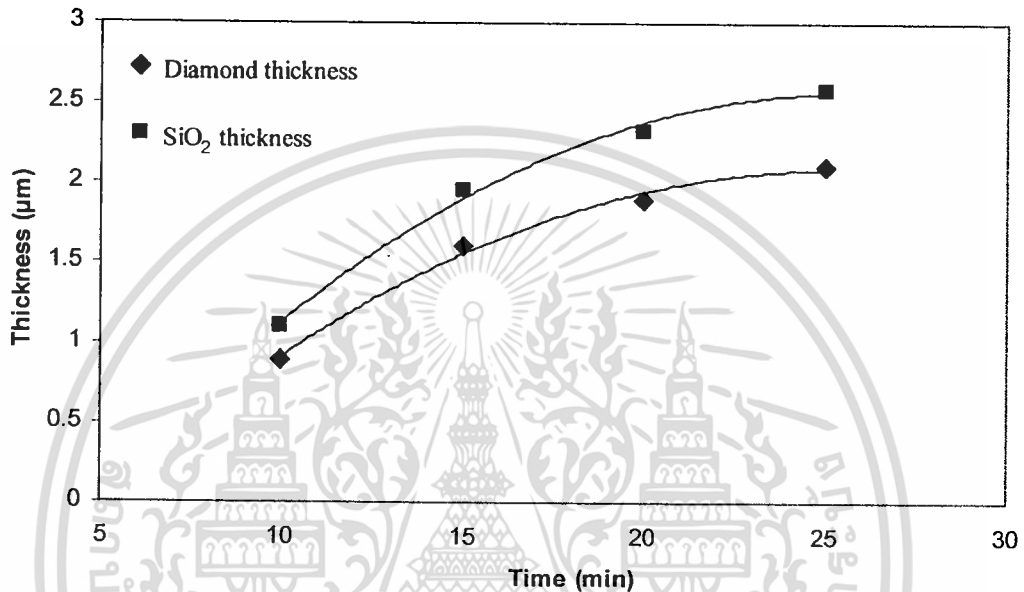
รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายขนาดความกว้างต่ำสุดของฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากการทดลองสร้างฟิล์มเพชรตามลวดลายที่ออกแบบไว้ จะได้ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้ในการสร้างลวดลายของฟิล์มเพชรดังนี้คือ

1. ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลาย 10  $\mu\text{m}$
2. ขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลาย 10  $\mu\text{m}$

จากผลการทดลองสรุปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม ซิลิคอน ไดออกไซด์ และเวลาในการสังเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.15



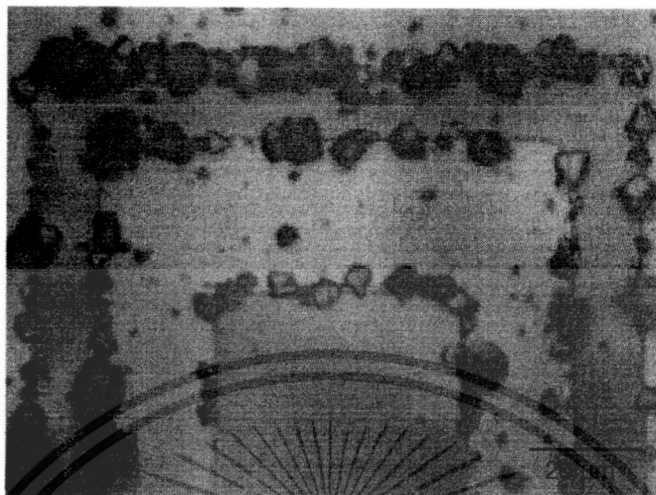
รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม ซิลิคอน ไดออกไซด์และเวลาสังเคราะห์

ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเฉพาะที่มีข้อควรระวังในส่วนของการเตรียมฐานรอง ดังนี้

- การสร้างชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ต้องคำนึงถึงความสม่ำเสมอของฟิล์ม มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการกัดที่ไม่เท่ากันตลอดชิ้นงาน และทำให้เกิดความผิดพลาดในการกำหนดพื้นที่สังเคราะห์
- กระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงต้องเลือกน้ำยาที่มีความหนาและทนต่อการกัดของสารละลายบัฟเฟอร์ เนื่องจากซิลิคอน ไดออกไซด์ที่ใช้มีความหนามากกว่า 10,000 Å เป็นเหตุให้ต้องใช้เวลานานในการกัด ถ้าน้ำยาไวแสงบางเกินไปจะทำให้น้ำยาไวแสงหลุดร่อนได้ เป็นผลให้ซิลิคอน ไดออกไซด์นั้นถูกกัดให้บางลง
- ส่วนของการล้างน้ำยาไวแสงออกจากชิ้นงานหลังทำการลอกลายลงในชิ้นงานแล้ว ถ้างล้างน้ำยาไม่หมดจะทำให้ส่วนนั้นไม่สามารถนำไปสังเคราะห์ฟิล์มได้ เพราะเมื่อนำไปลอกชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ส่วนที่ใช้สังเคราะห์จะมีซิลิคอน ไดออกไซด์อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อควรระวังที่ได้กล่าวมาแล้วผลของข้อผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานที่เกิดขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.16 - 3.20

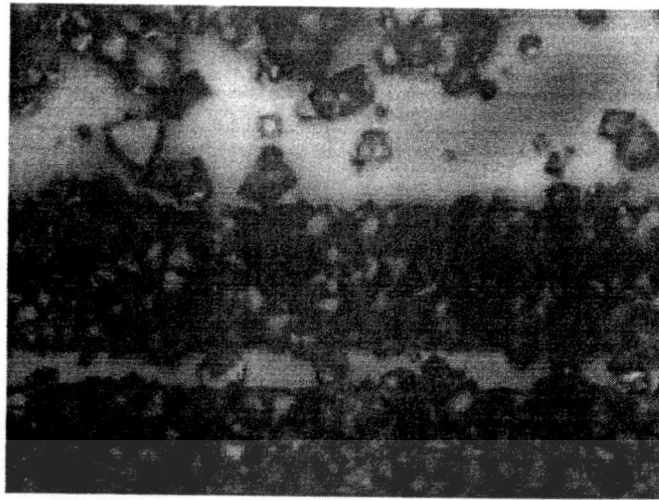


รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายตัวอย่างของลวดลายฟิล์มเพชรสร้างในอุณหภูมิสูงเกินไป

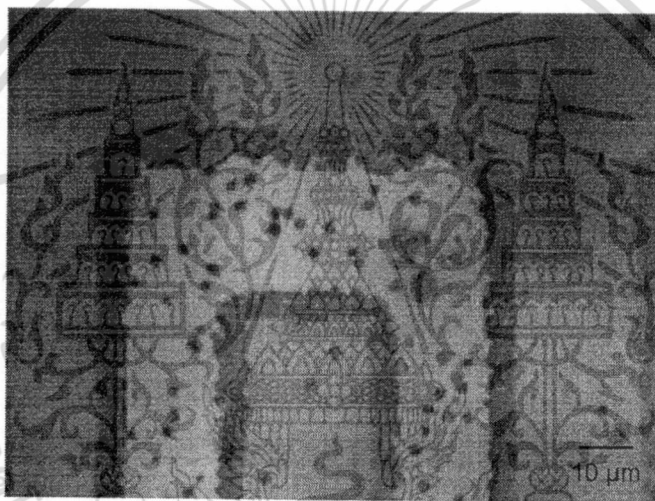


รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายแสดงข้อผิดพลาดของลวดลายฟิล์มเพชรเนื่องจากกระจกต้นแบบ

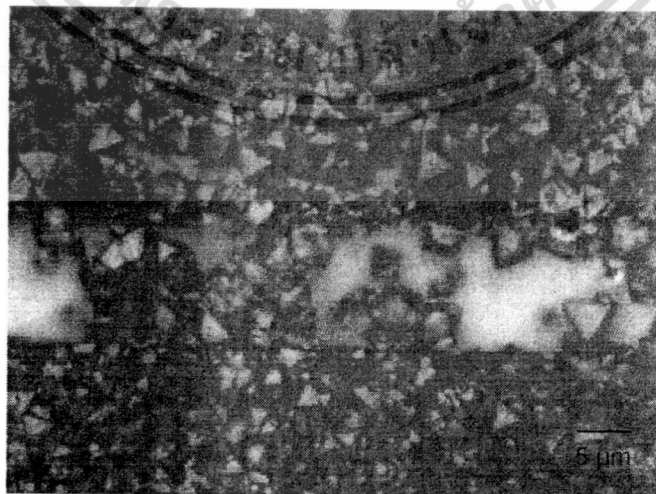
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายความผิดปกติของลวดลายฟิล์มเพชรจากกระบวนการเตรียมพื้นผิวฐานรอง



รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายความผิดปกติจากการเปิดช่องซิติคอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.20 ภาพถ่ายลวดลายฟิล์มเพชรที่เกิดจากการซิติคอนไดออกไซด์บางเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 สรุป

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าการสังเคราะห์เพชรในรูปของผลึก ฟิล์ม และ เฉพาะที่นั้นต้องคำนึงถึงความหนาแน่นการนิวคลีเอชันดังตารางที่ 3.2 ซึ่งเมื่อต้องการสังเคราะห์ เพชรบนฐานรองใดๆ ต้องใช้เวลาขึ้นอยู่กับความหนาแน่นการนิวคลีเอชัน ส่วนค่าพารามิเตอร์ของ การสังเคราะห์สรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD

| เงื่อนไข                                   | ผลึกเพชร                                                   | ฟิล์มเพชร               | เฉพาะพื้นที่                                   |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|
| อัตราส่วน โดยปริมาตร ของก๊าซ               | 0.85-0.95                                                  |                         |                                                |
| แหล่งจ่ายก๊าซ<br>- ออกซิเจน<br>- อะเซทิลีน | อัตราการไหล 190-950 cc/min<br>อัตราการไหล 200-1,000 cc/min |                         |                                                |
| ฐานรอง                                     | ซิลิคอนขัดมัน                                              | ซิลิคอนขัดด้วยครีม เพชร | ซิลิคอนอัลตราโซนิค ในผงเพชรและซิลิคอนไดออกไซด์ |
| อุณหภูมิฐานรอง                             | 560-1,330 °C                                               | 560-1,040 °C            | 560-1,040 °C                                   |
| ตำแหน่งเปลวไฟ                              | เปลวไฟชั้นกลาง                                             |                         |                                                |
| เวลาในการทดลอง                             | ประมาณ 10 นาที                                             | มากกว่า 15 นาที         | 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

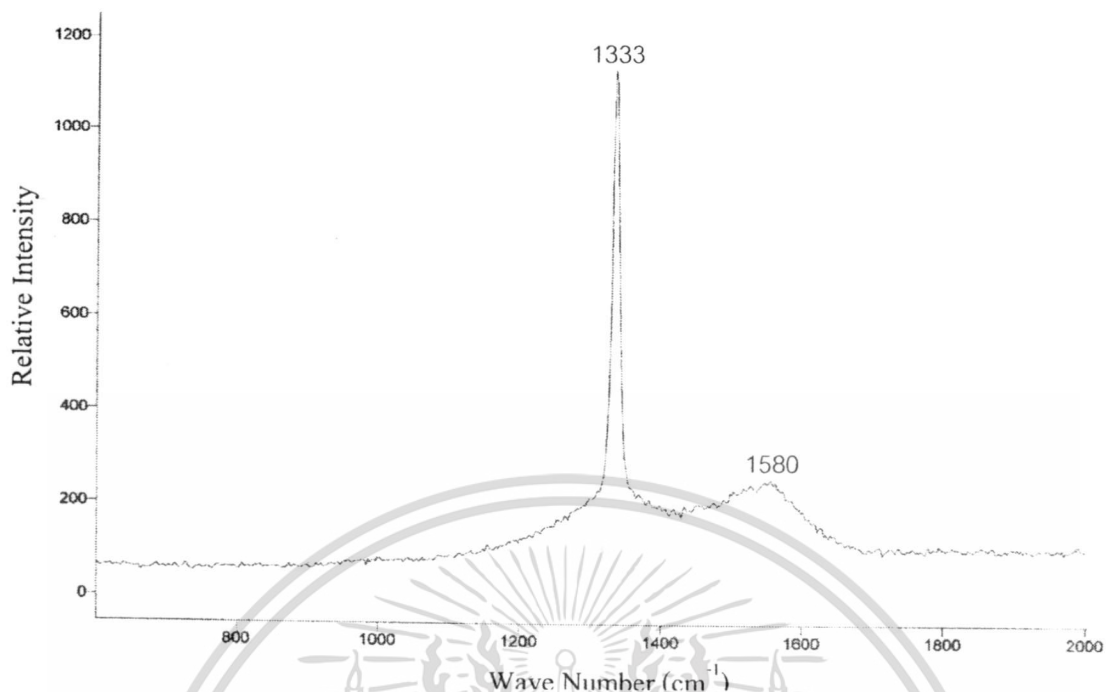
ในบทนี้กล่าวถึงคุณสมบัติของฟิล์มเพชรเนื่องจากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติในอุณหภูมิสูงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติตอบสนองทางแสง โดยจะกล่าวถึงผลการทดลองและทฤษฎีไปพร้อมกัน

#### 4.1 บทนำ

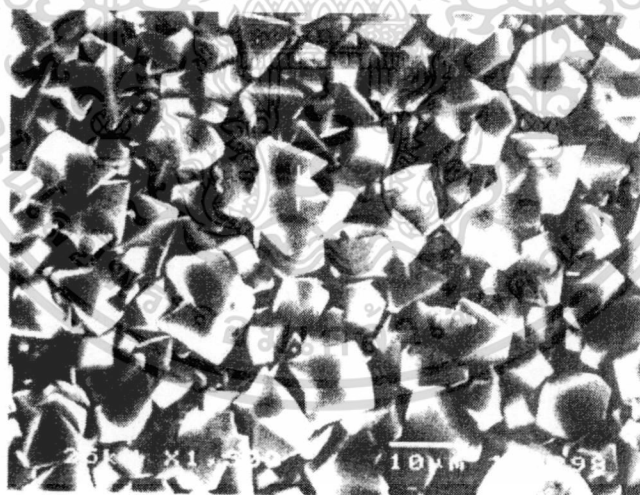
เนื่องจากฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติที่โดดเด่นอยู่หลายประการ เช่น มีความแข็งแรง, ทนทานต่อการกัดกร่อน, ทนต่อรังสี, นำความร้อนได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวต่ำ, มีช่องว่างแถบพลังงานสูง, มีความหนาแน่นสูง, มีความทนทานต่อสารเคมี, มีค่า Dielectric constant ต่ำ, มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ และทนทานต่ออุณหภูมิ เป็นต้น จึงสามารถนำมาใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น นำมาเคลือบเพื่อเพิ่มความแข็ง, นำมาทำเป็นแผ่นระบายความร้อน, นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทนความร้อน, นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทนรังสี, ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงหรือ window layer เป็นต้น

#### 4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

สำหรับในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ก่อนนำไปสร้างต่อไปเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขอื่น ๆ อีกต่อไป โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรนี้จะอาศัย Raman Spectroscopy, Scanning Electron Microscopy และ X-Ray Diffraction เพื่อตรวจสอบความเป็นเพชร ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร และระนาบของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1-4.3 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ค่ายอดของ Raman spectrum ที่วัดได้จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์นี้มีค่าอยู่ที่  $1333\text{ cm}^{-1}$  อย่างชัดเจน ซึ่งถือได้ว่าฟิล์มเพชรนี้มีค่าใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ (ค่ายอด Raman spectrum เท่ากับ  $1332\text{ cm}^{-1}$ ) แม้ว่าจะมียอดของกราฟไฟต์ ( $1580\text{ cm}^{-1}$ ) รวมอยู่ด้วย แต่ความสูงยอดกราฟต่ำกว่ามาก นั่นคือฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรและมีปริมาณกราฟไฟต์ต่ำมาก



รูปที่ 4.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์



รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่สังเคราะห์ได้

นอกจากนั้น เมื่อทำการตรวจสอบด้วยวิธี SEM จะได้ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างหนึ่งของฟิล์มเพชรทั้งชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดมีลักษณะเดียวกับฟิล์มเพชรระนาบ (111) และหลังจากตรวจสอบระนาบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์มเพชรเหล่านี้ด้วยวิธี X-ray diffraction จะได้กราฟดังรูปที่ 4.3 ซึ่งยิ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ฟิล์มเพชรนี้มีคุณสมบัติเป็นผลึก



รูปที่ 4.3 ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์

#### 4.3 คุณสมบัติในอุณหภูมิสูง

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

พบว่าความต้านทานของฟิล์มเพชรแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ นั่นคือที่อุณหภูมิเพิ่มฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานจะลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250 °C ขึ้นไปค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น 2.42 MΩ ที่อุณหภูมิ 400 °C แต่ด้วยขีดจำกัดในการวัดค่าความต้านทานของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพชรในการวัดที่อุณหภูมิสูง จึงได้ทำการวัดค่าความต้านของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Hewlett Packard semiconductor / Component test system และ Curve tracer สามารถวัดค่าความต้านทานได้มากกว่า  $1 \times 10^{10} \Omega$  ซึ่งการวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานกับอุณหภูมิก็เพียงพอสำหรับการสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้องและพบว่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆต่อความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง ( $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เล็กน้อยมากคือน้อยกว่า 0.000–0.022 โดยที่อุณหภูมิ  $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น จึงพอสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรนี้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถนำไปใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิสูงได้

การวิเคราะห์ชนิดประจุพาหะด้วยเทคนิค Seebeck effect ทำการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้ด้วยชุดเครื่องมือ ในการทำการทดลองได้จ่ายความร้อนกับเข็มร้อนอุณหภูมิประมาณ  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกัลวานอมิเตอร์ได้อย่างเด่นชัดขึ้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ว่าฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CACVD กัลวานอมิเตอร์ชี้ไปยังตำแหน่งศูนย์ แสดงว่าจำนวนพาหะที่เคลื่อนที่จากเข็มร้อนไปยังเข็มเย็นนั้นมีเท่ากันทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้ไม่เกิดความต่างศักย์ระหว่างเข็มร้อนและเข็มเย็นขึ้น จึงสรุปได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก

หลังจากทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้าด้วยวิธี ไฮโดรเจนเทอมินเนชัน ซึ่งมีเงื่อนไขในการสังเคราะห์คือ เวลาที่ใช้คือ 5 และ 10 นาที ผลการทดลองที่ได้หลังจากให้ความร้อนแก่เข็ม A ปรากฏว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้เอนไปทางด้านบวก เนื่องจากที่บริเวณเข็มร้อน(เข็ม A) พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้มีประจุโฮลเพิ่มขึ้น และประจุโฮลเหล่านี้จะมีพลังงานสูงกว่าประจุโฮลที่บริเวณอื่นๆ ดังนั้นประจุโฮลเหล่านี้จะแพร่กระจายออกไปรอบๆ และทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุโฮล โดยไหลจากเข็มร้อนไปยังเข็มที่เย็นกว่าบริเวณเข็มร้อนจึงขาดประจุไฟฟ้าบวกและทำให้มีศักย์เป็นลบ ส่วนด้านเข็มเย็นจะมีศักย์เป็นบวก ดังนั้นกระแสสุทธิจึงไหลออกจากเข็มเย็นผ่านมิเตอร์ไปยังเข็มร้อน แสดงว่ามีประจุเคลื่อนที่จากเข็ม A ไปยังเข็ม B แล้วผ่านกัลวานอมิเตอร์ทางขั้วบวก ทำให้เข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้เบนไปทางบวก ดังนั้นพาหะหลักในการนำกระแสของชั้นความนำไฟฟ้าที่ทำการวัดนี้คือ โฮล จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าชั้นความนำไฟฟ้าที่สร้างได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

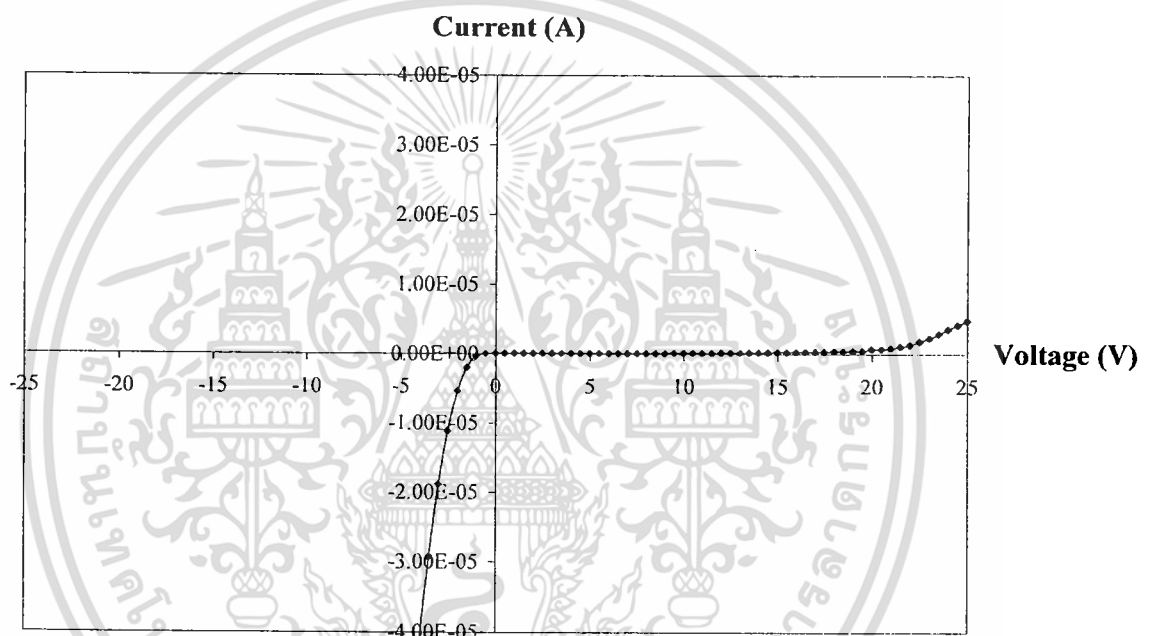
#### 4.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ทำการสร้างขึ้น เช่น ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอตั๊ก, ผลการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม, ผลการศึกษาขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า, ผลการศึกษาคาบตอบสนองความถี่ เป็นต้น ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอต่กี

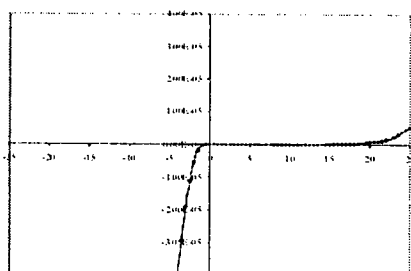
ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอต่กีของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่บริเวณขั้วเกท-ซอส และขั้วเกท-เดรน โดยจะทำการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้า ด้วยวิธี H-termination หลังจากนั้นจึงทำรอยสัมผัสโอห์มิกด้วยโลหะทองคำซึ่งจะได้ขั้วซอส และขั้วเดรนของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นจึงทำรอยสัมผัสขอต่กีด้วยโลหะอลูมิเนียมซึ่งใน ขั้นตอนนี้จะได้ขั้วเกทของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อได้รอยสัมผัสขอต่กี และรอยสัมผัส โอห์มิกแล้ว จะทำการตรวจสอบคุณลักษณะกระแส-แรงดันของขั้วเกท-ซอส และขั้วเกท-เดรน ได้ผล การทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของขั้วเกท-ซอส

พิจารณารูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของขั้วเกท-ซอส ของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พบว่า มีลักษณะเป็นรอยสัมผัสขอต่กี นั่นคือ ในกรณีที่ให้แรงดันไบอัสตรงกับรอยสัมผัสจะมีกระแสไหล ส่วนในกรณีที่ให้แรงดันไบอัสกลับกับรอยสัมผัสจะไม่มีกระแสไหล จนกระทั่งถึงค่าแรงดันพังทลาย(Breakdown Voltage) กระแสจึงจะสามารถไหลได้ จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 ค่าแรงดันพังทลายมีค่าประมาณ 20 V

Current (A)



Voltage (V)

#### รูปที่ 4.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของขั้วเกต-เดรน

พิจารณารูปที่ 4.5 พบว่า ลักษณะของกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของขั้วเกต-เดรนของ MSEFET มีลักษณะเป็นรอยสัมผัสขอตักที่เช่นเดียวกับผลการทดลองในรูปที่ 4.4 โดยค่าแรงดันทั้งหลายของกราฟในรูปที่ 4.5 นี้ มีค่าประมาณ 20 V จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะพบว่ามีลักษณะเป็นรอยสัมผัสขอตัก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับชั้นความนำไฟฟ้าชนิดพีที่ทำกรสังเคราะห์ด้วยวิธี H-termination นี้เป็นรอยสัมผัสแบบขอตัก

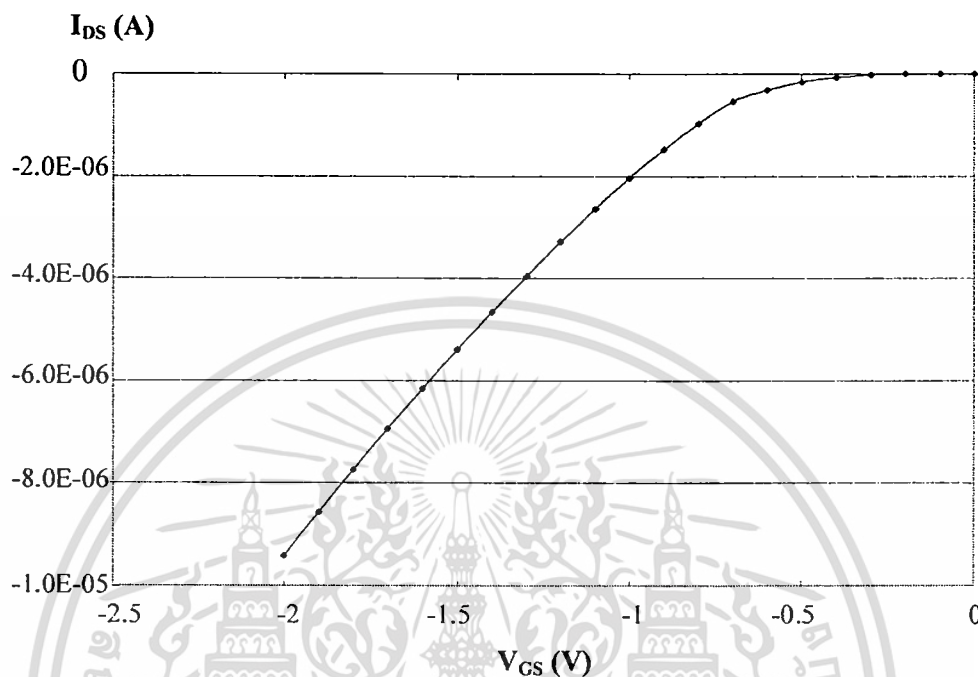
#### 4.4.2 ผลการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม โดยจะศึกษาถึงผลของความหนาของชั้นความนำไฟฟ้า และผลของความหนาแน่นของโฮลที่มีต่อแรงดันขีดเริ่ม ในขณะที่ขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าคงที่ โดยความกว้างของช่องทางเดินกระแสมีขนาด 200  $\mu\text{m}$  และความยาวของช่องทางเดินกระแสมีขนาด 20  $\mu\text{m}$

ในการทดสอบจะทำการจ่ายค่าแรงดันไฟเลี้ยงเดรนซอส ( $V_{DS}$ ) แก่วงจรคงที่ค่าหนึ่งคือ -10 V จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ขั้วเกต ( $V_{GS}$ ) ของทรานซิสเตอร์ เครื่องจะทำการบันทึกค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์แต่ละครั้งที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันและเก็บค่าต่าง ๆ ไว้

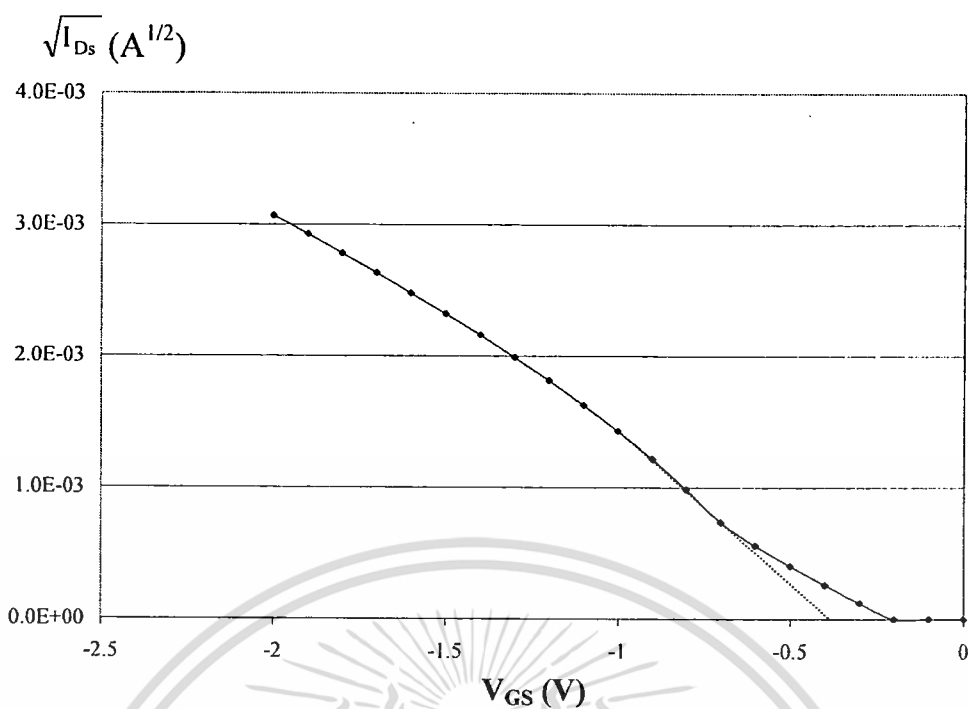
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการแสดงผลด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างผลการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มที่ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm แสดงได้ดังรูปที่ 4.6

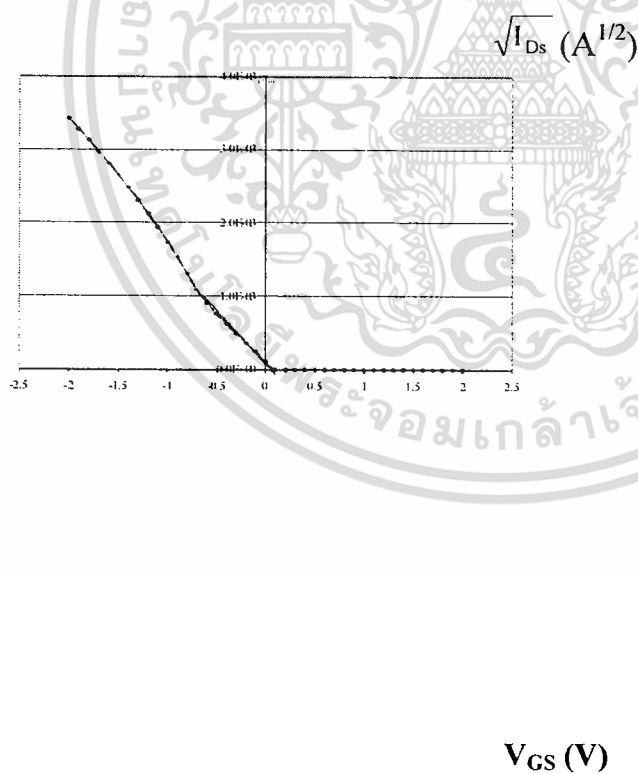


รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันขีดเริ่มของชั้นความนำไฟฟ้า หนา 76 nm

จากนั้นนำผลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{DS}$  กับ  $V_{GS}$  ในรูปที่ 4.6 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sqrt{I_{DS}}$  กับ  $V_{GS}$  จากนั้นลากเส้นตรงจากกราฟลงมาตัดแกน  $V_{GS}$  ที่จุดตัดแกนนี้จะเป็นค่าแรงดันขีดเริ่มของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.15 นี้สามารถอ่านค่าแรงดันขีดเริ่มได้มีค่าเท่ากับ  $-0.4$  V จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเป็นลบแสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm นี้เป็นแบบเอ็นฮานซ์เมนต์โหมด



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sqrt{I_{DS}}$  กับ  $V_{GS}$  ของ ชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sqrt{I_{DS}}$  กับ  $V_{GS}$  ชั้นความนำไฟฟ้าที่ความหนา 92 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

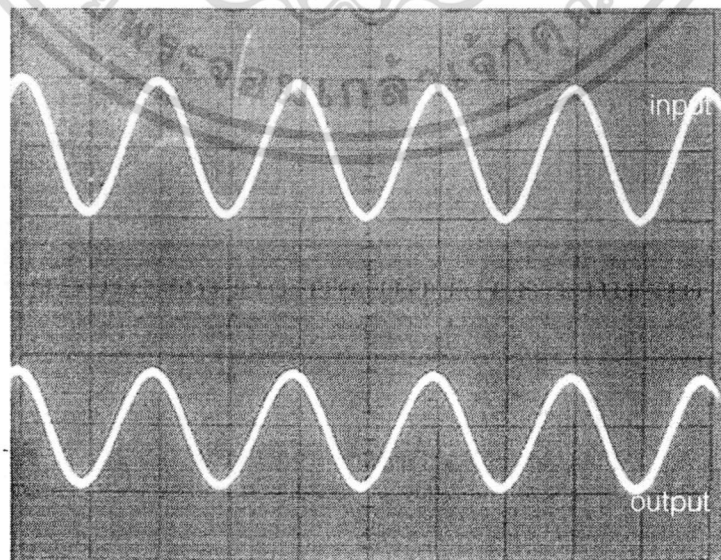
จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 จะพบว่า ค่าแรงดันขีดเริ่มของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้น โดยมีค่าความหนาของชั้นความนำไฟฟ้าต่าง ๆ กันคือ 92 nm มีค่า 0.1 V จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเป็นบวก แสดงว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นนี้เป็นแบบดีพลีทชัน โหมด ซึ่งในกรณีของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แบบดีพลีทชัน โหมดนั้น ต้องให้แรงดันบวก(ไบอัสกลับ) ที่ขั้วเกตเพื่อที่จะทำให้ช่องทางเดินกระแสปิดสนิทพอดี

ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นจากเงื่อนไข ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถทำงานได้ 2 โหมดด้วยกัน คือ แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ โหมด และแบบดีพลีทชัน โหมด

#### 4.4.3 ผลการศึกษาการตอบสนองความถี่ของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาถึงการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ว่าสามารถที่จะตอบสนองความถี่สูงสุดได้เท่าไร ซึ่งในการทดลองนี้เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นความนำไฟฟ้านั้นจะใช้อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 นาที เพียงเงื่อนไขเดียว โดยมีขนาดความกว้างของช่องทางเดินกระแสเป็น 200  $\mu\text{m}$  และขนาดความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น 20  $\mu\text{m}$  เมื่อสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เสร็จแล้วทำการทดสอบการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ในการทดสอบจะทำการให้แรงดัน  $V_{DD}$  เท่ากับ -10 V แล้วทำการป้อนสัญญาณคลื่นรูปซายน์ขนาด 100 mV แรงดันออฟเซ็ทขนาด -1 V จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความถี่จาก 1 kHz ถึง 1MHz ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 จากนั้นนำค่าแรงดันเอาต์พุตมาทำการนอ้มัลไลซ์ แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเอาต์พุตที่ทำการนอ้มัลไลซ์ กับความถี่



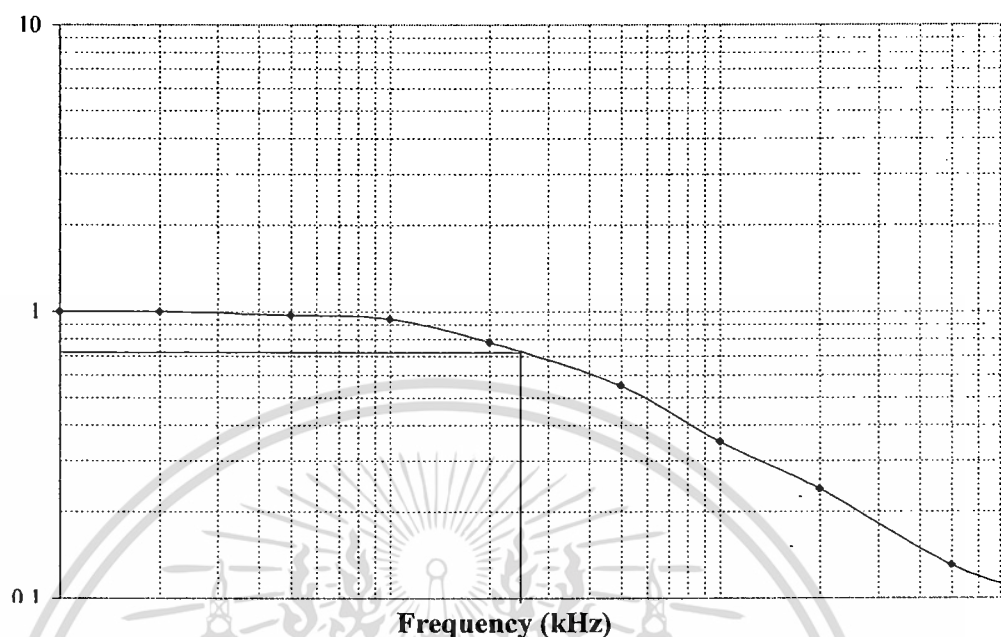
Hor. 50 ms/Div.

Ver. 50 mV/Div.

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการตอบสนองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Normalized Output Voltage

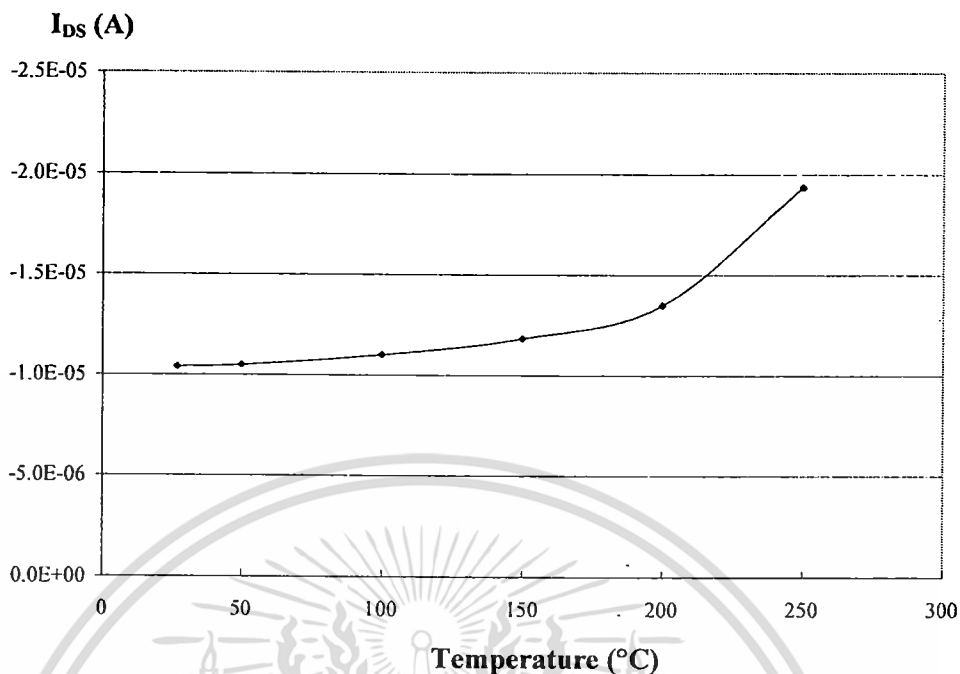


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความถี่

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.10 สามารถหาค่าความถี่ที่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถตอบสนองสูงสุดได้ โดยดูที่จุดที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเหลือ 0.707 หรือที่  $-3\text{dB}$  จะอ่านค่าได้เท่ากับ 25

#### 4.4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อทำงานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ๆ โดยจะทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างจากชั้นความนำไฟฟ้าหนา 76 nm ซึ่งมีขนาดของความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเป็น  $200\ \mu\text{m}$  และ  $20\ \mu\text{m}$  ตามลำดับ เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ  $27\ ^\circ\text{C}$  (อุณหภูมิห้อง),  $50\ ^\circ\text{C}$ ,  $100\ ^\circ\text{C}$ ,  $150\ ^\circ\text{C}$ ,  $200\ ^\circ\text{C}$  และ  $250\ ^\circ\text{C}$  โดยในการทดสอบจะทำการให้แรงดัน  $V_{\text{DD}}$  เท่ากับ  $-10\ \text{V}$  และแรงดัน  $V_{\text{GS}}$  เท่ากับ  $-2\ \text{V}$  แล้วทำการวัดค่ากระแส  $I_{\text{DS}}$  ซึ่งอยู่ในช่วงอิมิตัว นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแส  $I_{\text{DS}}$  กับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่ากระแส  $I_{DS}$  ของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่า ค่ากระแส  $I_{DS}$  มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C แสดงว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างจากฟิล์มเพชรสามารถทำงานได้ดีมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของอุณหภูมิน้อยมากจนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 200 °C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกค่ากระแส  $I_{DS}$  จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างจากฟิล์มเพชรมีเสถียรภาพของการทำงาน ได้จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง ประมาณ 200 °C

#### 4.5 สรุป

การศึกษาถึงสภาวะการนำไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ซึ่งฟิล์มเพชรนี้มีค่าใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ และทำการศึกษาการเติมสารเจือลงไปในฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกด้วยวิธีไฮโดรเจนเทอมินเทที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดชั้นความนำเพชรชนิดพีเกิดขึ้น ซึ่งจากเพชรทั้งสองชนิดสามารถนำมารวมเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มากขึ้น

ในการทดลองศึกษาความนำจะเป็นในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรสามารถทำได้ทั้งโคโอด และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ซับซ้อนมากนัก เนื่องจากการสร้างฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะที่คงเป็นอุปสรรคใหญ่ในการกำหนดพื้นที่ และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตาม การสร้างอุปกรณ์อย่างง่ายก็จะเป็นพื้นฐานการพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยที่นำเสนอเป็นการศึกษาถึงการสร้างฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่กำหนด เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำฟิล์มเพชรไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ต่อไป ฟิล์มเพชรถูกสร้างด้วยระบบ CACVD ฐานรองจะถูกเตรียมพื้นผิวเพื่อกระตุ้นให้เกิดการนิวเคลียสของเพชร ด้วยการขัดผิวหน้าฐานรองด้วยเทคนิคการอัลตราโซนิกในผงเพชรขนาด  $0.5 \mu\text{m}$  ส่วนวัสดุที่นำมาเป็นวัสดุป้องกันเกิดการนิวเคลียสได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ ลวดลายที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรถูกออกแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบวงจรรวม คือค่าขนาดความกว้างต่ำที่สุด และระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของลวดลาย จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของลวดลายฟิล์มเพชร ได้ผลดังนี้ คือ ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของฟิล์มเพชรมีค่า  $10 \mu\text{m}$  ขนาดความกว้างต่ำสุดของลวดลายฟิล์มเพชร  $10 \mu\text{m}$

ด้านคุณสมบัติของฟิล์มเพชรเมื่อสังเคราะห์แล้วพบว่า เป็นสารกึ่งตัวนำ 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

การศึกษาดังกล่าวการนำไฟฟ้าของชั้นความนำไฟฟ้าจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ซึ่งฟิล์มเพชรนี้มีค่าใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ และทำการศึกษาค่าการเติมสารเจือลงไปในฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกด้วยวิธีไฮโดรเจนเทอมิเนทที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดชั้นความนำเพชรชนิดพีเกิดขึ้น ซึ่งจากเพชรทั้งสองชนิดสามารถนำมารวมเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มากขึ้น

ในการทดลองศึกษาความนำจะเป็นในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรสามารถทำได้ทั้ง ไดโอด และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ซับซ้อนมากนัก เนื่องจากการสร้างฟิล์มเฉพาะที่คงเป็นอุปสรรคใหญ่ในการกำหนดพื้นที่ และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตามการสร้างอุปกรณ์อย่างง่ายก็จะเป็นพื้นฐานการพัฒนาต่อไป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CACVD ซึ่งในการพัฒนามุ่งเน้นนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการสารกึ่งตัวนำซิลิคอนอันเป็นกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลักในปัจจุบัน การพัฒนานั้นยังคงต้องมีการศึกษาต่อไปเพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดียิ่งฟิล์มเพชรเพื่อนำไปเป็นอุปกรณ์เฉพาะทางเช่น การนำไปใช้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูง ความดันสูง และอุปกรณ์ที่ตอบสนองทางแสง ฯลฯ ซึ่งประโยชน์ที่จะได้รับจากฟิล์มเพชรนั้นจะเป็นวัสดุในอนาคตที่สามารถทำงานในช่วงการทำงานที่ซิลิคอนหรือวัสดุอื่นๆ ไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาการสังเคราะห์พร้อมกับการพัฒนาคุณสมบัติของฟิล์มให้ดียิ่งขึ้นในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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.
- [36] Borges, C. F. M., Schelz, S., Martinu, L. and Moisan, M. “**Eject 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.
- [41] Wei, J. and Ahn, J. **“Irradiation induced failure of diamond based UV detector,”** Crystal Research Technology, 1999, 34, 133.
- [42] McKeag, R. D. and Jackman, R. B. **“Diamond photodetectors for UV laser-based applications,”** Lasers in Synthesis, Characterization, and Processing of Diamond, Proceedings of the SPIE, 1997, 3484, 182–194.
- [43] Feigerle, C. S. and Shaw, R. W. **“Laser diagnostics of CVD diamond film growth. Optics and Photonics News,”** Optical Society of America, May, 1996, 24–28.
- [44] Angus, J. C. and Hayman, C. C. **“Low-pressure, met stable growth of diamond and ‘diamond like’ phases”**. Science, 1988, 241, 913–921.
- [45] Angus, J. C., Wang, Y. and Sunkara and M. **“Metastable growth of diamond and diamond-like phases,”** Annual Review of Materials Science, 1991, 21, 221–248.
- [46] P. Sommani, Y. Wongprasert and W. Titiroongruang **“Synthesis of diamond films by combustion activation technology,”** 1st International conference on materials processing for properties and performance (MP3), Singapore, pp. 758-767, August 2002.
- [47] Y. Wongprasert, T. Matthapan, L. Supadee and W. Titiroongruang **“Non-destructive method for DLC stress measurement,”** 1st International conference on materials processing for properties and performance (MP3), Singapore, pp. 182-187, August 2002.
- [48] Y. Wongprasert, N.Atiwongsangthong, R.Muanghlua, A.Rerkratn and W.Titiroongruang **“Studied on Characteristics of MIS Diode from Diamond Like Carbon,”** 3rd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International conference on materials processing for properties and performance (MP3)  
,Singapore, pp. 19-24 November 2004.

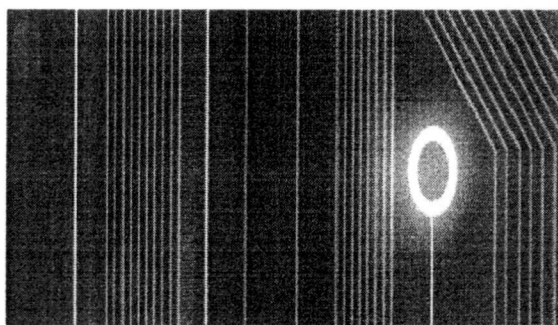
- [49] K. Kitagawa, T. Aoki, S. Khunkhao, Y. Wongprasert, W. Titiroongruang and K. Sato  
“**Optical-beam profiling by field-controlled metal–semiconductor–metal structures,**” International Journal of Electronics, Vol. 92, No.10, October 2005, p.595-600.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Home Title Index New Titles Journals Downloads Order Info Preview Distributors About Us Contact

| Title            | Smart Materials                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ISBN / ISBN-13:  | 0-87849-356-5 / 978-0-87849-356-2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Year:            | 2008                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Title:           | Smart Materials <a href="#">[online]</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Authors/Editors: | Tawee Tunkasiri                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Published in:    | Advanced Materials Research, Volumes 55 - 57                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Category:        | Selected, peer reviewed papers from the International Conference on Smart Materials Smart/Intelligent Materials and Nanotechnology (Smartmat-08) and the 2nd International Workshop on Functional Materials and Nanomaterials (IWOFN-2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Pages:           | 1000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Edition:         | softcover                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Description:     | <p>The main theme of this special volume is that of intelligent and smart materials and their application. One particular aim is to encourage the 'cross-fertilisation' of these materials with nanomaterials.</p> <p>The main topics covered are: devices, processing, applications, modeling and characterization of a wide range of materials including piezoelectric ceramics/polymers, magnetostrictive materials, smart structural materials and composites, electro-optics and other photonic systems, carbon and other nanotubes, new nano and micromaterials, biomedical materials, sensors and drivers smart materials.</p> <p>This wide coverage therefore makes this book an excellent handbook on the subject.</p> |
| TOC:             | <a href="#">Table of Contents</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Prices:          | USD: 411.00 / EUR: 298.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## The Diamond Crystal Nucleation by Combustion Activation CVD

Y. Wongprasert<sup>1,a</sup>, R. Muanghlua<sup>2,b</sup> and K. Sato<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology  
 Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

<sup>2</sup>Electronics Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology  
 Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

<sup>3</sup>Department of Electronics, School of Information Technology and Electronics, Tokai University,  
 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

<sup>a</sup>kwyothin@kmitl.ac.th, <sup>b</sup>kmrangso@kmitl.ac.th, <sup>c</sup>kznrato@keyaki.cc.u-tokai.ac.th

**Keyword:** Combustion activation CVD; Diamond films pattern; Diamond nucleation

**Abstract.** This paper presents the diamond nucleation using combustion activation chemical vapor deposition (CACVD) by 0.95 volumetric ratio of  $O_2/C_2H_2$  under atmospheric pressure. The main point of our work is to develop the CACVD technique for synthesize the semiconductor materials, which is developed for electronic devices application. The surface nucleation of substrate was studied by using surface pretreatment. The results of surface nucleation on mirror-silicon, polished silicon by diamond powder, silicon-dioxide ( $SiO_2$ ), and polished  $SiO_2$  by diamond powder, are significantly different. It can be concluded that the silicon-dioxide mask technique is useful for nucleated diamond protection whereas the polished silicon by diamond powder is suitable for nucleated diamond generation. These techniques are applied for the pattern fabrication.

### Introduction

In recent years the interests in research and application of diamond have greatly increased due to the development of CVD technique for synthesized diamond films. These films, like natural diamond, have many interesting physical properties: mechanical hardness, very high thermal conductivity, and optical transparency [1,2]. The combustion activation chemical vapor deposition (CACVD) method is one of numerous techniques for synthesize diamond crystals and diamond films, which was invented by Hirose et al. [3,4] that used for the synthesis of diamond films, both dispersed and dense polycrystalline ones, at a growth rate of ca  $250 \text{ \AA s}^{-1}$ . This method provides gas phase activation through the highly exothermic chemical reaction between acetylene ( $C_2H_2$ ) and oxygen ( $O_2$ ). And this process provides an excellent diamond growth environment without vacuum chamber. The main equipment required in the CACVD consists of a torch, oxygen gas, and acetylene. The process needs the incomplete combustion of acetylene feather flame, and it is controlled under the following condition: - the volume ratios of  $O_2/C_2H_2$  were 0.70-0.95 in atmosphere, the temperature range of Si substrate was 500-1350 °C, the synthesized times were 10-30 min [5-7].

This research was focused on developing the CACVD technique to synthesize the selected area of diamond films and evaluate their properties. The principles based on the difference of nucleation density and the growth rate on various substrate materials. However, the nucleation diamond synthesized by this method, which is important for the basic study and to understand the mechanisms of nucleation diamond, has never been published.

All of these procedures will be completed, followed by analyzing of the synthesized crystal. The analysis comprises of the growth rate, size and thickness of diamond films, and bond pattern of carbon in crystal using microscope and Raman spectroscopy.

### Experimental

The combustion activation technique was controlled under the following conditions: - the volumetric ratio of  $O_2/C_2H_2$  was 0.95 in the atmosphere, the temperature of Si substrate was 800 °C, the synthesized time was in between 5 and 30 min. The Si and  $SiO_2$  substrates were pretreated by the abrasion with diamond powder in ultrasonic.  $SiO_2$  and mirror-silicon were used to protect diamond films generation.

The suitable position of oxy-acetylene flame for the diamond films synthesis was examined. The unpolished and polished Si and  $SiO_2$  substrates were used to determine the conditions for the growth of diamond films. The temperature for substrate was 800 °C. The volumetric ratio of  $O_2/C_2H_2$  was 0.95 at the  $O_2$  and  $C_2H_2$  flow rates of 285 and 300 cc/min, respectively. The synthesis was varied for 5 and 30 min at 1 atm. Raman spectroscopy and microscope were used for analyzing the carbon bonding, the growth rate, and the grain sizes of the crystals.

### Results and Discussion

The results observed from microscope showed that the pretreatment substrate will increase the diamond nucleation density. The substrate pretreated by the abrasion with diamond powder in ultrasonic gives the growth rate higher than the unpolished one. Fig. 1 shows the micrographs of the diamond film surfaces on different substrates.

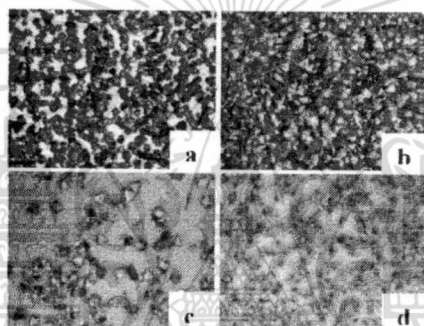


Figure 1. Micrographs of the dependence of the diamond films growth on different substrates: (a) unpolished Si, (b) polished Si, (c) unpolished  $SiO_2$ , and (d) polished  $SiO_2$ .

From the Raman shift at  $1333\text{ cm}^{-1}$ , it was observed that the volumetric ratio of  $O_2/C_2H_2$  providing the best composition to form high quality of diamond films is 0.95. The result observed from Raman spectroscopy showing the high quality of diamond films is  $1333\text{ cm}^{-1}$  (Fig. 2).

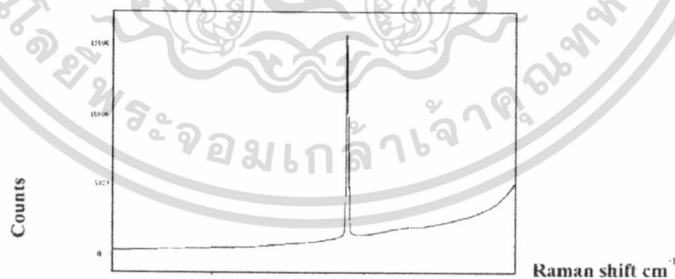


Figure 2. The analysis of diamond films by Raman spectroscopy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

At this point, the conclusion for the diamond films synthesis can be stated that: - the diamond crystals grow on the SiO<sub>2</sub> at synthesized times of 15 and 30 min, and the diamond films grow on the Si at synthesized times of 15 and 30 min. Moreover, the growth rate of diamond films is varied by the factor of gas ratio, the distance from inner flame to substrate, and the synthesized time.

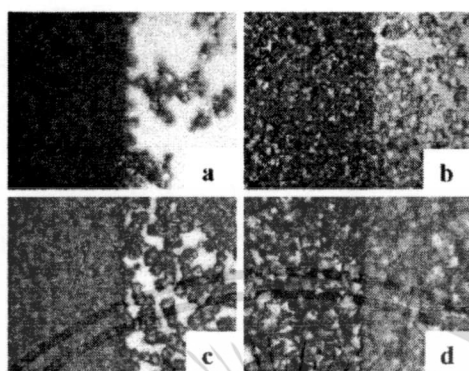


Figure 3. Micrographs of the diamond films at different masking and synthesis time: (a) mirror-polished Si at 15 min, (b) SiO<sub>2</sub> at 15 min, (c) mirror-polished Si at 30 min, and (d) SiO<sub>2</sub> at 30 min.

The nucleation density of unpolished and polished Si and SiO<sub>2</sub> substrates were shown in Table 2.

Table 1. Nucleation density on several substrate reliability.

| Type of substrate           | Nucleation density (cm <sup>-2</sup> ) |
|-----------------------------|----------------------------------------|
| Unpolished Si               | 10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>      |
| Polished Si                 | 10 <sup>8</sup> - 10 <sup>10</sup>     |
| Unpolished SiO <sub>2</sub> | 10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>      |
| Polished SiO <sub>2</sub>   | 10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>      |

From the results, we can conclude that the carbon diffusion rate in substrate affects to the nucleation density and the size of diamond crystals.

The mirror-polished silicon mask technique can protect diamond films growth. It is found that the diamond films grow on the selected area and a few diamond crystals grow on mirror-polished silicon mask. In this fabrication, the minimum of synthesized time is 15 min. The diamond crystal growth depends on the synthesized time of diamond films and the diamond crystal is difficult to remove. The SiO<sub>2</sub> mask technique can protect diamond films growth, and the diamond films grow in the selected area, but several diamond crystals grow on SiO<sub>2</sub>. In this technique can be synthesized in long time for the requirement thickness. Diamond crystal on SiO<sub>2</sub> was removed by SiO<sub>2</sub> etching procedure. Moreover, SiO<sub>2</sub> thickness is important for deposition procedure because SiO<sub>2</sub> was etched by combustion activation CVD about 200 Å/min at 800 °C, and the underside effective of SiO<sub>2</sub> etching made taper on the ending of selected area which made taper of ending of diamond.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

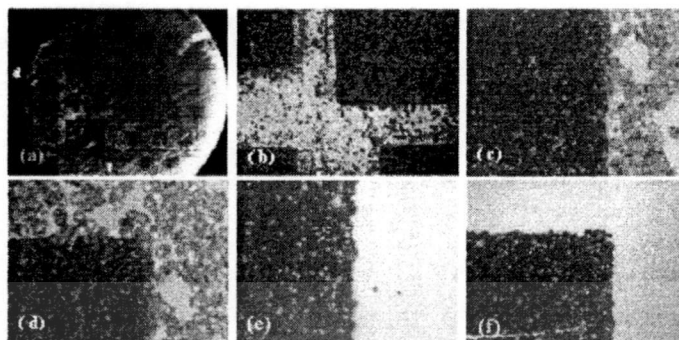


Figure 4. Micrographs of fabrication procedure of diamond films: (a) diamond deposition, (b) selected area of diamond films, (c) compare between the growth on selected area and on SiO<sub>2</sub> mask, (d) diamond films corner, and (e) - (f) diamond films after SiO<sub>2</sub> etching.

### Summary

From the results, we can conclude that the carbon diffusion rate in substrate affects to the nucleation density and the size of diamond crystals. While the high carbon diffusion rate in the substrate increases the nucleation density, but the mean size of crystals is relatively smaller. This is the nutrients available for crystals growth have to be shared with many crystals due to the high nucleation density. Furthermore, silicon-dioxide mask technique and polished silicon by diamond powder were used for nucleated diamond protection and generation, respectively, which can be applied for the pattern fabrication.

### Acknowledgment

Financial support from the National Research Council of Thailand (NRCT) is fully acknowledged.

### References

- [1] E. Wilks and J. Wilks: *Properties and Applications of Diamon* (British Library Cataloguing in Publication Data, Cambridge 1994).
- [2] R.F. Davis: *Diamond films and coatings: Development, Properties, and Applications* (Noyes Publication, USA-1992).
- [3] Y. Hirose, in: *Proceedings and Abstracts of the 1st Conference on the New Diamond Science and Technology*, Tokyo (1988), p. 38.
- [4] R.J. Graham and K.V. Ravi: *Appl. Phys. Lett.* Vol. 11, (1992), p. 1610.
- [5] K. Hirabayashi, S. Amanma and Y. Hirose: *Appl. Phys. Lett.* Vol. 5 (1992), p. 574.
- [6] K. Hirabayashi and Y. Hirose: *J. Cryst. Growth* (1994), p. 140.
- [7] K. Hirabayashi and Y. Hirose: *Diam. Relat. Mater.* Vol. 4 (1996), p. 48.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**The 7<sup>th</sup> International Conference on  
Materials Processing for Properties and  
Performance**

**MP<sup>3</sup>  
2008**

**05 November – 07 November 2008**

**Nanyang Executive Center**

**SINGAPORE**

**Organised and Sponsored By:**

**Institute of Materials (East Asia)**

**Co-Organised By:**

**Singapore Institute of Manufacturing  
Technology**

**Supported By:**

**Nanyang Technological University, Singapore**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$R = \frac{1}{\rho q \mu_p} \frac{L}{Za} \quad (2)$$

when  $R$  = Resistivity ( $\Omega$ )

$Z$  = Width of material ( $\mu\text{m}$ )

$L$  = Length of material ( $\mu\text{m}$ )

$\mu_p$  = Mobility of p-type (m/s)

From Eqs. (1) and Eqs. (2) then

$$a = 2eRV_{pt}\mu_p \frac{Z}{L} \quad (3)$$

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

When finish the synthesis, the electrical property of the diamond films for i-type semiconductor is higher than 4 M $\Omega$ , and then after using hydrogen termination its value is decreased, which is dependent upon the operation temperature and the operation time. The resistance of diamond films, at the operation temperature between 500 – 700 °C and the operation time between 5 – 20 min., has been shown in Table 1. The resistance is immediately dropped when the temperature and time are raised. In general, the silicon deteriorates at about 100 °C, therefore, the diamond films generated from this work has a potential to apply for high-thermal electronic devices, such as the compact-size IC devices without heat sink. Based on the Seebeck-effect analysis, this diamond films perform as the intrinsic-type semiconductor. The metal/p-type/i-type structure of device was measured by a high-voltage meter to determine the punch through voltage (as reported in Table 1). Moreover, the thickness of conduction layer has been calculated and illustrated in Fig. 2. The range of thickness of these films is between 84 – 160 nm.

### ACKNOWLEDGEMENTS

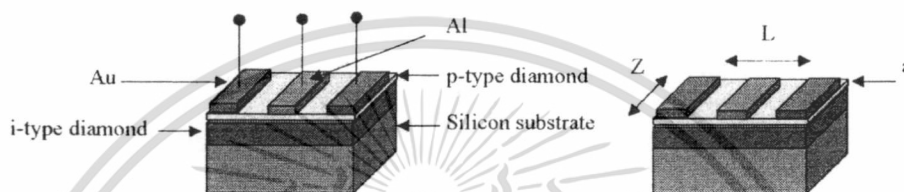
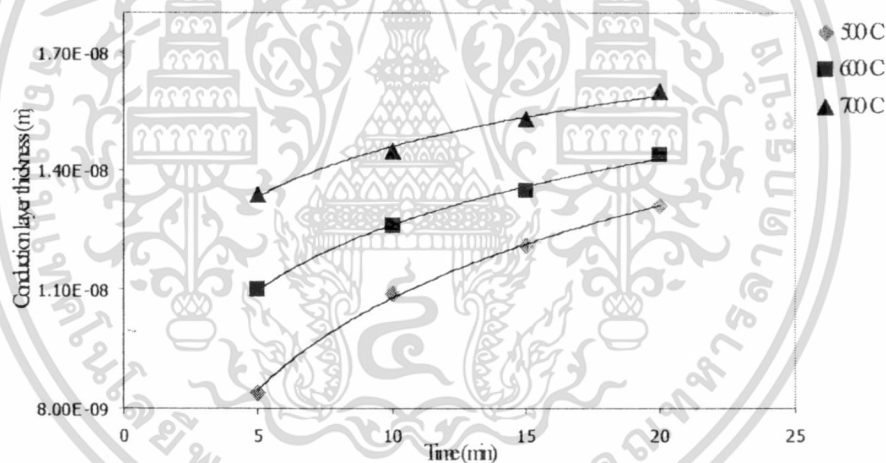
The Thailand Research Fund (TRF) and the National Research Council of Thailand (NRCT) are gratefully acknowledged.

### REFERENCES

1. S. Ri, T. Mizumasa, Y. Akiba, Y. Hirose, T. Kurosu, and M. Ikda, *J. Appl. Phys.* 34, 5550-5555 (1995).
2. L. L. Regel, and W. R Wilcox, *J. Mater. Res. Lett.* 18, 427-430 (1999).
3. C. F. M. Borges, S. Schelz, L. Martinu, and M. Moisan, *Proceedings of the International Symposium on Diamond Materials*. The Electrochemical Society 136-141 (1995).
4. R. F. Davis, *Diamond films and coatings: Development, Properties, and Applications*. (Noyes Publication, USA, 1992).
5. D. R. Kania, *Diamond Electronic Properties and Applications*. (Kluwer Academic publishers, London, 1995).

**Table 1. Resistance and punch through voltage at the operation temperature and time.**

| Time (min.) | Resistance ( $\Omega$ ) |                    |                    | $V_{pt}$ (V) |        |        |
|-------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------|--------|
|             | 500 °C                  | 600 °C             | 700 °C             | 500 °C       | 600 °C | 700 °C |
| 5           | $2.65 \times 10^6$      | $1.82 \times 10^6$ | $1.29 \times 10^6$ | 0.56         | 1.06   | 1.83   |
| 10          | $1.79 \times 10^6$      | $1.26 \times 10^6$ | $8.46 \times 10^5$ | 1.07         | 1.76   | 3.01   |
| 15          | $1.38 \times 10^6$      | $8.34 \times 10^5$ | $4.46 \times 10^5$ | 1.54         | 2.84   | 6.01   |
| 20          | $1.09 \times 10^6$      | $5.33 \times 10^5$ | $1.41 \times 10^5$ | 2.11         | 4.74   | 19.90  |

**Fig. 1 The diamond film structure.****Fig. 2 Relation between the conduction layer thickness and the operation time.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้