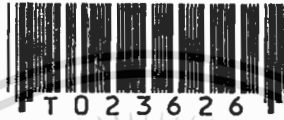


การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชร
SYNTHESIS OF DIAMOND SEMICONDUCTOR



นาย นริศ จันทร์แดง
MR. NARIS CHANDANG

วิทยานิพนธ์
ห้ามนำออกนอกห้องสมุด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2538

ISBN 974-621-331-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

SYNTHESIS OF DIAMOND SEMICONDUCTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL

KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1995

ISBN 974-621-331-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชร |
| นักศึกษา | นายนริศ จันทร์แดง |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | ผศ. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง |
| ระดับการศึกษา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า |
| ภาควิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง |
| พ.ศ. | 2538 |

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมในปัจจุบัน สารกึ่งตัวนำหลักที่ใช้เป็นซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่มีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม (Eg) 1.12 eV และ 1.43 eV ตามลำดับ จากการที่มีช่องว่างแถบพลังงานแคบ สารกึ่งตัวนำดังกล่าวจึงไม่เหมาะที่นำมาสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานภายใต้อุณหภูมิสูง พิจารณากรณีของเพชรที่มีช่องว่างแถบพลังงาน 5.5 eV ซึ่งมีค่ากว้างมาก การที่เพชรแตกตัวให้พาหะทั้งโฮลและอิเล็กตรอนต้องใช้พลังงานสูง ดังนั้นเพชรจึงเป็นสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ๆ เพราะทำให้สามารถควบคุมปริมาณพาหะได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ค่าความคล่องตัวของพาหะ, แรงดันพังทลาย และความนำความร้อน ยังมีค่าสูง จึงสามารถนำข้อดีของเพชรไปประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้นำเสนอ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน จากอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเอง ทำการสังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศ แหล่งจ่ายเป็นไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ในก๊าซไฮโดรเจน ไล่หลอดทั้งสแตนเป็นตัวให้ความร้อนทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอน-ไฮโดรเจน ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม โดยการควบคุมปริมาณของแหล่งจ่าย และอุณหภูมิฐานรองให้มีค่าเหมาะสม ศึกษาลักษณะฟิล์มจากภาพถ่าย SEM สำหรับลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์ม ศึกษาจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และRaman Spectroscopy ตามลำดับ ทำการเจืออะตอมสารเจือโบรอน โดยใช้ความเข้มข้นของโบรอนไตรออกไซด์ต่าง ๆ กัน เนื่องจากการจะนำฟิล์มไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม จึงทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม โดยศึกษาชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์ม, สภาพต้านทานไฟฟ้า, ค่าความนำไฟฟ้า, ค่าความหนาแน่นของพาหะ, ค่าความคล่องตัวของพาหะ และค่าพลังงานกระตุ้น ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่าง ๆ ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชร ศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อ p-i ท้ายสุดเป็นการนำฟิล์มไปประยุกต์ใช้งาน โดยสร้างเป็น ซอตต์กีไดโอด ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง

| | |
|----------------|---|
| Thesis Title | Synthesis of Diamond Semiconductor |
| Student | Mr. Naris Chandang |
| Thesis Advisor | Asst.Prof. Wisut Titiroongruang |
| Level of Study | Master ' s in Electrical Engineering |
| Department | Electrical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang |
| YEAR | 1995 |

ABSTRACT

Conventionally known semiconductors such as Si and GaAs have a band gap of 1.12 eV and 1.43 eV, respectively. In electronic devices, they are not suitable for high temperature condition because of their relatively narrow band gap. Diamond has 5.5 eV band gap which is so wide that this material can potentially be used in high temperature condition. Furthermore, it has high mobility, high breakdown voltage and high thermal conductivity. So, it can be used widely in engineering application.

In this thesis, the synthesis of diamond films using thermal filament CVD method is reported. The mixture of ethyl alcohol and hydrogen is used as the source in atmospheric pressure. This hydrocarbon-hydrogen mixture is dissociated by the thermal generated from tungsten filament. To determine the optimum condition of diamond film growth, the controlling of source concentration and substrate temperature is studied. The surface morphology of the films is studied through scanning electron microscopy(SEM). The structures and properties of the films are characterized by X-ray diffraction and Raman spectroscopy, respectively. Boron doped diamond films are fabricated at various boron trioxide concentration. Basic electrical properties of the films such as semiconductor type, resistivity, conductivity, carrier concentration, carrier mobility and activation energy are measured. In addition, the electrical properties of metal-diamond film contact and p-i junction are studied. Finally, high operating temperature Schottky diodes are fabricated and their properties are reported.

กิตติกรรมประกาศ

การที่ผู้วิจัยสามารถทำการวิจัยและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเป็นรูปเล่มสมบูรณ์นั้น ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ผู้ให้คำปรึกษา วางแนวทาง ตลอดจนชี้แนะให้งานวิจัยนี้บรรลุเป้าหมาย ขอขอบคุณ อาจารย์เติมพงษ์ เพ็ชรกุล ผู้ให้คำแนะนำวิธีการประกอบระบบ CVD แบบความร้อน และแนะนำเทคนิคการสร้างฟิล์มเพชร ขอขอบคุณ รศ. ดร. สมเกียรติ สุขเกษ ผู้ให้คำปรึกษาแนะนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ขอขอบคุณ ผศ. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล ผู้ให้คำแนะนำและสนับสนุนทางด้านเครื่องมือวัด ขอขอบคุณ อาจารย์จิรวัดณ์ ปานกลาง และ อาจารย์สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำแนะนำการสร้างแหล่งจ่ายไฟแบบสวิชชิง ขอขอบคุณ Prof. Masamori Iida, Prof. Teteki Kurosu, Prof. Yoichi Hirose, Mr.Hedeki Kimura และ Mr.Yukio Akiba จาก Tokai University ที่ให้คำแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่าง ๆ ด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณ คุณอัจฉรา แสงอรียวนิช จากกองฟิสิกส์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ขอขอบคุณมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสารที่ให้เงินสนับสนุนการทำวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้ให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด

นายนิธิต จันทร์แดง

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญภาพ..... | VIII |
| สัญลักษณ์..... | XI |
| ศัพท์เทคนิค..... | XIII |
| คำนำ..... | XV |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมา..... | 1 |
| 1.2 วิธีการ CVD แบบต่าง ๆ..... | 3 |
| 1.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น..... | 8 |
| 1.4 การประยุกต์ใช้งาน..... | 9 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎี..... | 11 |
| 2.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเพชร..... | 11 |
| 2.2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชร..... | 12 |
| 2.3 หลักการ CVD แบบความร้อน..... | 14 |
| 2.4 กลไกทางเคมีของฟิล์มเพชรจากวิธีการ CVD | 18 |
| 2.4.1 กระบวนการนิวคลีเอชัน..... | 20 |
| 2.4.2 การสร้างชั้นอีพิแทกเซียลฟิล์ม..... | 24 |
| 2.4.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร..... | 26 |
| 2.4.4 คุณลักษณะแวกคูลอมของก๊าซที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม..... | 26 |
| 2.4.5 แบบจำลองของก๊าซที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม..... | 27 |
| 2.4.6 แบบจำลองการปลูกฟิล์มเพชร..... | 29 |
| 2.5 การเติมอะตอมสารเจือ..... | 30 |
| 2.6 รอยต่อ..... | 33 |
| 2.6.1 รอยต่อโอห์มมิก..... | 33 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.6.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ..... | 34 |
| 2.7 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชร..... | 38 |
| 2.7.1 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก..... | 38 |
| 2.7.2 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 40 |
| 2.8 ขอตต์กีไดโอด..... | 45 |
| บทที่ 3 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร..... | 49 |
| 3.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM..... | 49 |
| 3.2 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... | 52 |
| 3.3 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy..... | 55 |
| 3.4 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์..... | 58 |
| บทที่ 4 กระบวนการสร้าง..... | 65 |
| 4.1 กระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง..... | 65 |
| 4.1.1 การขัดด้วยครีมเพชร..... | 65 |
| 4.1.2 การชุบด้วยสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ผสมผงเพชร..... | 67 |
| 4.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก..... | 67 |
| 4.3 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 69 |
| 4.3.1 การคำนวณหาปริมาณโบรอนไดรอกไซด์ที่ค่า B/C ต่าง ๆ..... | 70 |
| 4.3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายของโบรอนไดรอกไซด์..... | 73 |
| 4.3.3 การสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 74 |
| 4.4 กระบวนการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรด้วยวิธี lift-off..... | 74 |
| 4.5 กระบวนการสร้างฟิล์มชนิดรอยต่อ p-i (p-i junction)..... | 76 |
| 4.6 กระบวนการสร้างขอตต์กีไดโอด (Schottky diode)..... | 77 |
| บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง..... | 78 |
| 5.1 การศึกษาฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก..... | 78 |
| 5.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะพื้นผิว..... | 78 |
| 5.1.2 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... | 81 |
| 5.1.3 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วย Raman Spectroscopy..... | 84 |
| 5.1.4 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม..... | 85 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | หน้า |
|--|---------|
| 5.2 การศึกษาฟิล์มเพชรชนิดพี (p-type)..... | 86 |
| 5.2.1 ลักษณะพื้นผิวที่ค่า B/C ต่าง ๆ..... | 87 |
| 5.2.2 การวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มโดยอาศัยหลักการซีเบก | 87 |
| 5.2.3 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..... | 88 |
| 5.2.4 การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า..... | 90 |
| 5.2.5 การหาค่าพลังงานกระตุ้น..... | 94 |
| 5.2.6 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์..... | 97 |
| 5.3 การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชร..... | 100 |
| 5.4 การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อ p-i..... | 105 |
| 5.5 การศึกษาคุณสมบัติของขอต็ค์โคโดค..... | 108 |
| 5.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า..... | 109 |
| 5.5.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออุปกรณ์..... | 111 |
| บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์..... | 113 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 116 |
| ภาคผนวก ก ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับวัสดุชนิดอื่น ๆ..... | 118 |
| ภาคผนวก ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะกับเลขอะตอม | 121 |
| ภาคผนวก ค แสดงระบบ CVD แบบความร้อนและอุปกรณ์ต่าง ๆ..... | 122 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 126 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 1-1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนต์..... | 9 |
| ตารางที่ 3-1 แสดงความเข้มสัมพัทธ์ของยอดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จาก ระนาบผลึกของฟิล์มเพชร..... | 55 |
| ตารางที่ 3-2 แสดงค่า interplanar spacing มาตรฐานของเพชร(ASTM 6-675)..... | 55 |
| ตารางที่ 4-1 แสดงน้ำหนักอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ..... | 70 |
| ตารางที่ 4-2 แสดงน้ำหนักโบรอนไดรอกไซด์ที่ค่า B/C ต่าง ๆ ที่เตรียมจำนวน 50 cm ³ | 73 |
| ตารางที่ 5-1 แสดงการเปรียบเทียบค่า interplanar spacing ของฟิล์มเพชรชนิด อินทรีนซิกกับค่ามาตรฐาน(ASTM 6-675)..... | 83 |
| ตารางที่ 5-2 แสดงเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม..... | 85 |
| ตารางที่ 5-3 แสดงการเปรียบเทียบค่า interplanar spacing ของฟิล์มเพชรชนิดพี กับค่ามาตรฐาน(ASTM 6-675)..... | 88 |
| ตารางที่ 5-4 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่าอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ... | 92 |
| ตารางที่ 5-5 แสดงข้อมูลของกระแสที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... | 95 |
| ตารางที่ 5-6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นที่อัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ..... | 96 |
| ตารางที่ 5-7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของฟิล์มเพชรที่ค่าอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ | 99 |

สารบัญญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1-1 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์ HFCVD..... | 3 |
| รูปที่ 1-2 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์ microwave plasma CVD..... | 4 |
| รูปที่ 1-3 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์ RF plasma CVD..... | 6 |
| รูปที่ 1-4 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์ dc plasma CVD..... | 7 |
| รูปที่ 1-5 แสดงกระบวนการเคลือบ TAB-tool ด้วยฟิล์มเพชร..... | 10 |
| รูปที่ 1-6 แสดงลักษณะและการใช้งาน TAB..... | 10 |
| รูปที่ 2-1 (ก) แสดงตำแหน่งอะตอมใน cubic cell..... | 11 |
| (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกเพชรแบบ faced-centered cubic | |
| รูปที่ 2-2 แสดงการกำหนดระนาบของโครงสร้างผลึกแบบ cubic..... | 12 |
| รูปที่ 2-3 แสดงแผนภาพไดอะแกรมของระบบ CVD แบบความร้อน..... | 16 |
| รูปที่ 2-4 แสดงไดอะแกรมกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้น ในรีแอกเตอร์ CVD ของเพชร | 19 |
| รูปที่ 2-5 แสดงขั้นตอนการนิวเคลียชัน..... | 22 |
| รูปที่ 2-6 แสดงคุณลักษณะของโหม้ดการสร้างชั้นอีพิแทกเซียลทั้งสามชนิด..... | 24 |
| รูปที่ 2-7 แสดงคุณลักษณะของแบบจำลองของ CVD เพชร ซึ่งมีการเคลือบด้วยคาร์บอน | 28 |
| รูปที่ 2-8 (ก) แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของอะตอมสารเจือชนิดพี และ..... | 30 |
| (ข) แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมของสารเจือชนิดพีและอะตอมสารกึ่งตัวนำ | |
| รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี..... | 32 |
| รูปที่ 2-10 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของ โลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดพี | |
| กรณี $\phi_m < \phi_s$ | 35 |
| รูปที่ 2-11 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของ โลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดพี | |
| กรณี $\phi_m > \phi_s$ | 37 |
| รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิก | 40 |
| รูปที่ 2-13 แสดงแบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 41 |
| รูปที่ 2-14 แสดงแถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่แยกกันอยู่..... | 45 |
| รูปที่ 2-15 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานที่มีการเชื่อมต่อของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี | 46 |
| รูปที่ 3-1 แสดงรูปร่างลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเพชร..... | 51 |
| รูปที่ 3-2 แสดงแผนภาพลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร ในฟังก์ชันของความเข้มข้นของ | |
| มีเทนในก๊าซไฮโดรเจน และอุณหภูมิของฐานรอง..... | 52 |
| รูปที่ 3-3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก..... | 53 |
| รูปที่ 3-4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มเพชร..... | 54 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--|------------------|
| รูปที่ 3-5 แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD ที่เงื่อนไขต่าง ๆ.. | 57 |
| รูปที่ 3-6 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี..... | 59 |
| รูปที่ 3-7 แสดงการวัดค่าแรงดันด้วยวิธีการของ Van der Pauw..... | 63 |
| รูปที่ 4-1 แสดงครีมเพชรที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรอง..... | 65 |
| รูปที่ 4-2 แสดงพื้นผิวของแผ่นฐานรองซิลิกอนที่ขัดด้วยครีมเพชร..... | 66 |
| รูปที่ 4-3 แสดงลักษณะของผงเพชร และสารละลายผงเพชรในเอทิลแอลกอฮอล์..... | 66 |
| รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะพื้นผิวที่ได้จากการขูดสารละลายผงเพชร..... | 67 |
| รูปที่ 4-5 แผนภาพแสดงกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร..... | 68 |
| รูปที่ 4-6 แสดง Portable Radiation Thermometer..... | 69 |
| รูปที่ 4-7 แสดงลักษณะผลึกของโบรอนไดรอกไซด์..... | 70 |
| รูปที่ 4-8 แสดงการเตรียมสารละลายของโบรอนไดรอกไซด์..... | 74 |
| รูปที่ 4-9 แสดงกระจัดแบบในการสร้างซิลิโคน..... | 75 |
| รูปที่ 4-10 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่อ p-i..... | 76 |
| รูปที่ 5-1 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM ของระนาบ(111)..... | 79 |
| รูปที่ 5-2 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM ของระนาบ(100)..... | 79 |
| รูปที่ 5-3 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM ของผลึกขนาดใหญ่..... | 80 |
| รูปที่ 5-4 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM ของผลึกขนาดเล็ก..... | 80 |
| รูปที่ 5-5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ..... | 82 |
| (ก) ระนาบ(111) | (ข) ระนาบ(100) |
| (ค) ผลึกขนาดเล็ก | (ง) ผลึกขนาดใหญ่ |
| รูปที่ 5-6 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy..... | 84 |
| รูปที่ 5-7 แสดงภาพถ่ายฟิล์มจาก SEM ที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน 1000 ppm.... | 86 |
| รูปที่ 5-8 แสดงอุปกรณ์การหาชนิดพาหะในการนำกระแสของฟิล์มเพชร..... | 87 |
| รูปที่ 5-9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน ค่าต่าง ๆ..... | 89 |
| รูปที่ 5-10 แสดงหลักการของเทคนิคโพร์พอยท์โพรบ..... | 90 |
| รูปที่ 5-11 แสดงเครื่องมือวัดของเทคนิคโพร์พอยท์โพรบ..... | 91 |
| รูปที่ 5-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอัตราส่วนโบรอน ต่อคาร์บอน..... | 92 |
| รูปที่ 5-13 แสดงคุณลักษณะกระแสกับแรงดันของฟิล์มเพชรที่อัตราส่วนโบรอนต่อ คาร์บอนค่าต่าง ๆ..... | 93 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|-----|
| รูปที่ 5-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับส่วนกลับของอุณหภูมิที่ค่า อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ..... | 96 |
| รูปที่ 5-15 แสดงลักษณะชิ้นงานในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์..... | 97 |
| รูปที่ 5-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นพาหะที่ค่าอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ..... | 99 |
| รูปที่ 5-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อ คาร์บอนต่าง ๆ..... | 100 |
| รูปที่ 5-18 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน..... | 100 |
| รูปที่ 5-19 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร..... | 102 |
| รูปที่ 5-20 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชรชนิด อินทรีนซิก..... | 102 |
| รูปที่ 5-21 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 102 |
| รูปที่ 5-22 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร..... | 103 |
| รูปที่ 5-23 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิด อินทรีนซิก..... | 103 |
| รูปที่ 5-24 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 103 |
| รูปที่ 5-25 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชร..... | 104 |
| รูปที่ 5-26 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชรชนิด อินทรีนซิก..... | 104 |
| รูปที่ 5-27 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 104 |
| รูปที่ 5-28 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อ p-i..... | 106 |
| รูปที่ 5-29 (ก) แสดงไดอะแกรมโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและ..... ชนิดอินทรีนซิก | 107 |
| (ข) แสดงไดอะแกรมโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อ p-i | |
| รูปที่ 5-30 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันในทิศทางไบแอสไปหน้าของรอยต่อ อลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 109 |
| รูปที่ 5-31 แสดงการหาค่ากระแสอิ่มตัวโดยการประมาณ..... | 110 |
| รูปที่ 5-32 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันในทิศทางไบแอสไปหน้าที่อุณหภูมิ ต่าง ๆของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 111 |
| รูปที่ 5-33 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันในทิศทางไบแอสย้อนกลับที่อุณหภูมิ ต่าง ๆของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 111 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วย |
|-----------------|--|-----------------------------------|
| A | พื้นที่ | cm ² |
| A* | ค่าคงที่ของ Richardson | A/cm ² -K ² |
| B | สนามแม่เหล็ก | Wb/m ² |
| d | ระยะห่างระหว่างระนาบ | Å ^o |
| E _a | พลังงานกระตุ้น | eV |
| E _A | ระดับพลังงานสารเจือผู้รับ | eV |
| E _C | ขอบล่างของแถบความนำ | eV |
| E _{fm} | ระดับเฟอร์มิของโลหะ | eV |
| E _{fs} | ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ | eV |
| E _F | ระดับเฟอร์มิ | eV |
| E _g | ช่องว่างแถบพลังงาน | eV |
| E _v | ขอบบนของแถบวาเลนซ์ | eV |
| F _L | แรงลอเรนซ์ | N |
| h | ค่าคงที่ของพลังค์ | J-s |
| I | กระแส | A |
| I _s | กระแสอิ่มตัว | A |
| J _{ms} | ความหนาแน่นกระแสไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ | A/cm ² |
| J _{sm} | ความหนาแน่นกระแสไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ | A/cm ² |
| k | ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ | J/K |
| L | ความยาวของแท่งสารกึ่งตัวนำ | cm |
| m ₀ | มวลของอิเล็กตรอน | kg |
| m* | มวลยังผล | kg |
| n | ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ | cm ⁻³ |
| n _i | ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค | cm ⁻³ |
| N | ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ | cm ⁻³ |
| N _A | ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ A _{sh} -center | cm ⁻³ |
| N _{AO} | ความหนาแน่นของสถานะที่ขอบด้านบนของแถบวาเลนซ์ | cm ⁻³ |
| N _v | ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ | cm ⁻³ |
| p | ความหนาแน่นของโฮลอิสระ | cm ⁻³ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วย |
|------------------|---|-----------------------------|
| P_D | ความหนาแน่นของโฮลที่กระตุ้นจาก A_D -center | cm^{-3} |
| P_S | ความหนาแน่นของโฮลที่กระตุ้นจาก A_{SH} -center | cm^{-3} |
| q | ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน | C |
| R | ความต้านทาน | Ω |
| R_H | สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ | $\text{cm}^3/\text{A-s}$ |
| R_0 | ความต้านทานของรอยต่อด้านหลัง | Ω |
| R_{tot} | ความต้านทานรวม | Ω |
| s | ระยะห่างระหว่างหัวเข็ม | cm |
| t | ความหนาของสารกึ่งตัวนำ | cm |
| T | อุณหภูมิสัมบูรณ์ | K |
| v | ความเร็ว | cm/s |
| V | แรงดัน | V |
| V_B | กำแพงศักย์ที่รอยต่อขณะสมดุล | V |
| V_{bi} | แรงดันภายใน | V |
| V_F | แรงดันไบแอสไปหน้า | V |
| V_H | แรงดันฮอลล์ | V |
| V_R | แรงดันไบแอสย้อนกลับ | V |
| W | ความกว้างแท่งสารกึ่งตัวนำ | cm |
| ρ | สภาพต้านทานไฟฟ้า | $\Omega\text{-cm}$ |
| ϕ_{BP} | ความสูงกำแพงศักย์ขอตติ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี | V |
| ϕ_m | ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ | V |
| ϕ_s | ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ | V |
| χ_s | อิเล็กตรอน แอฟฟินิตี | V |
| μ_H | ค่าความคล่องตัวของฮอลล์ | $\text{cm}^2/\text{V-s}$ |
| μ_n | ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน | $\text{cm}^2/\text{V-s}$ |
| μ_p | ค่าความคล่องตัวของโฮล | $\text{cm}^2/\text{V-s}$ |
| σ | สภาพนำไฟฟ้า | $\Omega^{-1}\text{-m}^{-1}$ |
| σ_L | สภาพนำไฟฟ้าบริเวณอุณหภูมิต่ำ | $\Omega^{-1}\text{-m}^{-1}$ |
| θ | มุม | rad |
| λ | ความยาวคลื่น | Å° |
| ε | สนามไฟฟ้า | V/cm |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

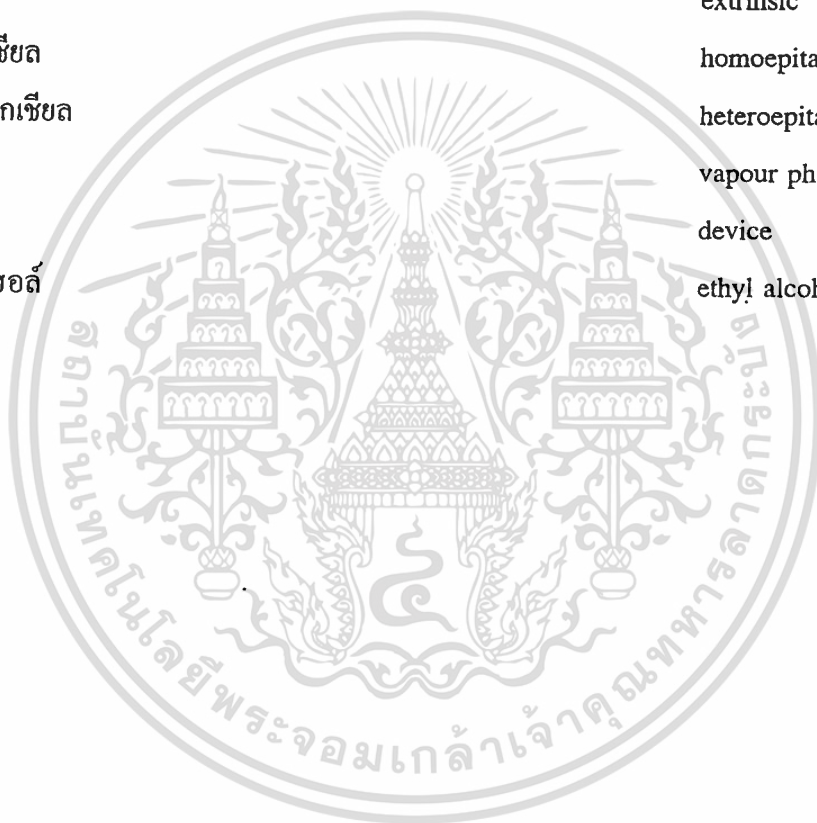
ศัพท์เทคนิค

| | |
|--------------------|-------------------|
| กราไฟท์ | graphite |
| การกระเจิง | scattering |
| การเลี้ยวเบน | diffraction |
| การโด๊ป | doping |
| การปลูกผลึก | growth |
| การเคลือบ | deposition |
| ก๊าซเฟส | gas phase |
| ความอิ่มตัวยิ่ง | supersaturation |
| ช่องว่างแถบพลังงาน | energy gap |
| ชนิดพี | p-type |
| ขอตัก์กัไดโอด | Schottky diode |
| ซินเตอร์ | sinter |
| ฐานรอง | substrate |
| แถบความนำ | conduction band |
| แถบวาเลนซ์ | valence band |
| นิวเคลียชัน | nucleation |
| โบรอนไตรออกไซด์ | boron trioxide |
| ปรากฏการณ์ซีเบก | Seebeck effect |
| ปรากฏการณ์ฮอลล์ | Hall effect |
| เพชร | diamond |
| พันธะ | bond |
| พาหะส่วนน้อย | minority carrier |
| พาหะส่วนมาก | majority carrier |
| พลังงานกระตุ้น | activation energy |
| ฟังก์ชันงาน | work function |
| ระดับเฟอร์มิ | Fermi level |
| รีแอกเตอร์ | reactor |
| แรงลอเรนซ์ | Lorentz force |
| รอยต่อโอห์มมิก | ohmic contact |
| เรกติไฟเออร์ | rectifier |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------------|------------------|
| แลททิซ | lattice |
| สวิตซิ่ง | switching |
| สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ | Hall coefficient |
| สารเจือผู้รับ | acceptor |
| สารเจือผู้ให้ | donor |
| สารกึ่งตัวนำ | semiconductor |
| อิเล็กตรอน | electron |
| อินทรินซิก | intrinsic |
| เอ็กทรินซิก | extrinsic |
| โฮโมอิพิแทกเซียล | homoepitaxial |
| เฮเทอโรอิพิแทกเซียล | heteroepitaxial |
| ไอเฟส | vapour phase |
| อุปกรณ์ | device |
| เอทิลแอลกอฮอล์ | ethyl alcohol |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

สำหรับเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมในปัจจุบัน สารกึ่งตัวนำหลักที่ใช้เป็นซิลิกอนและ แกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแคบ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง ๆ เพราะไม่สามารถควบคุมปริมาณพาหะได้ พิจารณาวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เพชรเป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากการที่เพชรมีความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานมาก (5.5 eV ที่อุณหภูมิห้อง) ทางด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้ว เพชรมีค่าสนามไฟฟ้าพังทลายสูง (10^7 V/cm) , ค่าความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอน และโฮลสูง (2000 และ 1800 cm^2/Vs ตามลำดับ), เสถียรภาพของอุณหภูมิพื้นผิวสูง (500-600 องศาเซลเซียส ในอากาศ และ 1400-1700 องศาเซลเซียสในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย) และมีค่าความนำความร้อนสูงมาก (20 W/cmK) เพชรจึงเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อน, กำลัง, และอุณหภูมิสูง นอกจากเพชรจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีแล้ว เพชรยังเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสามารถนำไปเคลือบใช้เป็นตัวขัดผิวต่าง ๆ การที่เพชรเป็นวัสดุที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีจึงเหมาะสำหรับนำไปเคลือบป้องกันปฏิกิริยาเคมีได้หลายชนิด จะเห็นว่าเพชรเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน

ตามธรรมชาติแล้วเพชรแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลัก ๆ คือ type I เป็นเพชรที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในทางอุตสาหกรรม สำหรับเพชรที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนต่ำเป็นเพชร type IIa นำมาทำเป็นเครื่องประดับต่าง ๆ ส่วนเพชรอีกชนิดหนึ่งเป็น type IIb ที่รู้จักกันในนาม "blue diamond" ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่ช่องว่างแถบพลังงานมีค่า 5.5 eV

จากคุณสมบัติที่ดีต่าง ๆ ของเพชร ทำให้เป็นที่สนใจต่อนักวิจัย ในการคิดค้นวิธีการสังเคราะห์เพชรขึ้น โดยในสมัยต้น ๆ การสังเคราะห์จะกระทำที่ความดันและอุณหภูมิสูง และเป็นวิธีการที่มีใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ด้วยวิธีการดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นฟิล์มเคลือบบนฐานรอง ต่อมาจึงได้มีนักวิจัยคิดค้นวิธีการในการสร้างฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำ เพื่อนำไปสู่การสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างเป็นเพชร วิธีการส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นวิธีการ CVD ซึ่งในปัจจุบันวิธีการ CVD นี้ มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่น ๆ อีก แต่ก็ไม่เป็นที่นิยม สำหรับการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชรชนิดที่นั้น ในสมัยต้น ๆ จะใช้ไดโบเรน (diborane) เป็นแหล่งจ่าย ซึ่งปกติแล้วไดโบเรนใช้เป็นแหล่งจ่ายในการเจืออะตอมสารเจือสำหรับซิลิกอน แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นผลจากไดโบเรนเป็นสารประกอบที่เป็นพิษต่อร่างกาย จึงมีการค้นหาสารที่นำมาเป็นแหล่งจ่ายชนิดใหม่ พบว่าโบรอนไตรออกไซด์เป็นสารประกอบอีกชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือ และไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ในกรณีของการสร้างสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอื่น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสามารถที่จะสร้างได้ แต่ไม่สามารถ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมความนำไฟฟ้าได้ โดยจากการทดลองสร้างหลายครั้ง มีเพียงบางครั้งที่มีการแสดง ความนำไฟฟ้าชนิดอื่น ดังนั้นจึงยังไม่มีรายงานวิธีการสร้างสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอื่น

สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การวิจัยได้เริ่มต้นเมื่อ ปี พ.ศ. 2535 โดยเริ่มจากการประกอบระบบ CVD แบบความร้อนขึ้นเอง และทำการสร้างฟิล์ม เพชรชนิดอินทรีนซิก จนกระทั่งประสบความสำเร็จในการสร้างในช่วงปลายปี พ.ศ. 2536 ทำ การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้ ต่อมาจึงเริ่มทำการเจืออะตอมสารเจือโบรอน เพื่อสร้างเป็น สารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพี และทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้า พร้อมทั้งการนำฟิล์มไปประยุกต์ ใช้งาน ในการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชร ด้วยวิธีการ CVD แบบ ความร้อน โดยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม การ สร้างฟิล์ม และการประยุกต์ใช้งาน รายละเอียดสามารถสรุปเป็นบท โดยกำหนดเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความจำเป็นมาของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จากเริ่มแรกจนถึง ปัจจุบัน วิธีการ CVD แบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร นอกจากนี้ได้แสดงการ เปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น พร้อมทั้งการนำเพชรไปประยุกต์ใช้งาน ทางด้านต่าง ๆ

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เริ่มจากการอธิบายถึงลักษณะโครงสร้างผลึก ของเพชร หลักการ CVD แบบความร้อน กลไกทางเคมีของฟิล์มเพชรจากวิธีการ CVD แบบ ความร้อน การเติมอะตอมสารเจือ การอธิบายถึงรอยต่อชนิดต่าง ๆ และ แบบจำลองแถบพลัง งานของฟิล์มเพชร พร้อมทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชอตต์กีไดโอด

บทที่ 3 เป็นบทที่กล่าวถึง วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยเริ่มจากการวิ เคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM การศึกษาคูสมบัติของฟิล์มด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ Raman spectroscopy รวมทั้งการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

บทที่ 4 เป็นการบวนการสร้าง โดยกล่าวถึงการเตรียมแผ่นฐานรอง กระบวนการสร้าง ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก และชนิดพี และกระบวนการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร พร้อมทั้งกระบวนการสร้างรอยต่อ p-i ท้ายสุดเป็นกระบวนการสร้างชอตต์กีไดโอด

บทที่ 5 เป็นการทดลองและผลการทดลอง ซึ่งเกี่ยวกับการศึกษาการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร ชนิดอินทรีนซิก และชนิดพี โดยฟิล์มเพชรชนิดพีจะรวมถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า การ ศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชร การศึกษาคูสมบัติของรอยต่อ p-i และชอตต์กี ไดโอด

เอกสารนี้ บทที่ 6 เป็นบทสรุป และวิจารณ์ผลการทดลองของข้อมูลที่ได้จากการทำวิจัย ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ก่อนที่จะมีการพัฒนามาสู่วิทยาศาสตร์สมัยใหม่ นักเคมีพบว่าสามารถที่จะเปลี่ยนหินให้เป็นทองได้ ในทำนองเดียวกันนักเคมีทราบว่า เพชรเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอน ดังนั้นจึงมีความสงสัยว่าสามารถที่จะเปลี่ยนถ่านไม้ให้เป็นเพชรได้หรือไม่ จากการค้นคว้าอย่างจริงจัง ในที่สุดก็พบว่าสามารถที่จะเปลี่ยนถ่านไม้ให้เป็นเพชรได้เช่นกัน

การเริ่มการสังเคราะห์เพชรนั้น ได้เกิดขึ้นทันทีที่ทราบว่า เพชรเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอนที่อยู่ในรูปความดันสูง การสังเคราะห์ในตอนต้น ๆ ยังไม่ได้มีการยืนยันผลที่ได้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1955 ได้มีการประกาศจาก General Electric Research Laboratories ที่มีการอธิบายรายละเอียดของกระบวนการสร้าง ซึ่งนักวิทยาศาสตร์สามารถที่จะเสนอแบบจำลองการสร้างได้ จนในที่สุดก็เป็นที่ยอมรับในหลักการนี้เหมือนกัน

1.1 ความเป็นมา

ในปีค.ศ. 1797 Smithson Tennant ได้แสดงให้เห็นว่าเพชรเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอนโดยเผาเพชรในออกซิเจน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และพบเถ้าถ่านเหลืออยู่ ตั้งแต่นั้นที่ทราบว่าเพชรมีความหนาแน่น 3.52 gm/cc สูงกว่ากราไฟท์ ซึ่งมีค่า 2.25 gm/cc เป็นเหตุผลที่สามารถเปลี่ยนคาร์บอนให้เป็นเพชรได้โดยใช้ความดัน ทำให้เกิดแรงกระตุ้นที่จะทำการสังเคราะห์เพชรขึ้นมา อย่างไรก็ตามการสร้างเพชรในตอนแรกไม่ได้ทำเพื่อการศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์ แต่ทำในแง่ของการนำไปเป็นเครื่องประดับ ซึ่งเป็นความหลงใหล โดยส่วนใหญ่เพชรที่สร้างได้จะไม่ใช้เพชรที่แท้จริง

หลังจากนั้นในปีค.ศ. 1955 ที่ General Electric Research Laboratories Bundy และเพื่อนร่วมงาน ได้ทำการสังเคราะห์เพชรเป็นผลสำเร็จ และได้มีการพัฒนาอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในความดันสูง และค้นพบกระบวนการ solvent-catalytic ที่สามารถเปลี่ยนคาร์บอนให้อยู่ในรูปของเพชรได้ การวิจัยได้มีการออกแบบการวิจัยเป็นหลายแนวทางด้วยกัน แบ่งได้เป็น 3 แนวทางหลัก ๆ คือ

I). HPHT การสังเคราะห์โดยใช้ molten transition metal solvent catalyst

II). HPHT direct conversion

III). shock wave direct conversion

วิธีการทั้งสามทำให้ได้เพชรที่มีความเสถียรเชิงพลวัตของความร้อน สำหรับกราไฟท์ซึ่งมีเฟสที่เสถียรที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ สามารถทำให้อยู่ในรูปของเพชรได้ โดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน และแรงอัดจนทำให้กราฟไฟต์เปลี่ยนรูปเป็นเพชร หลังจากเกิดการก่อตัวเป็นเพชรแล้ว เมื่ออุณหภูมิกลับสู่อุณหภูมิห้องหรือความดันบรรยากาศ พลังงานในการกระตุ้นให้กลับสู่กราฟไฟต์ จะมีค่าสูง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเพชรมีความเสถียรหรืออยู่ในสถานะสมดุลย์ทางความร้อน ดังนั้นที่ อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศเพชรจะยังคงสภาพอยู่ตลอดไป แต่โชคไม่ดีตรงกระบวนการ HPHT ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง

แม้ว่าการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะทำภายใต้เงื่อนไขความดันและอุณหภูมิสูง แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าผลึกของเพชรจะไม่สามารถสังเคราะห์ได้ที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ ในปีค.ศ. 1911 ได้มีการแสดงให้เห็นว่า สามารถสังเคราะห์เพชรได้ภายใต้เงื่อนไขที่คาร์บอนอยู่ในสถานะเสถียร อาจเป็นไปได้ที่ผลึกของเพชรอาจไม่เสถียรที่ความดัน และบรรยากาศค่าหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ กราไฟต์ ยกตัวอย่าง เช่น ที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ และอุณหภูมิต่ำกว่า 1373 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลจากความสมดุลย์ทางความร้อน, พลังงานศักย์และปฏิกิริยาเคมี กล่าวได้ว่ากราฟไฟต์มีความเสถียรมากกว่าเพชร โดยมีพลังงานอิสระแตกต่างกันเพียง 0.692 kcal/mol ที่ความดันปกติ การกระตุ้นเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเพชรไปสู่กราฟไฟต์ บนพื้นผิวของเพชรที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส อะตอมคาร์บอนจะมีความคล่องตัวสูง และขณะที่มีการก่อตัวเป็นเพชรอะตอมของไฮโดรเจนจะมีความเสถียรมากกว่าการก่อตัวเป็นกราฟไฟต์

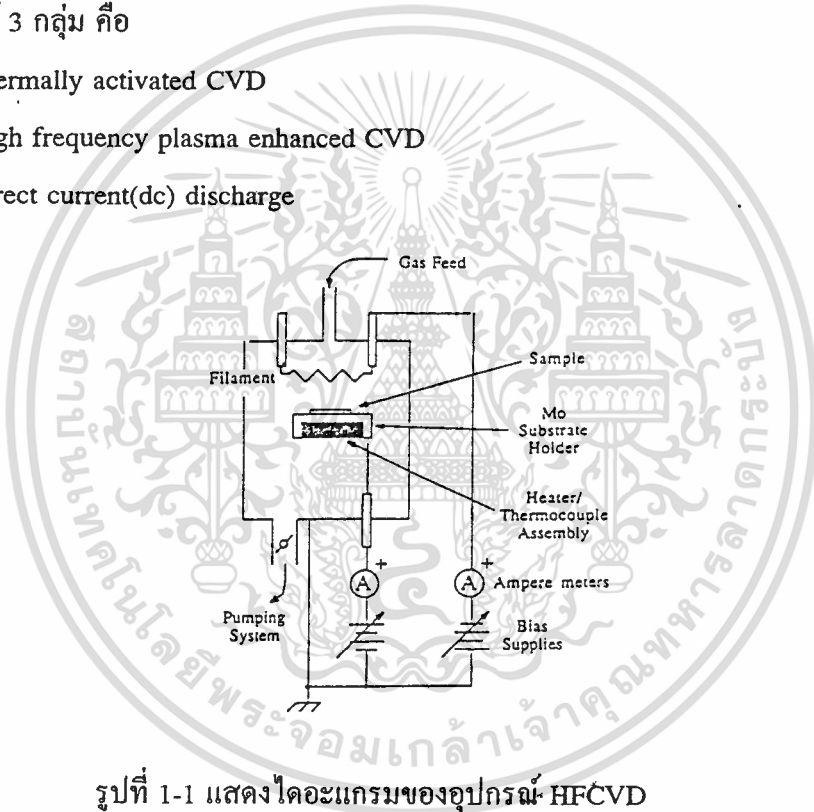
การสร้างเพชรที่มีความสมดุลย์ทางความร้อน จะใช้วิธีการสังเคราะห์จากสถานะก๊าซ ซึ่งเป็นก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามอะตอมของไฮโดรเจนก็มีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์เพชร เพราะเป็นตัวแยกกราฟไฟต์ออกไป แต่ไม่แยกเพชรออก ดังนั้น อะตอมของไฮโดรเจนมีความสำคัญมากต่อการสร้างเพชรที่ความดันต่ำ

การสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ กระทำอย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1970 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวโซเวียต และได้แสดงให้เห็นเทคนิคในการเพิ่มอัตราการก่อตัวของเพชร ขณะที่มีการลดจำนวนกราฟไฟต์ลง โดย NIRIM(National Institute for Research in Inorganic Materials) ในปี ค.ศ. 1980 ที่ประเทศญี่ปุ่น เป็นผลให้มีการค้นพบเทคนิคใหม่ ๆ ในการกระตุ้นก๊าซ และการเคลือบเพชร ในปี ค.ศ. 1977 Derjaguin และ Fedoseev ได้ให้ข้อเสนอ 3 อย่างในการทำให้ความเข้มข้นของอะตอมไฮโดรเจนมีมากกว่ากรณีที่ใช้ความร้อนในการแตกตัวก๊าซไฮโดรคาร์บอน-ไฮโดรเจน คือ การใช้ catalytic, electric discharge และ heat tungsten filament ผลที่ได้ยังไม่ได้มีการนำเสนอจนกระทั่งปี ค.ศ. 1981 และมีการเสนอรายละเอียดเพิ่มเติมในปี ค.ศ. 1984 หลังจากนั้นก็มีเทคนิคหลายอย่างในการสร้างเพชรที่ความดันต่ำ ยกตัวอย่าง เช่น Radio frequency CVD, Microwave plasma enhanced CVD(MPECVD) และ Hot filament CVD(HFCVD) เป็นต้น โดยเทคนิคทั้งหมดอยู่บนพื้นฐานการทำให้อะตอมไฮโดรเจนแตกตัวบริเวณพื้นผิวที่สร้าง ซึ่งอัตราการก่อตัวมีตั้งแต่ 1 ถึง 10 ไมครอน/ชั่วโมง บนฐานรองหลายชนิด เช่น Si, SiC, WC, Ta, W, Mo และ Al_2O_3 เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วิธีการ CVD แบบต่าง ๆ

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำมีอยู่หลายวิธี วิธีที่เป็นที่นิยมในการนำมาสังเคราะห์ฟิล์ม คือ วิธี CVD(chemical vapour deposition) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในเทอมของ ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์, อัตราการเคลือบฟิล์ม, พื้นที่ที่เกิดฟิล์ม, ชนิดของแหล่งจ่ายก๊าซ และช่วงอุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม วิธีการทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม ลักษณะรูปร่างของฟิล์ม และคุณลักษณะสเปกตรัมของ Raman จะมีลักษณะคล้ายกัน นอกจากนี้วิธีการสังเคราะห์ฟิล์มแต่ละวิธีสามารถสร้างเพชรได้หลายลักษณะ โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการสร้าง สำหรับวิธีการ CVD สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือ

- I). thermally activated CVD
- II). high frequency plasma enhanced CVD
- III). direct current(dc) discharge



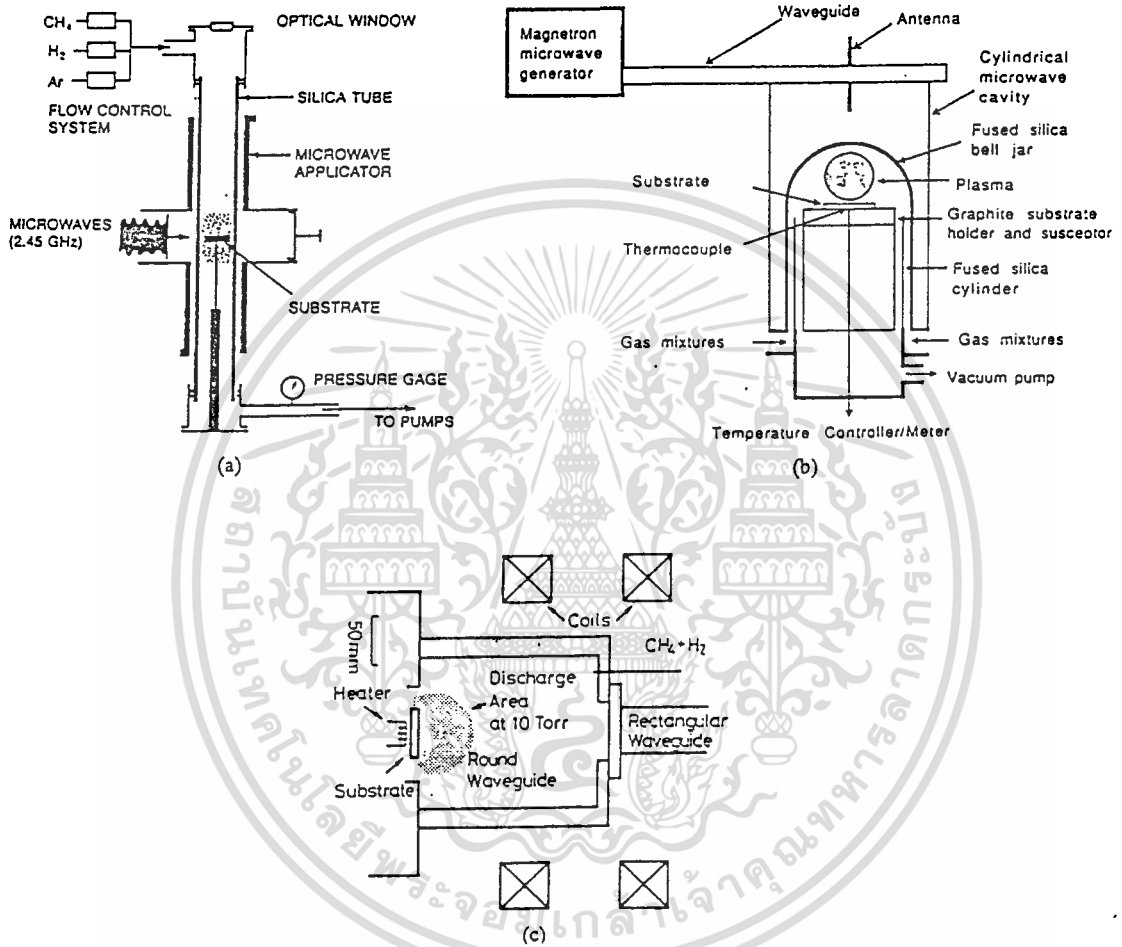
รูปที่ 1-1 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์ HFCVD

I. thermally activated CVD

HFCVD เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการสร้างเพชร สามารถแสดงไดอะแกรมของเครื่องมือได้ดังรูปที่ 1-1 จากรูปขดลวดทั้งสแตน(หรือ แทนทาลัม(tantalum), โมลิบดีนัม(molybdenum), เรเนียม(rhenium)) ซึ่งเป็นไส้หลอด ถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 2000 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้ไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนที่ผสมกันอยู่แยกออกจากกัน โดยความเข้มข้นของมีเทน(methane) เป็น 0.1%-2.0% ในไฮโดรเจนที่ความดัน 50-100 ทอร์ ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองมีค่าประมาณ 1 เซนติเมตร และไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรอง แต่ฐานรองมีอุณหภูมิระหว่าง 800-1000 องศาเซลเซียส ผลจากการกระตุ้นด้วยความร้อนทำให้เกิดการชนกันของ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอน เกิดการแพร่และปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณผิว บริเวณฐานรองสามารถไบแอสกระแสสลับวง ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวของก๊าซบริเวณนี้มากขึ้น ทำให้อัตราการก่อตัวเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มขึ้นกับเวลาที่ใช้ วิธี HFCVD เป็นวิธีที่ง่าย, ไม่แพง และสามารถสร้างฟิล์มให้มีพื้นที่ครอบคลุมฐานรองขนาดใหญ่ได้ แต่จะมีปัญหาเรื่องไส้หลอดที่เปราะและผิครูปไป จากการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นผลจากการก่อตัวของคาร์ไบด์ขึ้นบนไส้หลอด



รูปที่ 1-2 แสดงไดอะแกรมของ microwave plasma CVD ชนิด

- (a) tubular microwave plasma CVD
- (b) a bell jar microwave plasma CVD
- (c) a magneto-microwave plasma CVD

II. High frequency plasma enhanced CVD

วิธีการ CVD ในลักษณะนี้จะใช้ microwave plasma ขนาด 2.45 GHz ในการเคลือบเพชร เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมาก รูปที่ 1-2 (a) เป็นลักษณะของ MPECVD rectangular waveguide

ใช้สำหรับจำกัดขอบเขตของไมโครเวฟระหว่าง generator และ reaction chamber โดย reaction

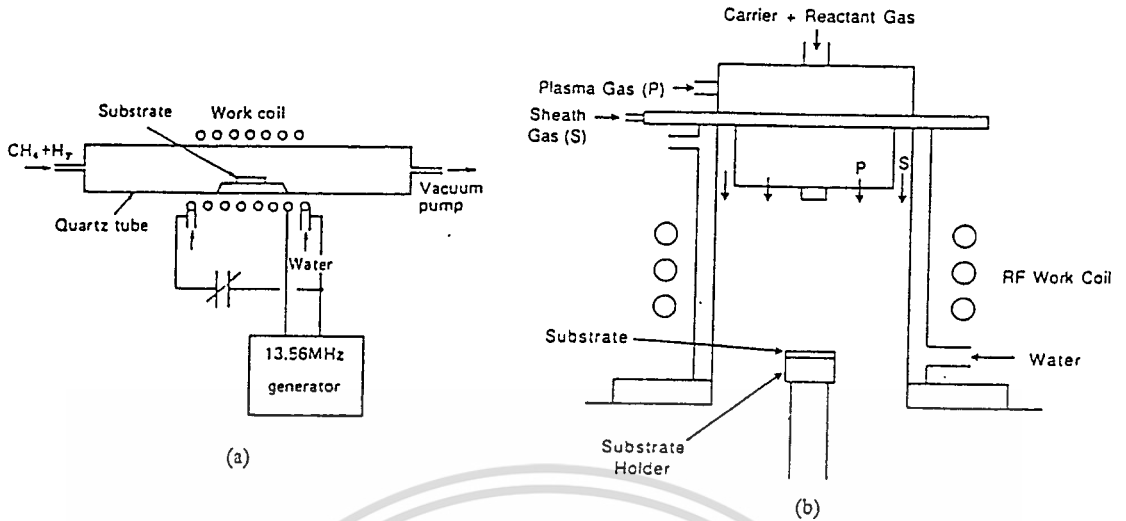
chamber เป็นท่อควอเตอร์ วางตรงกลางของทิศทางไมโครเวฟที่จะผ่านไปยัง applicator ใน rectangular waveguide three stub tuners และ power monitor จะใช้ร่วมกันใน waveguide เพื่อจำกัดพลังงานที่สะท้อนจาก applicator ให้มีค่าน้อยสุด plasma ของไฮโดรคาร์บอน-ไฮโดรเจน ผสมกันอยู่ในช่วงของ microwave ซึ่งเพชรจะถูกเคลือบลงบนฐานรองที่เป็นขั้วไฟฟ้าลอยอยู่ ภายใต้อุณหภูมิเดียวกับ HFCVD คือที่ความดัน 40-100 ทอร์ อุณหภูมิฐานรอง 800-1000 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของมีเทน 0.2-5 % ในบรรยากาศของไฮโดรเจน อัตราการเคลือบประมาณ 1-5 ไมครอน/ชั่วโมง ฐานรองถูกให้ความร้อนโดย plasma และการแผ่รังสี

ต่อมาได้มีการพัฒนาเทคนิคดังกล่าว โดยนำ rectangular waveguide ไว้อย่างสมมาตรในทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 1-2 (b) การจัดวางในลักษณะนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีในรูปที่ 1-2 (a) ยกตัวอย่าง เช่น การที่ไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรองจึงทำให้สะดวก ได้พื้นที่ใหญ่กว่า และการเคลือบจะราบเรียบสม่ำเสมอ และมีความสมดุลของ plasma เนื่องจากไม่มีปฏิกิริยากับผนัง ทำให้ระบบนี้เป็นที่นิยมทั้งในการสร้างพื้นฐาน และการประยุกต์ใช้งาน CVD ในการสร้างฟิล์มเพชร

Kawarada ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ขึ้นดังรูปที่ 1-2 (c) ซึ่งเป็น magneto-microwave plasma โดย Helmholtz-type coil จะวางอยู่รอบ cylindrical waveguide และใช้การกระจายของสนามแม่เหล็กในการควบคุมพื้นที่ของการเคลือบฟิล์ม โดยทำการจ่ายสนามแม่เหล็กขนาด ~875 G ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อเงื่อนไข ECR (electron cyclotron resonance) ความถี่ของ electron gyration มีค่าเท่ากับไมโครเวฟขนาด 2.45 GHz ข้อได้เปรียบของ ECR คือได้ผลึกมีขนาดใหญ่กว่า และมีความสม่ำเสมอ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ plasma กับพื้นที่การเคลือบจะสูง และใช้อุณหภูมิในการสร้างต่ำ จากรายงานของ Wei กล่าวว่า เทคนิคนี้ใช้อุณหภูมิในการสร้าง 500 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.1 ทอร์ MPECVD เป็นเทคนิคที่ให้อัตราการเกิดฟิล์มคงที่และสม่ำเสมอ นอกจากนี้ฟิล์มยังมีความบริสุทธิ์ และมีคุณภาพดี

สำหรับระบบ RF plasma (รูปที่ 1-3(a)) เป็นวิธีที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเช่นกัน ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะได้ขนาดผลึกที่ไม่ใหญ่เท่าวิธี microwave plasma ก็ตาม แต่ระบบทั้งสองใช้ความถี่อยู่ในช่วง 100 Hz และ 13.5 MHz โดยเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มเหมือนกับของ microwave plasma มีอัตราการเกิด 0.5-3.0 ไมครอน/ชั่วโมง Matsumoto ได้ทำการพัฒนาเทคนิคในการใช้กำลังสูง เพื่อทำให้เกิด RF plasma ที่ความดันบรรยากาศ (รูปที่ 1-3(b)) วิธีการดังกล่าวนี้ RF ที่ให้ความร้อนได้จาก thermal plasma ของไฮโดรเจน, อาร์กอน และก๊าซผสมของมีเทน ด้วยการคายความร้อน และกำลังมีค่า 60 Kw ที่ความถี่ 4 MHz ฐานรองวางไว้บนตัวจับที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำ อุณหภูมิฐานรองอยู่ระหว่าง 700 และ 1200 องศาเซลเซียส ของ plasma มีค่ามากกว่า 4000 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของมีเทน 10% (มีค่ามากกว่าวิธีอื่น ๆ) เทคนิคนี้มีอัตราการเกิดสูง เช่น ฐานรองโมลิบดีนัม (Mo) มีอัตราการเกิด 60-180 ไมครอน/ชั่วโมง

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1-3 แสดงโคเอแกรมของอุปกรณ์ RF plasma CVD ชนิด

(a) an inductive RF plasma CVD

(b) a RF thermal plasma CVD

ความร้อนของ RF plasma ต้องมีกำลังสูง ความหนาแน่นบรรยากาศของ RF plasma มีน้อยกว่า microwave plasma โดยทั่วไปอัตราการเกิด, ความเรียบของพื้นผิว และโครงสร้างของฟิล์มเพชรดีกว่าวิธี HFCVD หรือ MPECVD

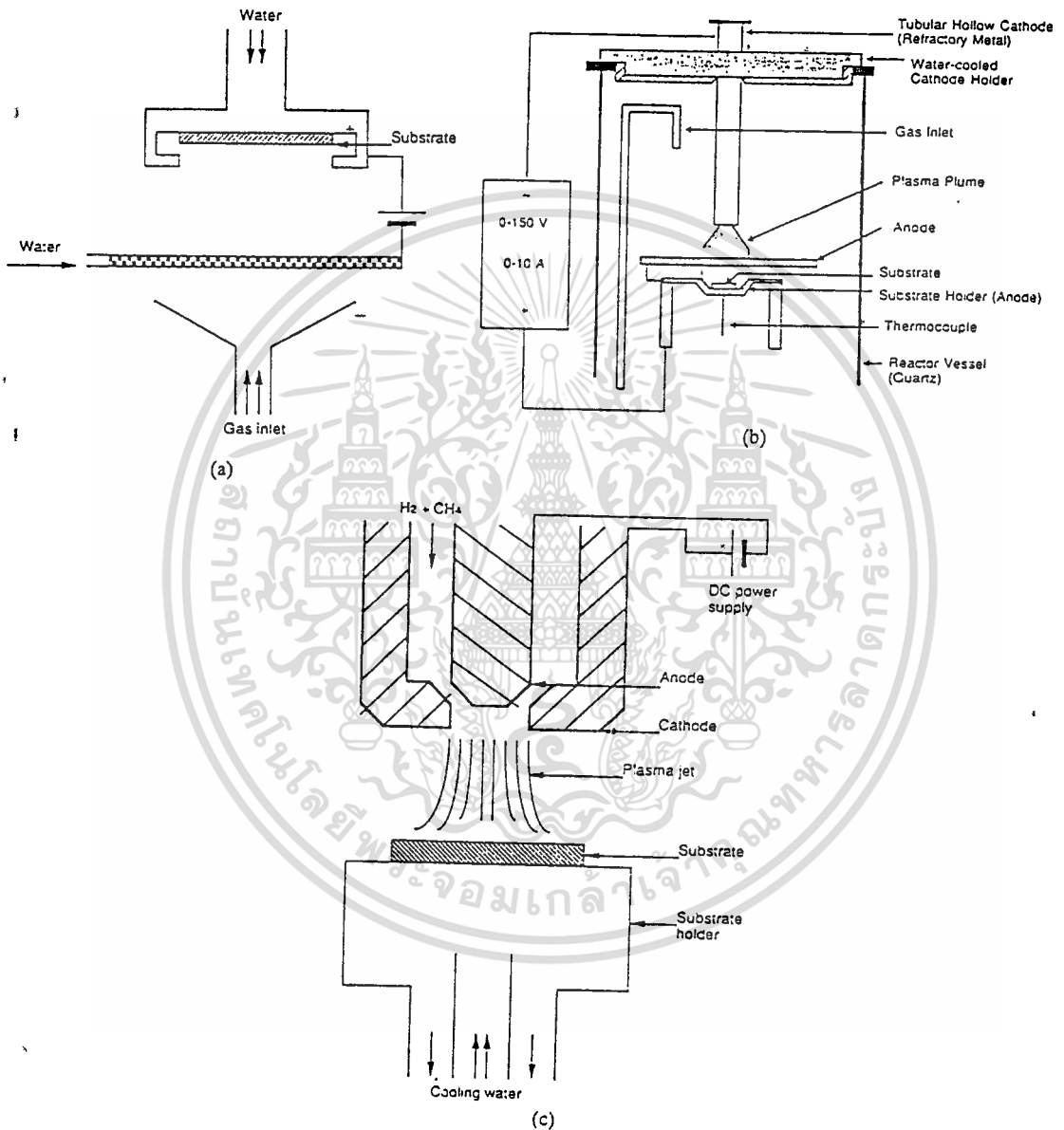
III Direct current (dc) discharge assisted CVD

วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีการพัฒนามากกว่าวิธีการ microwave แต่ไม่เป็นที่แพร่หลาย อย่างไรก็ตาม เป็นวิธีที่ให้อัตราการเกิดฟิล์มสูง ระบบจะเป็นลักษณะง่าย ๆ โดยการจ่ายแรงดัน และความหนาแน่นกระแสสูง ๆ (1 kV และ 4 A/cm^2) ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่ขนานกันอยู่ ภายใต้ความดัน (200 ทอร์) (รูปที่ 1-4 (c)) Suzuki ได้ทำการสร้างที่ความหนาแน่น (10^8 cm^{-2}) อัตราการก่อตัวสูง (~20 ไมครอน/ชั่วโมง) บนฐานรอง Si และ Al_2O_3 โดยบริเวณผิวไม่ได้ทำให้เกิดรอยขีดข่วน ความเสถียรของการคายประจุของ dc มีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง glow และ arc และอุณหภูมิของก๊าซมีค่าสูง ฐานรองวางอยู่บนอานาโนดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส

วิธีการ dc glow discharge ได้มีการออกแบบหลายอย่าง Akatsuka ได้ใช้ dc arc ง่าย ๆ ระหว่างแท่งอิเล็กโทรด 2 แท่ง ในการสังเคราะห์เพชร ได้อัตราการเกิด 200-250 ไมครอน/ชั่วโมง Sawabe และ Inuzuka ได้ทำการจ่ายแรงดัน dc และกระแสอ่อน ๆ (150 V และ 10 mA/cm^2) ระหว่างไส้หลอดและฐานรองในระบบ HFCVD เรียกว่า electron assisted CVD (EACVD) ถึงแม้การเพิ่มความหนาแน่นและอัตราการเกิดเป็นผลจากการเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนชนกับพื้นผิวของฐานรอง แต่ภายใต้เงื่อนไขของ dc plasma จะได้ผลในลักษณะเดียวกัน Singh ใช้ tubular

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

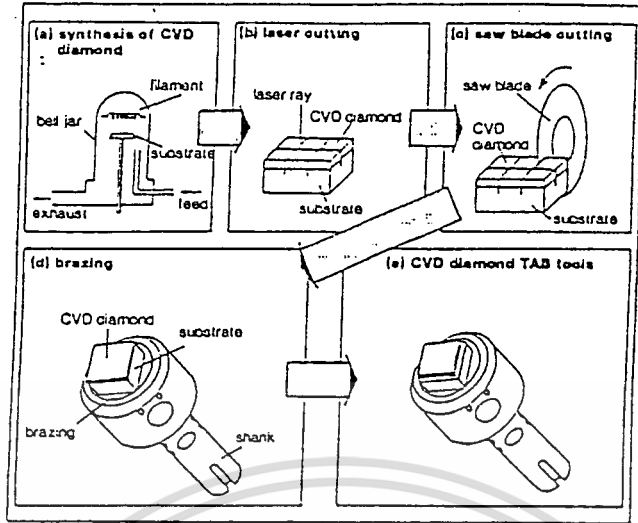
hollow cathode มาแทน hot filament ในการสร้างเพชร โดยรวมระหว่างความร้อน และ dc plasma CVD เข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 1-4 (b) แผ่นคาโทดที่เป็นโลหะจะให้กระแสสูง และมี การคายประจุที่แรงดันต่ำ โดยวางฐานรองบนอานอดที่เย็น คาโทดถูกทำให้ร้อนจนถึงจุดที่ทำให้เกิดการปล่อยอออนขณะการส้าง ใช้กระแส 8 A และมีแรงดันระหว่าง 75 V และ 115 V การคายประจุเกิดบริเวณภายในหลอด และอานอด ปรัชการณณ์ของ hallow cathode จะให้การ คายประจุคงที่ ที่แรงดันต่ำกว่ากรณณ์ของ plasma electrode อัตราการเกิดประมาณ 1-3 ไมครอน/ ชั่วโมง เช่นเดียวกับ hot filament



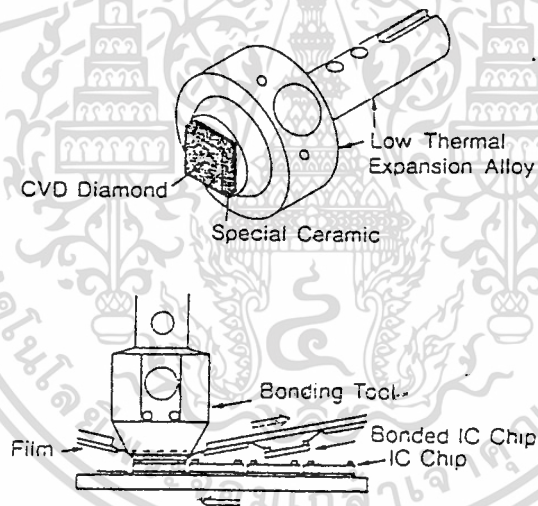
รูปที่ 1-4 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์ dc plasma CVD ชนิด

- (a) a dc plasma CVD
- (b) a hollow cathode CVD
- (c) a dc plasma jet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1-5 แสดงกระบวนการเคลือบ TAB-tool ด้วยฟิล์มเพชร



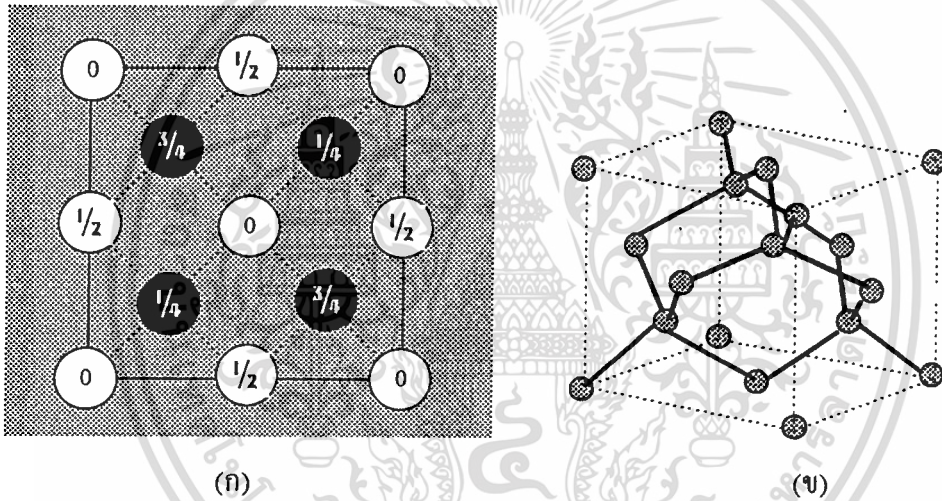
รูปที่ 1-6 แสดงลักษณะและการใช้งานของ TAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเพชร

พิจารณารูปที่ 2-1 (ข) แสดงลักษณะโครงสร้างของผลึกเพชร ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ face-centered diamond cubic ในหนึ่งเซลล์(unit cell) จะประกอบด้วย 8 อะตอม บริเวณมุมของเซลล์ และ 6 อะตอม บริเวณ face-center ส่วนอะตอมที่เหลืออยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งในสี่ที่ว่างของลูกบาศก์ วัดคานจากอะตอมที่อยู่บริเวณมุมของเซลล์ ตำแหน่งต่าง ๆ ของอะตอมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-1 (ก) อะตอมคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับกับอะตอมคาร์บอนอีกสี่อะตอม ด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3



รูปที่ 2-1 (ก). แสดงตำแหน่งอะตอมใน cubic cell

(ข). แสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกเพชรแบบ face-centered cubic

ในหนึ่งลูกบาศก์ของเพชร ทิศทางต่าง ๆ ของ four-body diagonal ของลูกบาศก์มีค่าเป็น $[111]$, $[1\bar{1}\bar{1}]$, $[1\bar{1}1]$, และ $[\bar{1}11]$ ซึ่งมีทิศทางไปตามพันธะ ลักษณะผลึกของ $\{111\}$ ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวน 6 อะตอม จับกันเป็นลักษณะวงแหวน โดยอะตอมแต่ละอะตอมที่ข้างเคียงมีลักษณะของอะตอมวางในตำแหน่งสูง และต่ำสลับกันจากระนาบ เมื่อพิจารณาการนำชั้นของทรงกลมติดกัน ทำให้เห็นลักษณะของแลททิซของเป็นชั้น ๆ ของวงแหวนของอะตอมคาร์บอนทั้งหมด เกิดการใช้พันธะร่วมกันของอะตอม ในฟอร์มของ cubic การใช้พันธะร่วมกันของแต่ละชั้นนั้น จะใช้เชื่อมต่อกันด้วย staggered bond ในทิศทางต่าง ๆ ของ $\{111\}$ ลักษณะการเรียงตัวจะเป็นแบบ ABCABCABC..... ซ้ำ ๆ กัน ซึ่งเป็นลักษณะ โครงสร้างของ face-centered

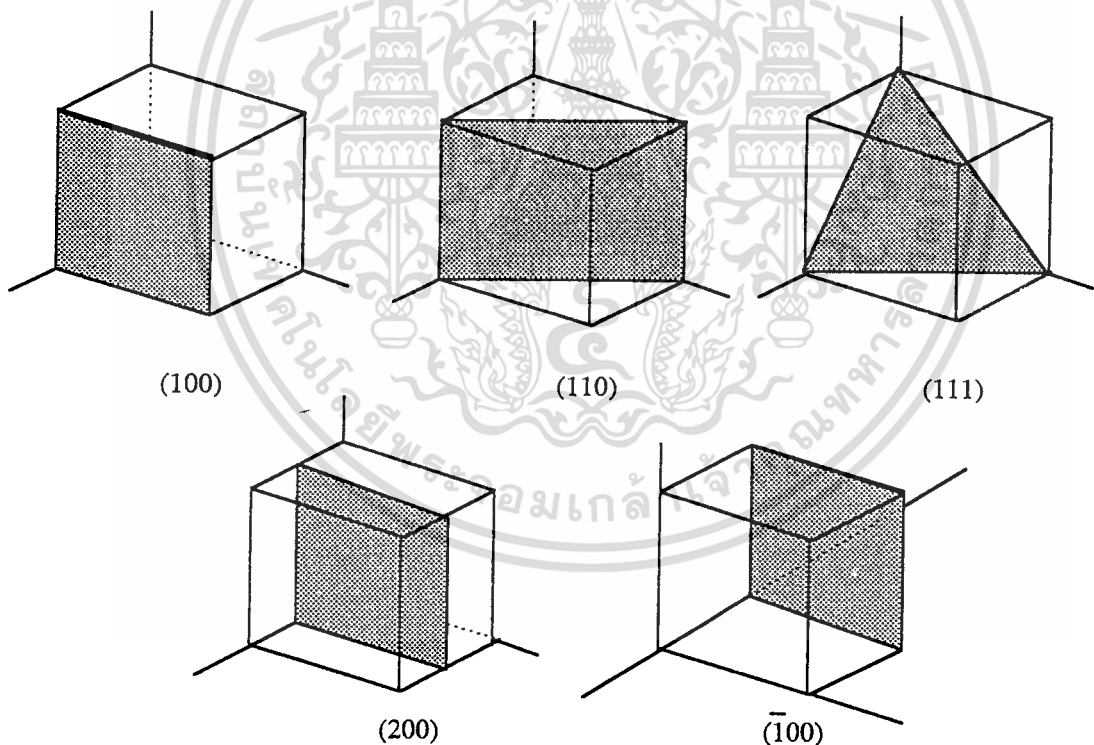
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cubic ค่าคงที่ของผลึกมีค่า 3.56 อังสตรอม และความยาวพันธะมีค่า 1.54 อังสตรอม ในการวิเคราะห์เพชรด้วย Raman spectroscopy ฤทธิ์ของเพชรที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ cubic จะมีตำแหน่งยอดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 12 และที่ตำแหน่ง 1284 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 13

สำหรับระนาบหลักของเพชรที่พบเป็นระนาบ (111) ของรูปทรง octahedral ถึงแม้ว่ารูปทรง octahedral เป็นรูปทรงหลัก แต่ก็สามารถพบรูปทรงอื่นได้ เช่น cubic และ rhombic dodecahedron เพื่อความสะดวกในการกำหนดระนาบผลึก Miller ได้ใช้เลขจำนวนเต็ม h, k, l สำหรับกำหนดระนาบต่าง ๆ ของผลึก และเรียก h, k, l นี้ว่า Miller indices ซึ่งหาได้โดย

1. กำหนดจุดตัดต่าง ๆ ของระนาบบนแกนทั้งสามของผลึก
2. หาส่วนกลับของจุดตัดบนแกนทั้งสามของผลึก
3. ถ้าได้ผลเป็นเลขเศษส่วนให้ทำเป็นเลขจำนวนเต็ม โดยคูณด้วยตัวคูณร่วมที่น้อยที่สุด

รูปที่ 2-2 แสดงการกำหนดระนาบของผลึกด้วย Miller indices ในโครงสร้างผลึกแบบ cubic



รูปที่ 2-2 แสดงการกำหนดระนาบของโครงสร้างผลึกแบบ cubic

2.2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชร

เพชรมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติทางแสง, คุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติแต่ละอย่างมีรายละเอียดดังนี้ ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางแสงของเพชร

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงดัชนีหักเห และการดัดแปลงแสง ที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นที่กำหนด ตารางแสดงการเปรียบเทียบดัชนีหักเหที่อุณหภูมิห้องแสดงไว้ในภาคผนวก ก ในการเริ่มต้นการแบ่งชนิดของเพชรนั้นจะใช้คุณสมบัติทางแสงเป็นตัวแบ่ง โดยแบ่งเพชรออกเป็นสองชนิด คือ type-I และ type-II หลังจากนั้นก็มีการเพิ่มอักษรต่อท้าย a และ b เพชร type-I ประกอบด้วยไนโตรเจนจำนวนมาก ถ้าไนโตรเจนมารวมกันดังเพชรในธรรมชาติ เรียกเพชรชนิดนี้ว่า type-Ia ถ้าไนโตรเจนกระจายออกดังเช่นเพชรที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจะเรียกว่า type-Ib เพชรที่เป็น type-II จะไม่มีไนโตรเจนอยู่ โดย type-IIa มีคุณสมบัติเป็นฉนวน และไม่พบโบรอน ในขณะที่ type-IIb จะมีจำนวนโบรอนมากกว่าไนโตรเจน และเป็นเพชรชนิดที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

คุณสมบัติทางกลของเพชร

จากโครงสร้างของเพชรที่ประกอบด้วยพันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรงเป็นผลให้เพชรมีคุณสมบัติทางกลที่พิเศษหลายอย่าง โดยเพชรจะมีความแข็ง, molar density และ thermal conductivity มากกว่าวัสดุชนิดอื่น ในขณะที่เดียวกันเพชรก็มีความยืดหยุ่นและ bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น อีกทั้งยังมีสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนที่ต่ำมาก ๆ คือมีค่า $0.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ สำหรับรายละเอียดของคุณสมบัติต่าง ๆ มีดังนี้

-ความแข็ง วัสดุทั้งหมดในธรรมชาติ เพชรเป็นวัสดุที่แข็งที่สุด โดยความแข็งนี้จะพิจารณาจากแรงกดลงบนพื้นผิววัสดุต่อพื้นที่ ตารางแสดงการเปรียบเทียบความแข็งของวัสดุแสดงไว้ในภาคผนวก ก

-Thermal conductivity เพชรมีความนำความร้อนมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น โดยมีค่า $20 \text{ watt/cm}^\circ\text{C}$ ตารางแสดงการเปรียบเทียบแสดงไว้ในภาคผนวก ก การลดลงของความร้อนเกิดขึ้นได้ เมื่อมีไนโตรเจนจำนวนมากเกิดขึ้นในเพชร อย่างเช่นในเพชร type-Ia ทำให้ความนำความร้อนลดลง 30-50 % จากค่าสูงสุด สำหรับฟิล์มเพชรที่เป็นผลึกรวมที่ได้จากการสร้างที่มีคุณภาพดี ความนำความร้อนในทิศทางการปลูกผลึกของฟิล์มมีค่าเป็น 55 % ของผลึกเดี่ยว ในระนาบของการปลูกผลึก ความนำความร้อนของผลึกเดี่ยวมีค่ามากกว่า 25 % แต่ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับขนาดผลึก

-Young Modulus บริเวณทั้งหมดที่เกิดการผิดรูปไปเนื่องจากมีแรงมากกระทำ และสามารถกลับสู่ภาวะเริ่มต้นได้ บริเวณนี้เรียกว่า บริเวณยืดหยุ่น(elastic region) จากกฎของ Hook กล่าวไว้ว่าอัตราส่วนของความเค้น(stress) ต่อความเครียดจะมีค่าประมาณคงที่ที่บริเวณดังกล่าว โดยอัตราส่วนของความเค้นที่เกิดจากการดึงต่อความเครียดในเชิงเส้นถูกเรียกว่า Young's Modulus ตารางแสดงการเปรียบเทียบแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร

พิจารณาคงสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ เพชรในทางธรรมชาติมีค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall อยู่ในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ถึง 10^7 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าความคล่องตัวของ Hall ของโฮล ของเพชรในทางธรรมชาติมีค่า $1800 \text{ cm}^2/\text{volt-sec}$ และอิเล็กตรอนมีค่า $2000 \text{ cm}^2/\text{volt-sec}$ สำหรับค่าความคล่องตัวของโฮล ที่ได้จากการสร้างเพชรที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส วัดได้ $850 \text{ cm}^2/\text{volt-sec}$ สารกึ่งตัวนำที่มีใช้ในปัจจุบันมีเพียง เจอร์มาเนียม (Germanium) และ อินเดียม แอนติโมนิไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูง ๆ ส่วนวัสดุอื่นจะมีค่าความเร็วอิมิตตัวของโฮลต่ำ และ dielectric strength ต่ำ ที่ความแรงสนามไฟฟ้ามีค่า 10^4 cm/sec ความเร็วครีฟของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะเริ่มมีค่าอิมิตตัวสำหรับโฮลจะมีค่าความเร็วครีฟได้สูงสุด 10^7 cm/sec และ $2.1 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ สำหรับอิเล็กตรอน สภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติมีค่าสูงถึง 10^{15} ohm-cm

โบรอนเป็นสารที่ถูกนำมาใช้ในการเจือลงในเพชร โดยทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับพลังงานกระตุ้นของโบรอน จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอน ในกรณีที่มีความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก ๆ ทำให้พลังงานกระตุ้นมีค่าน้อยมาก เกิด shallow level มากขึ้นโดยทั่วไปแล้ว ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือที่มีค่าประมาณ 10^{19} cm^{-3} มีพลังงานกระตุ้น 370 meV พิจารณาถึงไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ที่ถูกนำมาใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ในเพชร แต่เนื่องจากระดับพลังงานของไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าแถบความนำ 1.57 eV ทำให้ไม่สามารถนำมาเป็นวัสดุที่เป็นชนิด n ได้ กรณีของฟอสฟอรัสมีขนาดอะตอมที่ใหญ่กว่าคาร์บอน ดังนั้นเมื่อเป็นสิ่งเจือในเพชรทำให้ลักษณะโครงสร้างของผลึกผิดรูปไป การทดลองสังเคราะห์โดยใช้ฟอสฟอรัสมีปัญหาเกี่ยวกับการที่ไม่สามารถควบคุมความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ จึงยังไม่มีข้อเสนอเกี่ยวกับฟิล์มเพชรชนิด n ขึ้น

2.3 หลักการ CVD แบบความร้อน

เงื่อนไขทั่วไปในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบต่าง ๆ จะมีคุณลักษณะดังนี้ คือ

- 1). ต้องทำการกระตุ้น แก๊สเฟส ที่อุณหภูมิสูง หรือ การกระตุ้นด้วย plasma โดยบางครั้งอาจมีการใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน
- 2). ใน แก๊สเฟส ต้องประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน ตัวอย่าง เช่น ไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์, คาร์บอนมอนอกไซด์ หรือ คาร์บอนไดออกไซด์
- 3). ในระบบต้องมีความเข้มข้นของอะตอมมากพอที่จะกำจัดกราไฟท์ หรือการลดความเข้มข้นของภาวะแก๊สที่ทำให้เกิดกราไฟท์ขึ้น ปกติแล้วอะตอมส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นอะตอมของไฮโดร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจน อย่างไรก็ตามอะตอมที่เป็นตัวป้องกันการเกิดกราฟที่อาจได้จาก H_2 , OH , O_2 , อะตอมออกซิเจนและ F_2

4). ต้องทำการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง เพื่อรองรับการเกิดนิวคลีเอชัน และการปลูกผลึกของเพชรจาก ไอเฟส(vapour phase) ในทางปฏิบัติแล้ว จะรวมถึงพื้นผิวดัง ไม่มีตัวเร่งต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการก่อตัวของกราฟที่ นอกจากนี้พื้นผิวของฐานรองต้องรองรับการก่อตัวของเพชรเฉพาะบนพื้นผิว โดยฐานรองต้องมีข้อจำกัดของการแพร่ของอะตอมคาร์บอน ลงไปในเนื้อของฐานรอง ที่อุณหภูมิที่ทำการสร้าง

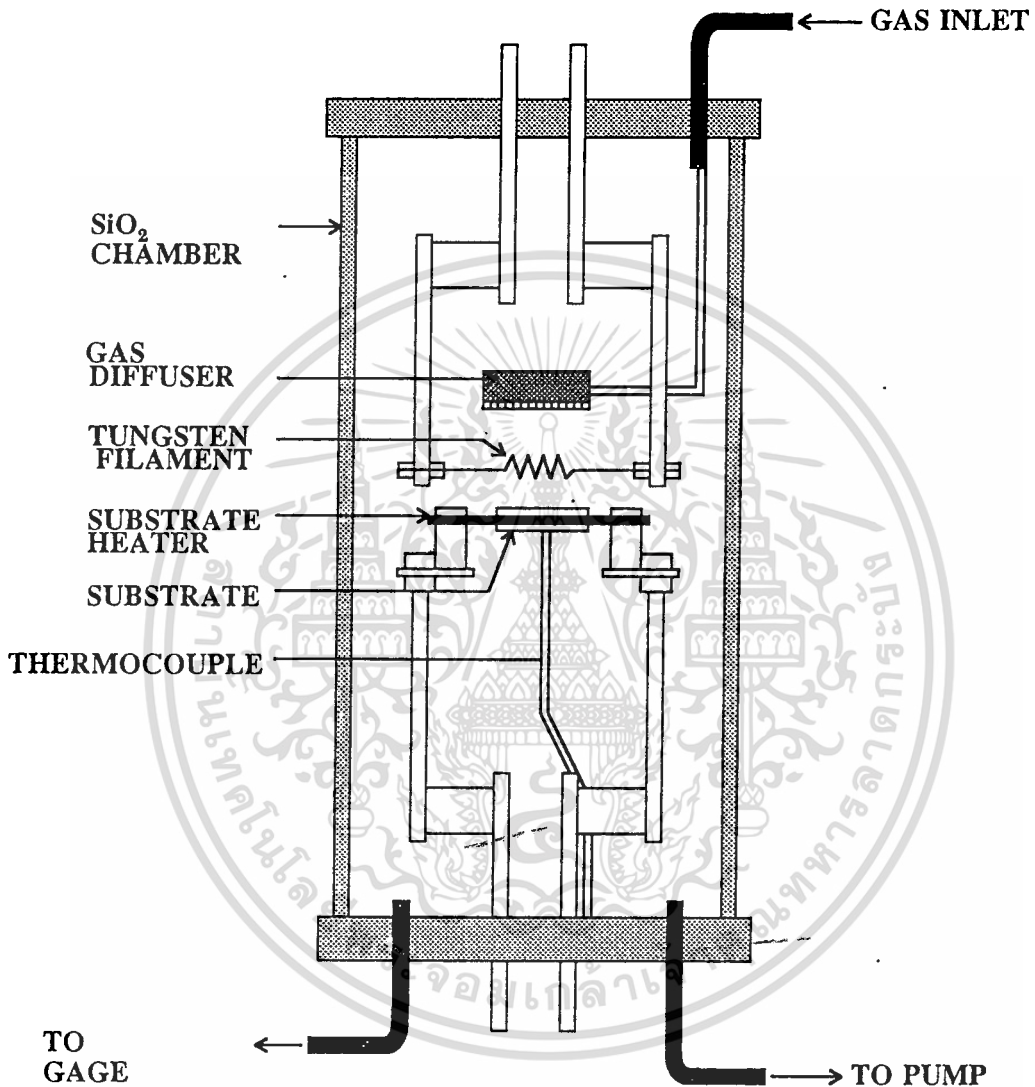
5). กระบวนการสร้างต้องมีแรงที่สามารถจับอะตอมคาร์บอนจาก ก๊าซเฟส(gas phase) ไปยังบริเวณพื้นผิวของฐานรอง ในกระบวนการสร้างด้วยวิธีการ CVD ส่วนใหญ่ แรงที่ใช้จับอะตอมคาร์บอนจะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ เนื่องจากบริเวณที่ ก๊าซเฟส ถูกกระตุ้น จะมีอุณหภูมิสูงกว่า บริเวณพื้นผิวของฐานรอง อย่างไรก็ตามอาจใช้วิธีการง่าย ๆ โดยการเป่าจากก๊าซเฟสไปยังพื้นผิวของฐานรอง นอกจากนี้อาจใช้สนามไฟฟ้าช่วยในการส่งผ่าน

ในทางปฏิบัตินั้นปรากฏการณ์ทั้งห้าจะต้องมีการนำมาใช้ร่วมกัน สำหรับการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ CVD นั้น ถ้าปรากฏการณ์หนึ่งหายไป เป็นผลให้สิ่งที่เกิดขึ้นจะไม่ใช่เพชร ซึ่งอาจเป็น กราไฟท์, diamond-like hydrocarbon, หรือ diamond-like carbon วิธีการที่ใช้ในการควบคุมเงื่อนไขทั้งห้าข้างต้น สามารถใช้เทคนิคหลายอย่างในการควบคุม อย่างไรก็ตามวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมเงื่อนไขการสร้างนั้น อาจทำให้เกิดเพชรขึ้นหรือไม่ก็ได้ ยกตัวอย่าง CVD ส่วนใหญ่ที่ใช้เทคนิคของ plasma หรือ hot filament ซึ่งฉายแสงให้กับก๊าซเฟส และฐานรองด้วยความเข้มของการแผ่รังสีในช่วง อินฟราเรด, visible และ ultraviolet สำหรับแสงอุลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีทางแสง ซึ่งเป็นผลให้เกิดการปลูกผลึกขึ้น รวมทั้งเทคนิคอื่น ที่ใช้สนามไฟฟ้าช่วยในการชนของอิเล็กตรอน หรือไอออนบวกที่ได้จากก๊าซเฟสกับฐานรอง การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฟิล์มเพชร พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงในทอมฟังก์ชันของการชนของอิเล็กตรอนหรือไอออน

จากที่กล่าวข้างต้น คุณสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์มีความสำคัญอย่างมากต่อการนิวคลีเอชัน และการปลูกฟิล์มเพชร จากประสบการณ์ที่ผ่านมาพบว่าการใช้วัสดุที่นำมาใช้เป็นฐานรองต่างกันมาสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD จะได้การเคลือบฟิล์มที่ต่างกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวัสดุที่นำมาใช้เป็นฐานรองมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของฟิล์ม

เมื่อปี ค.ศ. 1970 J.C. Angus ได้ให้ข้อเสนอเกี่ยวกับการเกิดของอะตอมไฮโดรเจน(H°) ขณะที่ไฮโดรคาร์บอนได้รับความร้อน ในขณะที่เดียวกันจะเกิดการเคลือบของเพชรขึ้น ต่อมาจึงมีนักวิจัยชาวโซเวียตได้ทำการทดสอบข้อเสนอ โดยทำการแยก H° ออกจาก H_2 ด้วย electric discharge หรือ hot filament พบว่าการเกิดของอะตอมไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย โดยการผ่านก๊าซไฮโดรเจนไปยังไส้หลอด เช่น ทังสเตน ที่ถูกจ่ายกระแสให้ความร้อนระหว่าง 1800 ถึง 2000 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามแม้ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2300 °C เมื่อเกิดอะตอมไฮโดรเจนในบรรยากาศของไฮโดรคาร์บอน พบว่าสามารถเคลือบเพชรบนฐานรองได้ ในขณะเดียวกัน การก่อดั้วของกราฟที่มีค่าลดลง การเกิดอะตอมของไฮโดรเจนขณะสร้างเพชรด้วยวิธีการ CVD จะทำให้ I). อัตราการเคลือบเพชรมีค่าเพิ่มขึ้น จนมีอัตราประมาณ 1 ไมครอน/ชั่วโมง II). เกิดการนิวเคลียชัน และการปลูกผลึกของเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรขึ้น



รูปที่ 2-3 แสดงแผนภาพไดอะแกรมของระบบ CVD แบบความร้อน

รูปที่ 2-3 แสดงแผนภาพไดอะแกรมของระบบ CVD แบบความร้อน ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร เนื่องจากเป็นระบบที่ง่าย มีราคาถูก เมื่อเทียบกับระบบ CVD แบบอื่น ๆ และค่าใช้จ่ายในการสร้างมีค่าต่ำ ทำให้ CVD ชนิดนี้เป็นที่นิยมในทางอุตสาหกรรม ซึ่งจะให้ค่าใช้จ่ายของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรต่อกรัมต่ำสุด อุปกรณ์ที่ใช้จะรวมถึงระบบก๊าซที่มีมิเตอร์ที่เหมาะสมในการควบคุมก๊าซผสม ยกตัวอย่าง เช่น ก๊าซผสมของ 1% CH₄ + 99% H₂ โดยก๊าซผสมจะผ่านไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา¹⁶ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังใช้หลอด วัสดุที่ใช้ทำให้หลอดมีหลายชนิด เช่น ทังสแตน(tungsten), แทนทาลัม(tantalum) และ เรเนียม(rhenium) โลหะแข็งที่ใช้เป็นฐานรองปกติแล้วจะเกิดเป็นโครงสร้างของคาร์ไบด์ขึ้นก่อน การก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรขึ้น เรเนียมเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาทำให้หลอด เนื่องจากเกิดการฟอर्मตัวเป็นคาร์ไบด์ยาก จึงไม่ต้องใช้เวลานานก่อนที่มีการเคลือบเพชรขึ้น โดยระยะห่างระหว่าง ไล่หลอดกับฐานรองต้องมีค่าเหมาะสม เนื่องจากการส่งผ่านความร้อนจากไล่หลอดไปยังฐานรอง และอาจมีการให้ความร้อนแก่ฐานรอง เพื่อให้ระยะห่างระหว่างไล่หลอดไม่วิกฤติมาก ปกติฐานรองมีอุณหภูมิระหว่าง 500-1000 องศาเซลเซียส

ต่อไปเป็นการพิจารณาถึงทฤษฎีอย่างง่ายของการปลูกฟิล์มเพชรด้วยวิธีแบบความร้อน เป็นที่เชื่อว่าการเข้าสู่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกของก๊าซเฟส เกิดขึ้นที่บริเวณผิวของไล่หลอด ที่อุณหภูมิประมาณ 2000 องศาเซลเซียส มีเทนจะเปลี่ยนเป็นอะเซทิลีน(acetylene), เมทิล และ ไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ซึ่งมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และ H_2 ถูกแยกออกเป็น H° โดยอะตอมของไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง จะเกิดการแพร่จากไล่หลอดไปยังพื้นผิวของฐานรอง ถึงแม้ว่าที่บริเวณไล่หลอดจะมีความสมดุลของอนุพลของสารประกอบที่อุณหภูมินั้นก็ตาม แต่ความสมดุลของความเข้มข้นจะมีค่ามากเมื่ออนุพลของสารประกอบเคลื่อนไปยังบริเวณฐานรองที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ปฏิกริยาการเกิดใหม่ของอนุพลสารประกอบ C_2H_2 ที่อุณหภูมิสูง บริเวณผิวของไล่หลอดจะเกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกริยาอื่น พิจารณาความสมดุลระหว่างมีเทน และอะเซทิลีน: $CH_4 = C_2H_2 + 3H_2$ ที่บริเวณผิวของไล่หลอด ปฏิกริยาเกิดขึ้นทันทีที่ทำให้ได้อะเซทิลีน หลังจากที้อะเซทิลีนแพร่ไปยังฐานรองจะเกิดภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกขึ้นที่อุณหภูมิจากฐานรองมีค่า 850 องศาเซลเซียส

พารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งหมดของกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบ ความร้อนจะเกี่ยวข้องกันอย่างมาก โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการสร้างประกอบด้วย วัสดุที่ใช้เป็นไล่หลอด, อุณหภูมิของไล่หลอด, ก๊าซผสมที่ผ่านเข้ามาในระบบ, อุณหภูมิของฐานรอง, ระยะห่างระหว่างไล่หลอดกับฐานรอง และอัตราการไหลของก๊าซ โดยทั่วไปพบว่าระยะห่างระหว่างไล่หลอดกับฐานรองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อลดความดันลง ได้มีนักวิจัยบางกลุ่มได้เสนอรายงานเกี่ยวกับการไหลของก๊าซไปยังไล่หลอดมีค่าวิกฤติขณะการสร้างฟิล์มเพชร ในขณะที่นักวิจัยอื่นได้รายงานว่าไม่จำเป็น

Lee et al. จาก North Carolina State University ได้รายงานเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้คือ อุณหภูมิของไล่หลอดทังสแตนมีค่า 1930 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างฐานรองกับไล่หลอดมีค่า 0.8 เซนติเมตร ฐานรองที่ใช้เป็นแผ่นซิลิกอน ที่มีเพชรขนาด 0.25 ไมโครเมตร ติดบนพื้นผิว และให้ความร้อนแก่ฐานรองจนมีอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ก๊าซผสมประกอบด้วย 3% ของมีเทนที่เจือจางด้วย H_2 มีอัตราการไหล 100 sccm. ความดันรวมของก๊าซ 3.3 kPa(25 torr) นอกจากนี้ Lee et al. ยังได้อธิบายเกี่ยวกับผลของการไบแอสไฟตริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างใส่หลอดกับฐานรอง เป็นผลทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนหรือไอออนของฟิล์มที่กำลังสร้าง

จากวิธี CVD แบบความร้อน ยังพบว่าสามารถใช้แหล่งจ่ายก๊าซที่เป็นไฮโดรคาร์บอนได้หลายชนิด สำหรับแหล่งจ่ายที่ได้รับความนิยมสำเร็จจากการทดลองสร้างคือ มีเทน, โพรเพน, อีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ รวมทั้ง ไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนประกอบอยู่ เช่น อะซิโตน และ เอทานอล การเจืออะตอมสารเจือของฟิล์มเพชรทำการสร้างโดยใช้ไดโบรเจน(diborane) และโบรอนคาร์โบไฮดรอกไซด์(boron carbohydroxide) เป็นแหล่งจ่าย

U.S. industry นิยมที่ใช้วิธีนี้ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำ และสามารถขยายพื้นที่ของการสร้างให้มีขนาดใหญ่ โดยอาจสร้างให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่ถึง 30 เซนติเมตร วัดตามเส้นผ่านศูนย์กลาง นอกจากนี้ยังมีการนำวิธีการดังกล่าวนี้ไปประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน

2.4 กลไกทางเคมีของการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ CVD

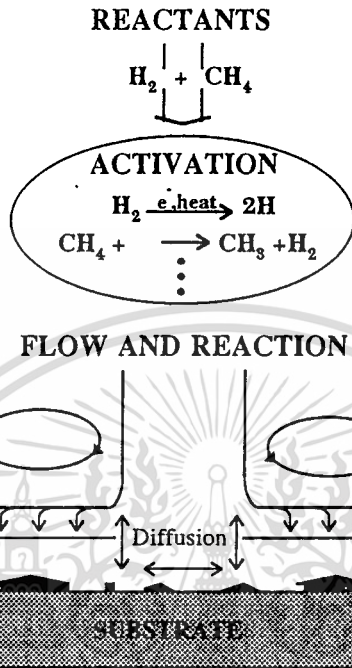
การปลูกเพชรจากไอเฟส เริ่มจากการนิเวศลิเอชัน ซึ่งเป็นการก่อตัวของผลึกเริ่มต้น ตามด้วยชั้นของโฮโมอีพิแทกเซียล(homoepitaxial) การเคลือบเพิ่มขึ้นของคาร์บอนบนพื้นผิวทำให้มีขนาดของผลึกใหญ่ขึ้น ในตอนนี้กล่าวถึงความเข้าใจเกี่ยวกับ CVD และกลไกของการเคลือบเพชรจากไอเฟส ในขณะที่วิธีการ CVD มีอยู่ด้วยกันหลายเทคนิค ที่ให้ความสำเร็จในการสร้างเพชร แต่จะอธิบายหลักการหลักที่สามารถใช้กับวิธีการต่าง ๆ ได้หมด

เรื่องหลักของกระบวนการ CVD อยู่ที่การทำความเข้าใจ และการปรับปรุงเทคนิคในการสร้าง และวัสดุที่ใช้ สิ่งแวดล้อมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการ CVD มีความซับซ้อน และเปลี่ยนแปลงตลอดดังแสดงในรูปที่ 2-4 จากรูปรีแอคเตอร์เป็นมีเทนและก๊าซไฮโดรเจน เมื่อให้พลังงานและอุณหภูมิสูง โดย plasma, hot filament, หรือ combustion flame ทำให้ก๊าซถูกกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีจำนวนมากเกิดขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 10^3 sec ในการชนกันของก๊าซต้องใช้เวลาในรีแอคเตอร์(10^{-4} ถึง 10 sec) ปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ จะส่งผ่านโดยแรงจากการไหล, การแพร่ และการพาไปยังรีแอคเตอร์ ในที่สุดไปยังฐานรองหรือถูกดูดออกจากรีแอคเตอร์ บริเวณใกล้กับฐานรองการแพร่จะแพร่จนเข้าสู่บริเวณที่มีการไหลหยุดนิ่ง เรียกว่า "boundary layer" บนพื้นผิวของฐานรองจะมีกระบวนการหลายอย่างเกิดขึ้น ยกตัวอย่าง การดูดกลืน, การคาย และการแพร่บริเวณผิวและในเนื้อสาร สำหรับปฏิกิริยาเคมีมีประโยชน์ต่อการปลูกฟิล์มเพชร ความสำคัญของความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนของอุณหภูมิ, โครงสร้าง, และองค์ประกอบของพื้นผิว

จากความรู้เกี่ยวกับคาร์บอนในทางเคมีและการเคลือบวัสดุที่เสถียร เป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ CVD ของเพชร โดยคำนึงถึงการปลูกผลึกว่าศักย์ในทางเคมีเป็นปัจจัยหลักในการนิเวศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอชเอ็น, การปลูกผลึก และการได้มาซึ่งความสมบูรณ์ของผลึก จากปัจจัยข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ CVD ของเพชรได้ แต่ต้องอาศัยการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับเฟสของเพชร ซึ่งมีเฟส ตรงข้ามกับเฟสของกราไฟท์



รูปที่ 2-4 แสดงไดอะแกรมกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของเพชร

CVD ของเพชรเป็นวิธีที่แตกต่างจากวิธีอื่น ๆ ที่นำมาใช้ในการปลูกผลึกหลายอย่างที่สำคัญด้วยกัน สิ่งแรกคาร์บอนสามารถฟอร์มตัวเป็นพันธะเคมีหลายชนิดด้วยกัน โดยใช้ไฮบริดเซชัน (hybridization) sp , sp^2 และ sp^3 ของวาเลนซ์อิเล็กตรอน ซึ่งลักษณะของผลึกที่ได้จะตรงข้ามกับคาร์บอนทางธรรมชาติ โดยพิจารณาจากวัสดุและทางเคมี เพชรเป็นฟอร์มหนึ่งของคาร์บอนที่มีพันธะส่วนใหญ่เป็น sp^3 และความเสถียรทางความร้อนเชิงพลวัตมีความสัมพันธ์กับ พันธะ sp^2 ซึ่งเป็นพันธะหลักของกราไฟท์ ที่อุณหภูมิและความดันที่ใช้ในกระบวนการ CVD อันดับสองเป็นเรื่องเกี่ยวกับชนิดของก๊าซและพื้นผิวในการปลูกผลึกเป็นโมเลกุลไม่เป็นอะตอม เป็นผลเนื่องจากการที่พันธะของคาร์บอนแข็งแรง อันดับสาม CVD ของเพชรเกิดขึ้นที่อุณหภูมิฐานรองที่มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับ CVD ชนิดอื่นที่ให้ผลึกที่มีคุณภาพสูง ด้วยเหตุนี้การแอนนิลต่ำหืนและกระบวนการแพร่ในเนื้อสารของ CVD ของเพชรมีความสำคัญน้อยกว่ากรณีของ CVD อื่น ๆ กระบวนการปลูกผลึกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

- ก) การนิวคลิเอชัน กล่าวถึงกลไกต่าง ๆ ของฐานรองที่เป็นเพชร และไม่ใช่อเพชร
- ข) การปลูกผลึก กล่าวถึงลักษณะของก๊าซในระบบ และกลไกบนพื้นผิว ซึ่งทำให้เกิด

แลททิซของเพชรขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 กระบวนการนิวเคลียส

การควบคุมการนิวเคลียสต้องระมัดระวังเพื่อให้ได้ขนาดผลึก, ระยะเวลา และคุณสมบัติอื่นที่เหมาะสมในการนำเพชรไปประยุกต์ใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ความเรียบของฟิล์มที่เป็นผลึกรวมเพื่อใช้ทางด้านแสง และ X-ray lithographic mask ต้องอาศัยความหนาแน่นของนิวเคลียสสูง และขนาดของผลึกที่เท่ากันหมดตลอดฐานรอง สำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นเพชรต้องการความหนาแน่นของตำหนิน้อย เป็นต้น

ในตอนนี้กล่าวถึงความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการนิวเคลียส CVD ของเพชร และจะควบคุมได้อย่างไร โดยพิจารณาจาก ก) การเคลื่อนไหวทั่วไปและเทอร์โมไดนามิกของการนิวเคลียส และการปลูกผลึก และความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์จากการทดลอง ข) ลักษณะพื้นผิวของฐานรองที่มีการนิวเคลียสเกิดขึ้น และการเปลี่ยนแปลงการนิวเคลียสโดยภาวะแวดล้อมของ CVD ค) การนิวเคลียสในระดับจุลภาค และกระบวนการปลูกผลึกเริ่มต้น สำหรับฐานรองที่มีการเตรียมกับที่ไม่ได้เตรียม ง) ผลของการนิวเคลียสบนฐานรองที่เป็นเพชรตามธรรมชาติ

ลำดับการนิวเคลียสที่เกิดขึ้น นิวเคลียสต้องเริ่มก่อตัวก่อน และมีความเสถียรนานพอที่ทำให้เกิดการก่อตัวของแลตทิซขึ้น การพัฒนาของนิวเคลียส เช่น ขนาด นิวเคลียสจะคงอยู่และเกิดการก่อตัวมากกว่าที่จะเสื่อมลง ขึ้นกับว่าภายใต้เงื่อนไขการก่อตัวของอนุภาคพลังงานอิสระของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของระบบ จะเป็นไปในทางลดลงเพื่อให้กระบวนการเกิดขึ้น ซึ่งระบบรวมถึงฐานรอง, การก่อตัวของอนุภาค และชนิดเฟสของก๊าซที่ช่วยก่อตัวของแลตทิซ เนื้อสารช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของวัสดุ เมื่อไม่มีอะตอมเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการเกิดพันธะของอะตอมภายในแลตทิซ

การนิวเคลียสของเพชรขณะกระบวนการ CVD เป็นผลให้เกิดการกำจัดคาร์บอนตัวของกราไฟท์นิวเคลียส และทำให้นิวเคลียสของเพชรมีความเสถียร ซึ่งเป็นกรกำจัดคาร์บอนที่มีพันธะ sp^2 ออก ในการทำให้เกิดเงื่อนไขดังกล่าว ภาวะแวดล้อมของการสร้างเพชรด้วยวิธีการ CVD ต้องประกอบด้วยโมเลกุลของไฮโดรเจนจำนวนมาก โดยการอิมบดของอะตอมไฮโดรเจนเป็นผลจากการใช้เทคนิคในการกระตุ้นก๊าซเฟส ยกตัวอย่างการใช้ hot filament โมเลกุลของไฮโดรเจนทำหน้าที่ลดความดันบางส่วนของเฟสก๊าซที่ทำให้เกิดการนิวเคลียสของกราไฟท์ การฟอร์มตัวของเพชรที่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นบนระยะเวลาทำให้เกิดการนิวเคลียสของกราไฟท์ขึ้นได้ โดยมีผลต่ออัตราการปลูกฟิล์มเพชร และทำให้คุณภาพของฟิล์มต่ำลง

จากทฤษฎีและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการอิมบดของคาร์บอน และไฮโดรเจน อุณหภูมิและการเคลื่อนไหวต่าง ๆ รวมทั้งเทอร์โมไดนามิกแฟกเตอร์จะมีผลอย่างมากต่อการฟอร์มตัวของกราไฟท์ และเพชร ซึ่งถูกนำเสนอโดย Fedoseev และ Deryagin ก๊าซผสมที่มีอัตราส่วนของ C/H ต่ำ และอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูง เป็นปัจจัยหลักในการสร้างเพชรให้มีคุณภาพสูง, มีตำหนิต่ำ, ความหนาแน่นของการนิวเคลียสต่ำกว่าและขนาดของเมล็ดผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ของรีแอกเตอร์ รวมทั้งวัสดุที่ใช้ทำฐานรอง และอุณหภูมิใส่หลอด หรือของ plasma องค์ประกอบของก๊าซ ความอึดตัวของอะตอมคาร์บอน และไฮโดรเจน, และอัตราการไหลของก๊าซ มีผลอย่างมากต่อการนิวคลีโอชัน, อัตราการสร้าง และลักษณะรูปร่างของผลึก

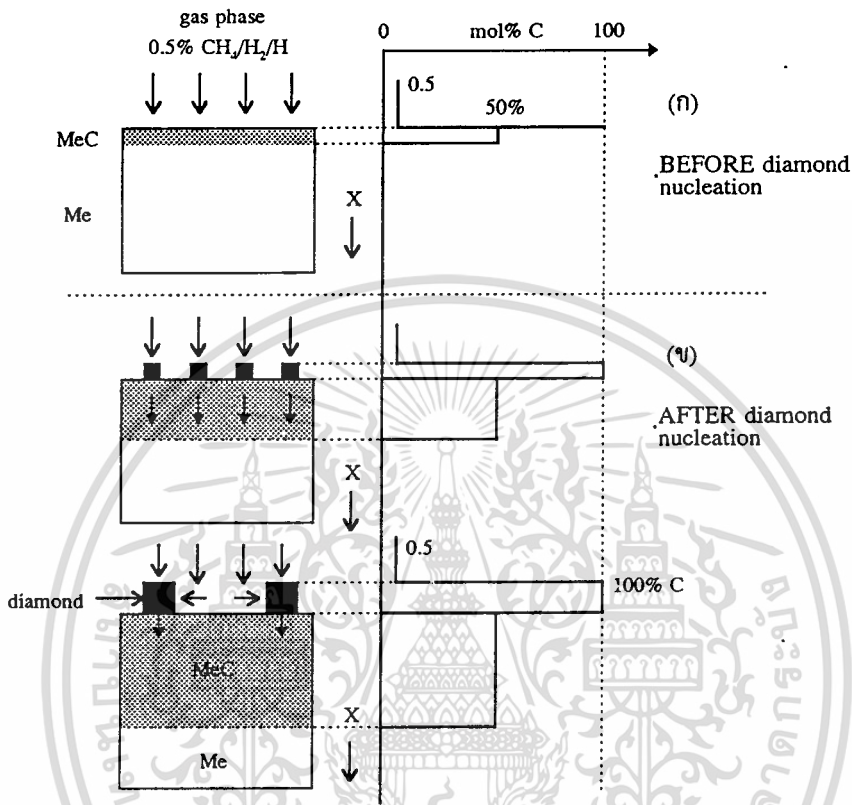
จากที่กล่าวมาข้างต้นชนิดของฐานรอง และการเตรียมฐานรองเบื้องต้นมีผลอย่างมากต่อการนิวคลีโอชันและการก่อตัวของผลึกในขั้นแรก ชนิดของฐานรองที่ใช้ในการสร้างเพชรด้วยวิธีการ CVD มีทั้งที่เป็นเพชรธรรมชาติ และวัสดุที่ไม่ใช่เพชร การนิวคลีโอชันบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรจะเพิ่มขึ้น โดยการเตรียมฐานรองเบื้องต้นด้วยการขัดฐานรองด้วยผงเพชร(หรืออาจใช้ SiC หรือ c-BN) การฟอร์มตัวของคาร์ไบด์บนฐานรองที่เป็นผลึกเดี่ยว ทำให้เกิดความหนาแน่นของการนิวคลีโอชันสูงสุด และอัตราการก่อตัวมากที่สุด และใช้เวลาน้อย ในขณะที่อัตราการนิวคลีโอชันจะมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ใช้ฐานรองที่เป็นผลึกรวม โดยทั่วไปการขัดผิวของฐานรองด้วยคาร์ไบด์จะทำให้เกิดการนิวคลีโอชันดีกว่าการขัดที่ไม่ใช่คาร์ไบด์ เปรียบเทียบระหว่างฐานรองที่เป็น SiC หรือวัสดุที่เป็นคาร์ไบด์ชนิดอื่น ที่ไม่มีการขัดผิวของฐานรองกับ Si ที่ไม่มีการขัดผิวฐานรองพบว่าการนิวคลีโอชันจากฐานรองทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างกันของการนิวคลีโอชัน

กระบวนการนิวคลีโอชันจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนด้วยกัน ในกระบวนการสร้างเพชรด้วยวิธีการ CVD นั้นขั้นตอนแรกเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของคาร์บอนจากก๊าซเฟสตกกระทบบนฐานรอง และเกิดการแพร่เข้าไปในเนื้อของฐานรอง อัตราการแพร่ของคาร์บอนลงไปเนื้อสารจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อมีการฟอร์มตัวของชั้นคาร์ไบด์ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2-5 จนกระทั่งการแพร่ของคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และมีความเข้มข้นของคาร์บอนมากพอบริเวณผิวของฐานรอง ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่ทำให้เกิดขั้นตอนที่สองของเพชรขึ้น โดยที่ภาวะนี้นิวเคลียสเริ่มที่จะมีความเสถียร การนิวคลีโอชันในขั้นตอนที่สองสามารถเกิดขึ้นได้หลายทางขึ้นอยู่กับว่าบนฐานรองมีเม็ดเพชรหรือไม่ สำหรับบนฐานรองที่ไม่มีการขัดพื้นผิว การนิวคลีโอชันเกิดขึ้นเมื่อบริเวณผิวของฐานรองมีความอึดตัวของคาร์บอน จากนั้นเกิดการนิวคลีโอชันบริเวณพื้นผิวที่มีรอยตำหนิ กรณีของฐานรองที่มีการขัดการนิวคลีโอชันเกิดขึ้นพร้อมกับการแพร่ของคาร์บอนลงไปเนื้อสาร

ขั้นตอนที่ 1 ฐานรองและการเริ่มก่อตัวบนผิว การเกิดของชั้นคาร์ไบด์ที่ป้องกันการแพร่ของคาร์บอนมีความสำคัญ แต่ไม่เพียงพอสำหรับการนิวคลีโอชันของเพชรบนฐานรองที่ไม่ได้มีการขัด ยกตัวอย่างเช่น การนิวคลีโอชันของฐานรองที่ไม่ได้ขัดจะไม่เกิดขึ้นทันที เนื่องจากต้องใช้เวลาในการก่อตัวของชั้นคาร์ไบด์ เมื่อเปรียบเทียบกับฐานรองที่มีการขัดพื้นผิวจะมีความหนาแน่นของการนิวคลีโอชันมากกว่า สามารถเกิดการนิวคลีโอชันได้เร็วกว่า

การเคลือบเพชรนั้นได้ทำการทดลองสร้างทั้งบนฐานรองที่มีการขัด และไม่มีการขัดของแผ่น Pt การเคลือบของผิวประกอบด้วยชั้นของคาร์บอนที่มีความหนา 6 อังสตรอม จากนั้นเป็นชั้นฟิล์มของไฮโดรคาร์บอน โดยเพชรจะเกิดบนฐานรองที่มีการขัด ถึงแม้จะไม่ชัดเจนว่าการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวเคลียเอชันเกิดบนไฮโดรคาร์บอน หรือรอยตำหนิของคาร์บอนที่เป็นรูปของกราฟไฟท์ จากการทดลองไตรเตรชัน พบว่าไม่มีส่วนของ Pt ที่สัมผัสกับเพชรที่ก่อตัวขึ้น หรือมีเพียงเล็กน้อย และพบว่าบนฐานรองที่ไม่มีการขัดจะไม่มี การก่อตัวของเพชรขึ้น ดังนั้นการก่อตัวเริ่มจากชั้นของคาร์บอน, ชั้นของไฮโดรคาร์บอน และท้ายสุดเป็นชั้นของเพชร



รูปที่ 2-5 แสดงขั้นตอนการนิวเคลียเอชัน

การก่อตัวของคาร์ไบด์บนฐานรองตั้งแต่การเริ่มก่อตัวจนเป็นชั้นของคาร์ไบด์บนพื้นผิวของฐานรอง เกิดขึ้นระหว่างฐานรองเริ่มต้นกับการเคลือบของเพชรในภาวะแวดล้อมของการปลูกผลึกเพชรด้วยวิธีการ CVD มีหลายวิธีในการวิเคราะห์หาชั้นของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น สำหรับฐานรองที่เป็น Si และวัสดุอื่น ๆ ชั้นของคาร์ไบด์ของโมลิบดีนัมตรวจพบโดย XRD จากการเริ่มสร้างเพียงเล็กน้อย และการตรวจพบเพชรเกิดขึ้นหลังจากการสร้างเป็นเวลานาน 20 นาที โดยจากการดูด้วย SEM พบว่าผลึกมีขนาดเล็กในระดับนาโน จาก XRD บนฐานรอง W พบว่าเกิดการฟอร์มตัวของ W_2C ขึ้น และก่อนการก่อตัวของเพชรมีชั้นของ WC เกิดขึ้น นอกจากนี้ XRD ยังใช้ในการวิเคราะห์ชั้นของ Ti, HfC, NbC, TaC, Mo_2C และ WC บนฐานรองที่เป็นโลหะนั้น ๆ

จากการวิเคราะห์การปลูกผลึกของเพชรบนฐานรอง Si ที่เวลาต่าง ๆ กันด้วย XPS และ Electron loss พบว่าการก่อตัวบนพื้นผิวของ Si ด้วยวิธี FACVD จะได้ 3 ขั้นตอนด้วยกัน ในช่วง 15 นาทีแรกออกไซด์ที่มีอยู่ก่อนแล้ว และคาร์บอนจากภายนอกจะถูกกำจัดโดยอะตอมของไฮโดร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจน หลังจากนั้นเกิดชั้นของ SiC ขึ้นบนผิวของ Si ที่ย่ำสุดจะได้เพชรปกคลุมบนชั้นของ SiC โดยความหนาของชั้น SiC จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วน C/H ของก๊าซ

จากการใช้วิธี HFCVD ความหนาแน่นของการนิวเคลียเอชันมีค่าสูงกว่า และคุณภาพของผลึกบนฐานรอง Mo และ Ta ที่มีการขัดจะต่ำกว่าฐานรองที่เป็น Ni, W หรือ Si การที่ผลึกของเพชรบนฐานรอง Ni, Si และ W มีคุณภาพดีเป็นผลจากการเข้ากันได้ดีของแลทธิซ และพารามิเตอร์ของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามคุณภาพของเพชรพิจารณาจาก Raman spectrum โดยพิจารณาความกว้างของพีค ถ้ากว้างแสดงว่ามีคาร์ไบด์เกิดขึ้นมาก การที่ความหนาแน่นของการนิวเคลียเอชันมีค่าสูง และมีส่วนคาร์บอนที่มีพันธะ sp^2 บนฐานรอง Mo และ Ta ทำให้พลังงานพื้นผิวไม่เหมาะสมสำหรับการเกิดเพชร

ขั้นตอนที่ 2 การนิวเคลียเอชัน สำหรับการนิวเคลียเอชันของเพชรนั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายทางคือ

- ก) การฟอร์มตัวของนิวเคลียสบนพื้นผิวที่มีคาร์บอนอิ่มตัวยิ่ง
- ข) การนิวเคลียเอชันในก๊าซเฟส
- ค) การก่อตัวบนฐานรองที่เป็นเพชรหรือวัสดุที่มีการขัดผิว

การนิวเคลียเอชันบนฐานรองที่ไม่มีการขัดนั้นเกิดขึ้นเป็นไปตามแนว, ชั้นหรือตำหนิต่าง ๆ บนฐานรอง จากการเปลี่ยนแปลงการนิวเคลียเอชันของเพชร ทำให้เกิดการเคลือบของ BN, SiC, a-C-H, DLC(diamond-like-carbon) หรือ amorphous sp^3 bonded carbon บนฐานรองก่อนเกิดการก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรขึ้น สำหรับการสร้างที่มีอุณหภูมิของฐานรองต่ำ ๆ ในขณะขั้นตอนการนิวเคลียเอชันเริ่มต้น เป็นผลให้เกิดการเคลือบของคาร์บอนหลายชนิด ซึ่งจะเพิ่มความหนาแน่นของนิวเคลียส หรือทำให้การก่อตัวของคาร์บอนเป็นโครงสร้างของกราฟไฟท์เพิ่มขึ้นบนฐานรอง

การฟอร์มตัวของนิวเคลียสสามารถเกิดขึ้นได้ในก๊าซเฟส โดยการนิวเคลียเอชันของก๊าซเฟสของเพชรหรือกราฟไฟท์ นิวเคลียสสามารถเกิดขึ้นได้ที่คาร์บอนที่มีความอิ่มตัวยิ่ง เงื่อนไขที่ทำให้เกิดอัตราการนิวเคลียเอชันสูง อย่างเช่นความเข้มข้นของคาร์บอนที่มีค่าสูงหรืออุณหภูมิของฐานรองที่มีค่าต่ำ เป็นผลให้เกิดจุดบกพร่องของเพชรสูง โดยเฉพาะความหนาแน่นของรอยตำหนิในแนวระนาบ และการเกิดกราฟไฟท์ หรืออมอร์ฟิส เงื่อนไขดังกล่าวไม่เหมาะสำหรับการสร้างฟิล์มเพชรให้มีคุณภาพสูง การเกิดของกราฟไฟท์ทำให้เกิดการก่อตัวของคาร์บอนที่มีพันธะ sp^2 บนฐานรองซึ่งเป็นผลกระทบต่อเกิดของเพชรบนฐานรอง จากก๊าซเฟสไม่เกิดพันธะที่แข็งแรงของนิวเคลียสกับฐานรอง และไปรบกวนการสร้างชั้นฟิล์มเพชรที่เป็นไฮ โมอิพิแทกเซียลที่มีคุณภาพ

การเตรียมฐานรองจากการขัดและการใช้เม็ดเพชร ฐานรองที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรส่วนใหญ่เตรียมจากการขัดหรือการใช้เม็ดเพชรเพื่อให้เกิดการนิวเคลียเอชัน การใช้เม็ดเพชรอาจได้จากการใช้ผงเพชร, การชุบในสารละลาย และการสเปร์ย์ การขัดผิวอย่างแรงด้วยเพชรทำให้ความหนาแน่นของการนิวเคลียเอชันมีค่ามากกว่าเกือบ 7 เท่าของฐานรองที่ไม่มีการขัดของ Si ความหนาแน่นของการนิวเคลียเอชันมีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการขัดผิว และการใช้เวลาในการขัด

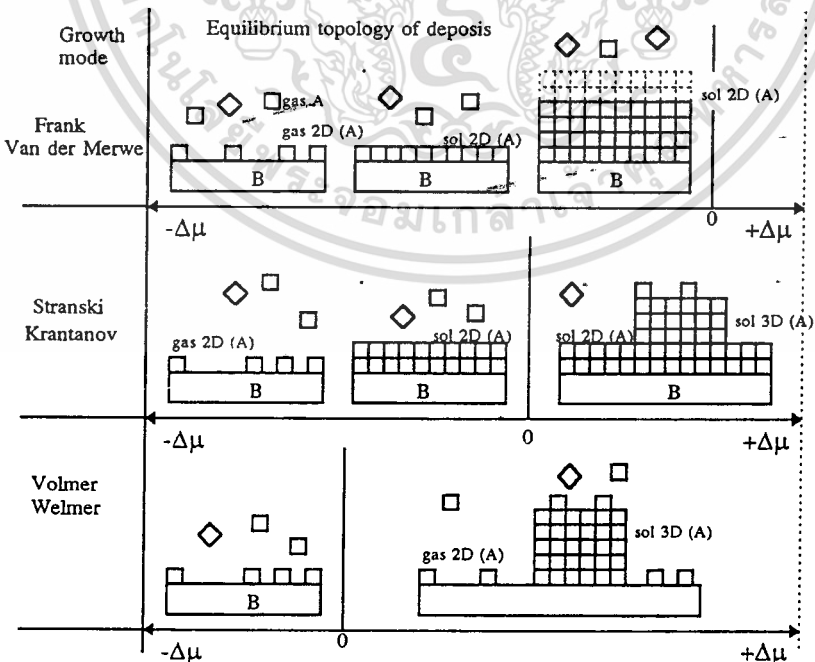
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยมีผลทำให้รูปร่างลักษณะของผลึกมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้การขัดเป็นเวลานานทำให้เกิดผลึกจำนวนมากขึ้น ส่วนการใช้เพชรเป็นฐานรองจะให้ความเสถียรของการนิวคลีโอซันไม่ขึ้นอยู่กับกลไกของรอยตำหนิของพื้นผิว การขัดฐานรองด้วยเม็ดเพชรอาจทำให้เกิดการนิวคลีโอซันเพิ่มขึ้นโดยส่วนที่เหลื่อต่าง ๆ เช่น คาร์บอนที่มีพันธะ sp^3 ที่ได้จากปฏิกิริยาของฐานรองกับเพชร หรือจากการให้ความร้อน ดังนั้นการขัดฐานรองทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนฐานรองที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไป จำนวนเพชรที่เกิดขึ้นบนฐานรอง S_i ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการขัด การเพิ่มขึ้นอย่างมากของการนิวคลีโอซันได้จากการขัดฐานรองด้วยเพชร จะใช้ได้ดีกว่าวัสดุสำหรับขัดชนิดอื่น การที่แลทธิชระหว่งฐานรองกับนิวเคลียสเข้ากันได้ จะทำให้เกิดความเสถียรของภาวะแวดล้อมในระบบ CVD

2.4.2 การสร้างชั้นอิพิแทกเซียลฟิล์ม

สำหรับตอนนี้ได้กล่าวถึงการสร้างชั้นอิพิแทกเซียลของเพชรด้วยวิธีการCVD แยกพิจารณาออกเป็นสองกรณี คือกรณีของโฮโมอิพิแทกเซียล และเฮเทอโรอิพิแทกเซียล โดยพิจารณาจากการปลูกผลึก แต่จริง ๆ แล้วเริ่มจากการนิวคลีโอซันของชั้นต่าง ๆ

เฮเทอโรอิพิแทกเซียล การสร้างชั้นอิพิแทกเซียลของเพชรสามารถสร้างได้จากทั้งฐานรองที่เป็นเพชร(โฮโมอิพิแทกเซียล) และฐานรองที่ไม่ใช่เพชร(เฮเทอโรอิพิแทกเซียล) เพชรที่มีความสำคัญต่อการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การนิวคลีโอซันและการปลูกผลึกเพชรของชั้นอิพิแทกเซียลต้องทำการควบคุมพารามิเตอร์ในการทดลองและฐานรอง โดยพิจารณาแฟกเตอร์ที่ใช้กับระบบทั่วไปของชั้นอิพิแทกเซียล และพิจารณาเฉพาะชั้นอิพิแทกเซียลของเพชร



รูปที่ 2-6 แสดงคุณลักษณะของโหมดการสร้างชั้นอิพิแทกเซียลทั้งสามชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลูกผลึกตามธรรมดาแล้วอะตอมจะเกาะบนฐานรองจาก 2-dimensional layer formation (Frank-Van der Merwe), 3-dimensional particle growth (Volmer Weber) หรือ intermedial growth regime (Stranski Krastonov) ซึ่งการสร้างเริ่มจากการเกิดเป็นชั้น และพัฒนาเป็นเกาะและอนุภาคบนชั้นที่เกิดขึ้นเริ่มแรก สำหรับคุณลักษณะของชนิดการเคลือบที่แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 2-6 พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างฐานรองที่ทำการเคลือบ และพลังงานยึดเหนี่ยว จะมีผลอย่างมากต่อความเสถียรของการเริ่มก่อตัว, รูปร่างลักษณะ และระนาบของผลึก ผลึกที่สมดุสนั้นจะมีเพียงจุดเดียวที่สัมผัสกับฐานรองโดยมีพันธะเกิดขึ้นเล็กน้อยกับฐานรอง ในขณะที่ผลึกที่เป็นแบบ truncated polyhedral รอยสัมผัสระหว่างผลึกกับฐานรองแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ซึ่งเป็นลักษณะที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวสูง เป็นการสร้างในลักษณะ 2-D เมื่อพลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ผลึกราบขึ้น

อย่างไรก็ตามจากรูปถ่าย HRTEM ของผลึก truncated polyhedral แสดงให้เห็นว่าผลึกเริ่มต้นจากจุดเดียวของการนิวเคลียสบนฐานรอง ดังนั้นพื้นผิวของฐานรองเริ่มต้นมีผลอย่างมากต่อโหมดการปลูกผลึก การเคลือบของเพชรส่วนใหญ่จะเกิดบนชั้นที่เกิดบนฐานรอง มากกว่าที่เกิดบนพื้นผิวของฐานรองเริ่มต้น การเกิดขึ้นของชั้นคาร์ไบด์ หรือไฮโดรคาร์บอนระหว่างเพชรกับฐานรอง ขณะกระบวนการ CVD ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโหมดการสร้าง ดังนั้นการทำความเข้าใจธรรมชาติของพื้นผิวระหว่างเพชรกับฐานรองแต่ละชนิดเพื่อนำไปสู่การพัฒนาชั้นเฮเทอโรอิพิแทกเซียล ได้มีการนำเสนอการสร้างฟิล์มผลึกผสมของชั้นเฮเทอโรอิพิแทกเซียลบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร รวมทั้ง Si อาศัยพื้นฐานของ HRTEM พบว่าเม็ดเพชรก่อตัวแยกเป็นชั้นเฮเทอโรอิพิแทกเซียลบนฐานรอง Si ซึ่งให้ข้อเสนอของความเป็นไปได้ของการปลูกผลึกชั้นอิพิแทกเซียลสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อแลทธิซของเพชรอย่างน้อยต้องเข้ากันได้กับระนาบของฐานรอง ถึงแม้การเข้ากันได้ของแลทธิซจะไม่ดีก็ตาม

ไฮโมอิพิแทกเซียล การสร้างชั้นเพชรที่เป็นไฮโมอิพิแทกเซียลด้วย CVD นั้น พื้นผิวของระนาบผลึกเดี่ยวที่แตกต่างกันทำให้ได้อัตราการปลูกผลึกที่แตกต่างกันอย่างมาก โดยเพชรที่มีระนาบเป็น (100) จะให้อัตราการปลูกผลึกต่ำสุด ส่วนการสร้างฟิล์มบนผลึกผสม การที่มีระนาบที่แตกต่างกันจะทำให้จำนวนการปลูกผลึกอันดับสองแตกต่างกันด้วย

จากการทดลองพบว่าคุณลักษณะการนิวเคลียสที่อุณหภูมิสูง และอัตราส่วนของ CH_4/H_2 มากกว่า 0.4 % ระนาบของผลึกที่ได้ส่วนใหญ่เป็นระนาบ(100) สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น การปลูกผลึกเป็นระนาบของ(111)จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มากกว่าระนาบ(100) หรือระนาบ(110)

2.4.3 ลักษณะพื้นผิวของเพชร

การทำความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นผิวของเพชรที่ได้จากการปลูกผลึกส่วนใหญ่ได้จากการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ของพื้นผิวที่ ultra high vacuum และการศึกษาจากทฤษฎี พื้นผิวส่วนใหญ่ของเพชรที่ทำการศึกษาก็คือเพชรในธรรมชาติที่มีระนาบ(111) และ(100) โดยพื้นผิวที่มี hydrogen terminated จะมีอำนาจสูงสุด ซึ่งหมายถึงปลายแลททิซจะมีพันธะ C-H ซึ่งประกอบด้วย sp^3 hybridization ของอะตอมคาร์บอน พื้นผิวอื่น ๆสามารถพบอะตอมอื่นอยู่ เช่น O,N,S,F และ Cl ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการปกคลุมเต็มชั้นเดียว การปกคลุมต่ำของอะตอมที่ไม่ใช่ไฮโดรเจนเป็นผลจากบริเวณผิวมีความหนาแน่นของอะตอมสูง($\sim 1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) ดังนั้นจึงเป็นการยากที่อะตอมจะมีการปกคลุมอยู่เต็มชั้นหนึ่งมากกว่าอะตอมของไฮโดรเจน การทำให้พันธะของเพชรบริเวณปลายสุดเสถียรทำได้โดยใช้อะตอมที่ไม่ใช่ไฮโดรเจน จะมีความสำคัญเมื่อใช้เทคนิคอื่นที่ไม่ใช่พื้นฐานจากไฮโดรเจน เป็นไปได้ที่การคายอะตอมไฮโดรเจนของระนาบ(100) และ (111) จะเป็น 50% และ100% ตามลำดับ ด้วยการให้ความร้อนใน UHV ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส หลังจากการคายอะตอมไฮโดรเจน การสร้างใหม่ของพื้นผิวจะพบระนาบพื้นผิวเป็น(111) (อุณหภูมิมากกว่า 950 องศาเซลเซียส) และเป็นระนาบ(100) (อุณหภูมิมากกว่า 1000 องศาเซลเซียส การสร้างใหม่ของพื้นผิวพิจารณาจากอัตราส่วนของ half-order LEED pattern ของอันดับแรก ในพื้นผิวที่สร้างใหม่จะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่มีพันธะไม่ครบเกิดขึ้น(dangling bond) อยู่ในรูปลูกโซ่ของพันธะ pi และเป็นแนวระหว่างพื้นผิวของอะตอมคาร์บอน จากการศึกษาด้วย LEED และ Auger carbon KVV lineshape แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของพื้นจะถูกทำลายได้โดยง่ายจากการชนด้วยอิเล็กตรอนและไอออน ทำให้ยากต่อการทำให้พื้นผิวเป็นระเบียบที่ดีสำหรับการศึกษาต่าง ๆ จนปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลสำหรับโครงสร้างและองค์ประกอบของการปลูกผลึกระหว่างผิว แต่สามารถสันนิษฐานได้ว่าการสร้างใหม่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวที่คาร์บอนมีพันธะ sp^3 ที่มีไฮโดรเจนเป็นอะตอมปลายสุด และพื้นผิวคาร์บอนที่มีเฉพาะพันธะ sp^2 ธรรมชาติของผิวนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเนื้อสาร และการเปลี่ยนแปลงของอะตอมที่ไปยังพื้นผิวของฐานรองและออกจากพื้นผิวของฐานรอง

2.4.4 คุณลักษณะแวดล้อมของก๊าซที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม

การวิเคราะห์เทคนิคที่แบ่งความแตกต่างของคุณลักษณะออกเป็น In Situ และ Ex Situ เทคนิค In Situ เป็นการวัดคุณสมบัติโดยตรง (เช่น อุณหภูมิ) ในภาวะแวดล้อมของกระบวนการและมีการรบกวนน้อยสุด สำหรับเทคนิค Ex Situ เป็นเรื่องเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณลักษณะของก๊าซหรือวัสดุที่ใช้ บางทีจะเกี่ยวกับเครื่องมือที่ง่ายกว่า แต่ที่สำคัญเป็นการวิเคราะห์ที่ต้องอาศัยการประมาณเพื่อหาเงื่อนไขที่แท้จริงในการปลูกผลึก

การวิเคราะห์ In Situ การวิเคราะห์เริ่มต้นของภาวะแวดล้อมของการปลูกผลึกเพชรที่ประกอบด้วย H_2 , CH_4 และก๊าซที่เบาบางได้จากการสังเกตการเปล่งแสงจากการกระตุ้นใน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเวฟ และ DC plasma OES (optical emission spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบการเปล่งแสงจากสถานะการกระตุ้นของ C, C₂, H, CH, CH₂ และ H₂ โดย OES มีความไวต่อการตรวจสอบ เนื่องจากธรรมชาติของการกระตุ้นมีความซับซ้อน ทำให้ความเข้มที่เปล่งออกมาของแสงสามารถบอกได้เพียงว่าก๊าซมีองค์ประกอบทางเคมีอะไรบ้าง เนื่องจาก OES มีความไวต่อการตรวจสอบทำให้การใช้ข้อมูล OES เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอในการมองเห็นภาพปฏิกิริยาเบื้องต้นของกระบวนการ CVD ดังนั้นจึงมีการใช้ infrared diode laser absorption spectroscopy เช่นการหาอนุผลของก๊าซระหว่าง hot filament และพื้นผิวของฐานรองที่ทำการสร้างฟิล์ม โดยพิจารณาจากการสะท้อนอย่างทวีคูณของลำแสง IR

การวิเคราะห์ Ex Situ จากการวิเคราะห์ด้วย mass spectrometric จะได้ว่าบริเวณใกล้เคียงกับพื้นของการปลูกผลึกด้วยวิธี FACVD อนุผลของก๊าซจะมีความเสถียร โดยอนุผลหลักที่พบได้แก่ CH₄/H₂ ซึ่งเป็นส่วนผสมของ CH₄ และ C₂H₂ นอกจากนี้ mass spectroscopy ยังสามารถตรวจพบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก

กล่าวโดยสรุป อนุผลหลักที่พบในภาวะแวดล้อมของการปลูกผลึกเพชรจะประกอบด้วยไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน คือ H₂, H, CH₄, CH₃, C₂H₂ และ C₂H₄ นอกจากนี้ยังมีการพบ C₂H₆, C₂H₄ และ ไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 3 อะตอมหรือมากกว่า ใน plasmas การเปล่งของแสงจะสังเกตได้จาก C, C₂, CH, CH₂, H, H₂ และพบสารเจืออื่น ๆ เมื่อมีการใช้รีเอเจนต์ที่เป็นออกซิเจน หรือออกซิเจนในรูปสารประกอบออกแทนิก เช่น CO, H₂O และ OH ก็สามารถสังเกตเห็นความเข้มข้นของ CH₄, C₂H₂, C₂H₄ และ CH₃ ที่อยู่ในภาวะแวดล้อมของการปลูกผลึก จะมีความเข้มข้นมากพอสำหรับการสังเกตอัตราการเคลือบ จากการทดลองพบว่าอนุผลของ CH₃ เป็นอนุผลของก๊าซหลักที่ใช้ในการปลูกผลึกเพชร

2.4.5 แบบจำลองของก๊าซที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม

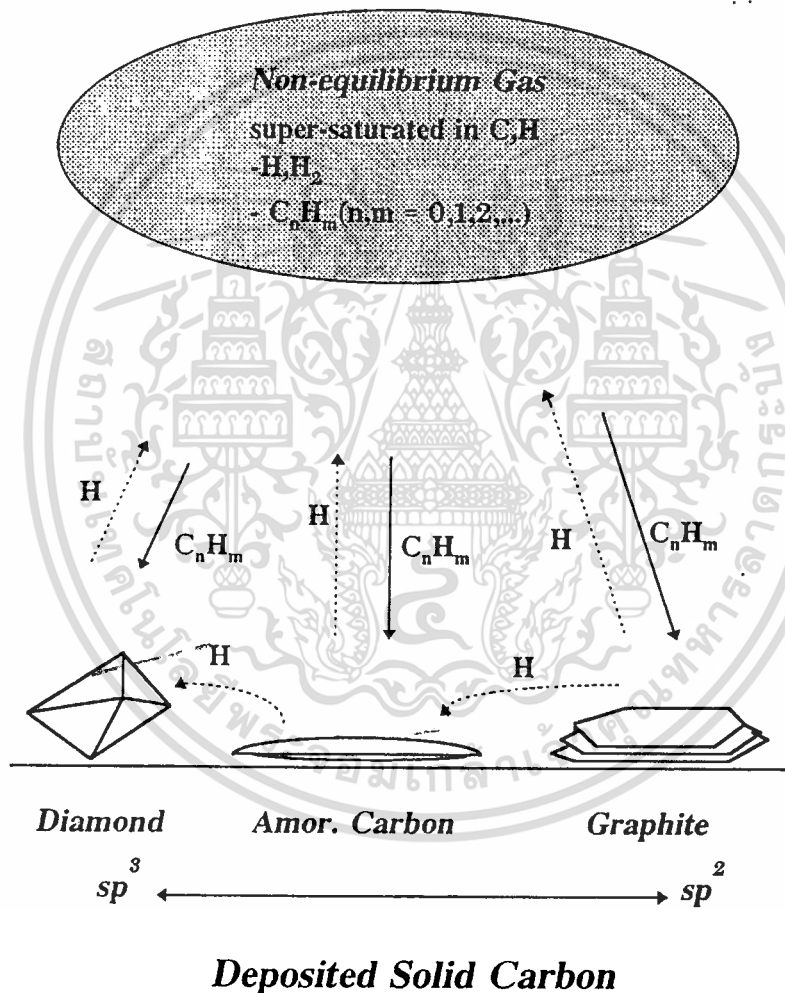
ลักษณะก๊าซที่ภาวะสมดุล จากที่ผ่านมาการกระตุ้นด้วย hot filament, plasma หรืออื่น ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซเฟส ยกตัวอย่างการตรวจวัดความเข้มข้นของ acetylene ที่ได้จากรีเอเจนต์มีเทน หรือ ความเข้มข้นของมีเทนที่ได้จากรีเอเจนต์ acetylene ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดภายใต้ภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากภาวะแวดล้อมของ CVD ของเพชรเกี่ยวข้องกับคาร์บอน และอัตราการส่งผ่านของอนุผลก๊าซเป็นสำคัญ ทำให้ภาวะแวดล้อมของก๊าซไม่เข้าสู่ภาวะสมดุลของเทอร์โมไดนามิค แม้จะเป็นบริเวณที่มีการกระตุ้นหรือบริเวณใกล้กับพื้นผิวที่มีการปลูกผลึก จากการคำนวณภาวะสมดุลที่ความดัน 20 ทอร์ ของส่วนผสมของ CH₄ ใน H₂ 0.5% ตลอดช่วงอุณหภูมิ 1000 ถึง 3000 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของแบบจำลองที่สมดุลสำหรับไฮโดรคาร์บอน CH₄, C₂H₂, CH₃ และ C₂H₄ มีจำนวนเพียงพอ พิจารณาอัตราการเคลือบเพชรในขณะที่ความหนาแน่นของ CH, CH₂, C₂ และ C₃ มีค่าต่ำกว่าที่จะเกิดการปลูกผลึกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณที่แตกต่างกันระหว่างผลทางเทอร์โมไดนามิก และที่สังเกตได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นความสำคัญของปฏิกิริยาของก๊าซ ในกระบวนการส่งผ่านและการเคลื่อนไหว นอกจากนี้ การวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกแสดงให้เห็นว่าอัตราการเคลือบแปรผันตามความอึดตัวของคาร์บอน และการกระจายของคาร์บอนในก๊าซเฟส และการเพิ่มขึ้นของอัตราการเคลือบฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน

Dynamic Balance Model



รูปที่ 2-7 แสดงคุณลักษณะแบบจำลองของ CVD เพชรซึ่งมีการเคลือบด้วยคาร์บอนในรูปแบบของแข็งหลายชนิด กับอะตอมของไฮโดรเจนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงภายใน หรือการกำจัดลักษณะของพันธะพื้นผิวที่แตกต่างกันออก (sp , sp^2 และ sp^3) คุณภาพของเพชรพิจารณาจากการเข้าสู่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกระหว่างการเคลือบและกระบวนการเกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะก๊าซขณะเคลื่อนไหว การวิเคราะห์ความซับซ้อนของภาวะแวดล้อมของ CVD ของเพชร ต้องทำความเข้าใจการควบคุมการเคลื่อนไหวของรีแอกตีฟของอนุภาคก๊าซที่เกิดขึ้นใหม่, อัตราการเกิดปฏิกิริยา, และการเปลี่ยนแปลงภายในรีแอกเตอร์ อนุภาคของก๊าซที่พบในก๊าซเฟส และบริเวณใกล้กับพื้นผิว แสดงให้เห็นว่าช่วงชีวิตทางเคมีของรีแอกตีฟ มีเวลานานกว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งผ่านไปยังพื้นผิว

แบบจำลองของก๊าซขณะเคลื่อนไหวของกระบวนการ CVD เพชร จะบังคับให้มีอนุภาคของก๊าซที่มีคาร์บอนเพียงหนึ่งอะตอม และต้องการความเข้มข้นของอะตอม H สูง ได้มีการแนะนำกระบวนการเคลื่อนไหวของอนุภาคจะไม่มีความไวต่อการปลุกผลึก แต่สามารถทำให้มีความไวได้โดยการกำหนดค่าพลังงานพันธะของโมเลกุล นอกจากนี้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แท้จริงจะใช้ในการออกแบบจำลองการเคลื่อนไหวของ FACVD แบบจำลองของการเคลื่อนไหวใช้ในการแปลความหมายจาก mass spectrometric ที่ใช้ตรวจวัด CH_4 และ C_2H_2 ใน FACVD ของเพชร แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นอัตราการเคลื่อนไหวจะได้รับการคำนวณความเข้มข้นของ CH_4 , C_2H_2 , CH_3 หรือ C_2H_4 ต่อมาได้มีการออกแบบจำลองในทำนองเดียวกันในการพิสูจน์หา H และความเข้มข้นของ CH_3 ที่ได้จาก C_2H_4 และ C_2H_6 เนื่องจากปฏิกิริยาของ CH_3+H_2 เพื่อเกิด CH_4+H พบว่าเข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็ว การวัดความเข้มข้นของ H_2 , CH_4 และ CH_3 ใช้ในการพิจารณาอะตอมของไฮโดรเจน

2.4.6 แบบจำลองการปลุกฟิล์มเพชร

การเข้าสู่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิก แบบจำลองแรกที่ใช้ในการอธิบายการปลุกผลึกเพชร ซึ่งตรงข้ามกับของกราฟไฟท์ และรูปแบบของคาร์บอนอื่น ๆ เป็นแบบจำลองขนาดใหญ่อยู่บนพื้นฐานของการเคลื่อนไหวจากก๊าซผสม ที่มีคาร์บอนอิมิตัวยิ่ง และอะตอมของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิของฐานรองที่ใช้ในการปลุกผลึก ภาวะแวดล้อมของการปลุกผลึกพิจารณาในลักษณะเข้าสู่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกระหว่างการเคลื่อนไหวของคาร์บอน และกระบวนการกำจัดฟอรัมตัวเป็นของแข็งของคาร์บอน แบบจำลองอย่างง่ายดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2-7 ความอิมิตัวยิ่งของคาร์บอนทำให้ได้องค์ประกอบที่เป็นของคาร์บอนหลายชนิด รวมทั้งเพชร ในขณะที่อะตอมของไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นรีแอกตีฟในภาวะแวดล้อมเพื่อลดการฟอรัมตัวของคาร์บอนที่ไม่เป็นเพชรด้วยการกำจัดคาร์บอนที่เป็นของแข็ง และ/หรือการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวที่มีพันธะ sp^2 ให้เป็น sp^3 แบบจำลองมหภาคดังกล่าวนี้ไม่สามารถวิเคราะห์รายละเอียดของก๊าซ หรือกลไกของพื้นผิวจากการเคลื่อนไหวของเพชรได้ แต่ก็มีประโยชน์ในการช่วยในการอธิบายเหตุผลซึ่งสามารถใช้ได้กับภาวะแวดล้อมในการปลุกผลึกโดยทั่วไป ยกตัวอย่าง อัตราการเคลื่อนไหวที่สูงกว่า และความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ไม่เป็นเพชร และค่าหนีของผลึกจะสังเกตพบที่ความเข้มข้นรีแอกแตนต์ไฮโดรคาร์บอนมีค่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

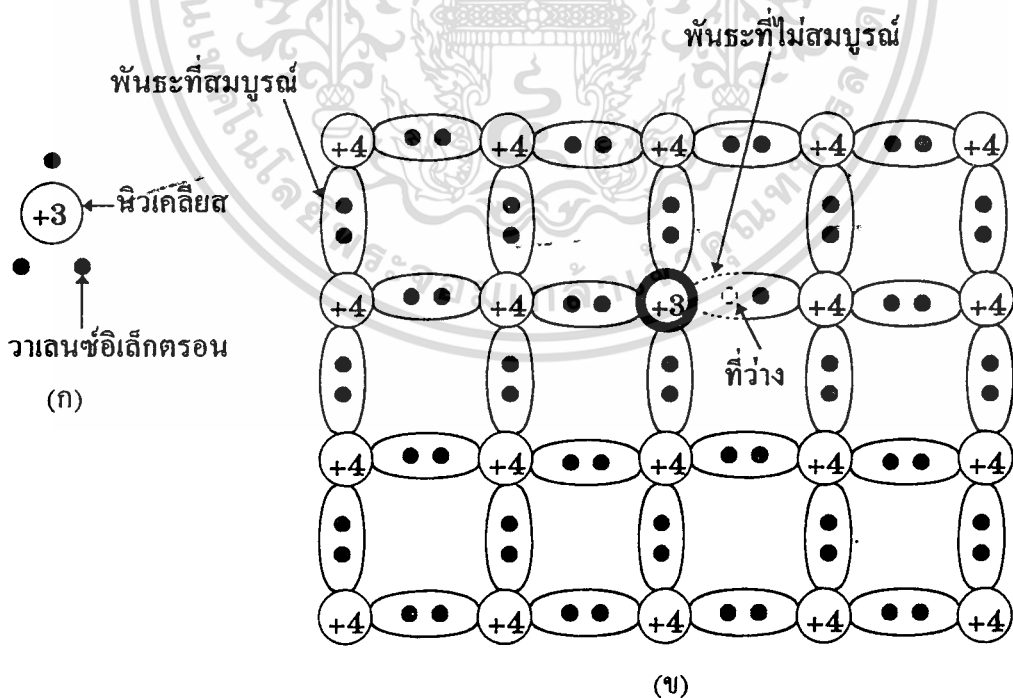
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทำให้ได้ความอิมพัลซิงของคาร์บอนที่มากกว่า นอกจากนี้แบบจำลองยังแนะนำการกำจัดอนุภาคของก๊าซ เช่น OH หรือ hologen เพื่อทำให้ได้เพชรที่มีคุณภาพสูง

2.5 การเติมอะตอมสารเจือ

สารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกนั้น ตามความเป็นจริงแล้วจะถูกนำไปใช้ในการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ(semiconductor devices) ได้น้อยมาก เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกมีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำ และมีค่าคงที่ สำหรับแต่ละชนิดของธาตุสารกึ่งตัวนำ สภาพความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงได้ก็เฉพาะในกรณีที่ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน หรือแสง เป็นต้น ดังนั้นการควบคุมค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกจึงกระทำได้ยากและลำบาก นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความนำโดยวิธีนี้ยังทำได้เฉพาะในช่วงแคบ ๆ เท่านั้น

การที่จะนำสารกึ่งตัวนำไปใช้งานสำหรับการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการควบคุมการเติมสารเจือ(impurity) ลงในสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ หรือที่เรียกว่า สารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกนี้ เมื่อถูกเติมด้วยสารเจือแล้วจะทำให้สภาพความนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้มากน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเจือที่เติมลงไป และสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยสารเจือนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำเอกทรีนซิก ซึ่งมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ เนื่องจากมีบทบาทอย่างยิ่งต่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ธาตุที่เป็นสารเจือ ซึ่งใช้สำหรับเติมลงไปใน



รูปที่ 2-8 (ก) แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของอะตอมสารเจือชนิดพี และ

(ข) แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมของสารเจือชนิดพี และอะตอมสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำที่สำคัญคือ ธาตุในกลุ่มที่ III และ V ของตารางคาบ และการควบคุมการเติมสารเจือนี้เรียกว่า การโด๊ป(doping) ปริมาณของสารเจือที่เติมลงไปในสารกึ่งตัวนำมีจำนวนน้อยมาก แต่จะมีผลทำให้ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยสารกึ่งตัวนำเอ็ก ทรินซิกถูกแบ่งออกได้เป็นสองชนิด คือ ชนิดเอ็น(n-type) และ ชนิดพี(p-type) สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวเฉพาะการเติมอะตอมสารเจือให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เนื่องจากการสร้างสารกึ่งตัวนำเพชรที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี

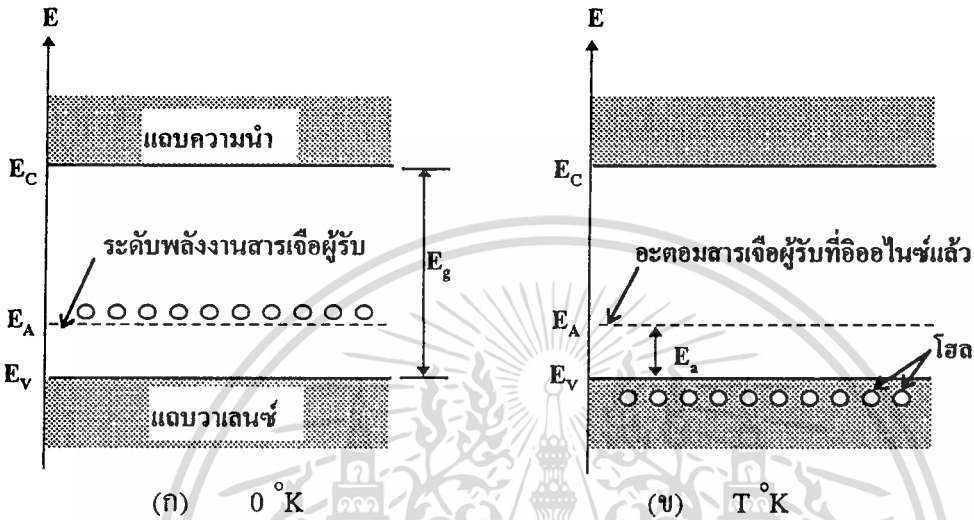
สำหรับสารเจือซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มที่ III ของตารางคาบ เช่น โบรอน(B), อะลูมิเนียม(Al), อินเดียม(In) หรือ แกลเลียม(Ga) เมื่อถูกเติมลงไปในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิกแล้ว จะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำเอกทรินซิก ซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีโดยมีโฮลซึ่งเป็นพาหะที่มีประจุบวกเกิดขึ้นที่แถบวาเลนซ์เป็นจำนวนมาก สารกึ่งตัวนำเอกทรินซิกชนิดนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารเจือประเภทนี้เรียกว่า สารเจือผู้รับ(acceptor impurity) หรือสารเจือชนิดพี แต่ละอะตอมของสารเจือชนิดพีจะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่ 3 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2-8(ก)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออะตอมสารเจือเหล่านี้ถูกเติมลงไปในสารกึ่งตัวนำ โควาเลนต์พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของสารเจือและสารกึ่งตัวนำจะมีอยู่พันธะหนึ่งที่ไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากขาดอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ดังในรูปที่ 2-8 (ข) ที่ว่างที่เกิดขึ้นในพันธะดังกล่าวนี้เรายังไม่ถือว่าเป็นโฮล แต่หากเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเซลวิน อิเล็กตรอนจากพันธะข้างเคียงที่สมบูรณ์สามารถที่จะเข้าแทนที่ที่ว่างดังกล่าวนี้ได้โดยง่าย จึงทำให้เกิดโฮลขึ้นในพันธะที่สูญเสียอิเล็กตรอน นั่นก็คือ การเกิดโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ การเคลื่อนที่ของโฮลนี้จะทำให้เกิดกระแสขึ้นได้เนื่องจากเราพิจารณาว่า โฮลเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าชนิดบวก มีค่ามวลที่แท้จริง m_h^* และคล้ายกับว่าโคจรอยู่รอบ ๆ ประจุลบที่อยู่กับที่ด้วยวงโคจรที่กว้าง ดังนั้นค่าของพลังงานที่จะทำให้อะตอมของสารเจือชนิดนี้ไอออไนซ์(คือรับอิเล็กตรอนเข้ามา) ได้ก็สามารถหาได้เช่นเดียวกับเมื่อตอนที่แล้วมา เพียงแต่ค่ามวลที่แท้จริงต้องแทนด้วย m_h^* ซึ่งเป็นของโฮลและจะได้ค่าทั่ว ๆ ไปราว 0.01 eV การที่อะตอมสารเจือชนิดนี้สามารถรับอิเล็กตรอนเข้ามาได้จึงถูกเรียกว่าเป็น "สารเจือผู้รับ" เมื่อเขียนเป็น โครงสร้างแถบพลังงานจะเห็นว่าอะตอมสารเจือจะทำให้เกิดระดับพลังงานอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์เล็กน้อยดังในรูปที่ 2-9(ก) คือระดับ E_A ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเซลวิน อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ก็สามารถมีพลังงานมากพอและเข้าไปอยู่ในระดับ E_A ได้ ทั้งให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ดังในรูปที่ 2-9(ข)

ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเห็นว่าไม่มีการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีนี้จึงประกอบด้วยประจุพาหะของโฮลเป็นจำนวนมาก และในตอนนี้จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีประจุพาหะจำนวนไม่เท่ากัน กล่าวคือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะมีอิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมาก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก ประจุพาหะที่มีจำนวนมากเราจะเรียกว่าเป็น "พาหะส่วนมาก" (majority carriers) และประจุพาหะที่มี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนน้อยกว่าเราจะเรียกว่าเป็น "พาหะส่วนน้อย" (minority carriers) จากการนิยามเช่นนี้ทำให้เราสรุปได้ว่า พาหะส่วนมากของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นคืออิเล็กตรอน และพาหะส่วนมากของสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือ โฮล สำหรับพาหะส่วนน้อยของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นคือ โฮล และพาหะส่วนน้อยของสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็คือ อิเล็กตรอน



รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเมื่อ
 (ก) อุณหภูมิ 0 องศาเซลวิน (ข) อุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเซลวิน

ในการสร้างสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพีนั้น จะทำการเจือสารเจือด้วยอะตอมของโบรอน จากการศึกษาลักษณะทางเรขาคณิต และพิจารณาถึงพลังงานของโบรอน พบว่าโบรอนเป็นธาตุชนิดเดียวที่สามารถโคปลงไปในเพชรได้ โดยไม่รบกวนแลทธิซ พลังงานกระตุ้นของโบรอนในโครงสร้างของเพชรนั้นจะมีค่า 0.37 eV สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD โดยมีแหล่งจ่ายเป็น B_2H_6 , B_2O_3 หรือ แหล่งจ่ายที่เป็นของแข็งอื่น ๆ ทำให้ได้ฟิล์มเป็นชั้นโฮโมอิพิเทกเซียล และมีลักษณะเป็นผลึกรวม สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอนน้อย ทำให้พลังงานกระตุ้นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ 0.37 eV เป็นผลให้มีพลังงานกระตุ้นบางส่วนเท่านั้นที่สามารถพบได้ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับฟิล์มที่มีการโคปค่าสูง ๆ (10^{19} - 10^{20} cm^{-3}) จะได้พลังงานกระตุ้นรวมมีค่าต่ำประมาณค่า 0.002 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 รอยต่อ

2.6.1 รอยต่อโอห์มมิก

การพิจารณาคุณลักษณะของกระแส-แรงดันอย่างหนึ่งของรอยต่อโอห์มมิก คือ การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ หรืออุปกรณ์ บริเวณที่เกิดรอยต่อ ส่วนใหญ่จะพิจารณาจากสภาพต้านทานไฟฟ้ามากกว่าที่จะพิจารณาจากคุณลักษณะของรอยต่อ โดยความเป็นเชิงเส้นของคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน ไม่ใช่สิ่งที่สำคัญที่แสดงว่ารอยต่อที่ได้เป็นรอยต่อโอห์มมิก ซึ่งความต้านทานของรอยต่ออาจมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานของชิ้นสาร หรืออุปกรณ์ รวมทั้งรอยต่อต้องไม่มีการฉีดพาหะส่วนน้อย และต้องมีความเสถียรทั้งทางไฟฟ้าและทางกล

ความสำคัญของคุณลักษณะรอยต่อโอห์มมิก คือ ความต้านทานจำเพาะ(ค่าความต้านทานคูณด้วยพื้นที่) รอยต่อโอห์มมิกที่ดีควรมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำกว่า $10^{-7} \Omega\text{-m}^2$ ความต้านทานจำเพาะ R_c สามารถหาได้จากการวัดความต้านทานรวมของรอยต่อรูปวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d บนสารกึ่งตัวนำที่มีความหนา t และสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ความต้านทานรวม R_{tot} หาได้จาก

$$R_{tot} = \frac{\rho}{\pi d} \tan^{-1}(4t/d) + \frac{4R_c}{\pi d^2} + R_0 \quad (2-1)$$

โดยที่ R_0 เป็นความต้านทานของรอยต่อด้านหลัง

การสร้างรอยต่อ โอห์มมิกของแต่ละห้องปฏิบัติการจะมีวิธีเฉพาะในการใช้โลหะหรืออัลลอย โดยเฉพาะวิธีการเคลือบ และรูปแบบของการให้ความร้อน แต่วิธีทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับหลักการอย่างใดอย่างหนึ่งจาก 3 ข้อดังต่อไปนี้

ก). ถ้าสารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่เป็นไปตามการประมาณด้วยทฤษฎีของ Mott [$\phi_0 = \phi_m - \chi_s$] เป็นไปได้ที่จะสร้างรอยต่อโอห์มมิก โดยหาโลหะที่มีฟังก์ชันงาน(work function) ต่ำกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานสารกึ่งตัวนำพี โชนิกไมเคิลที่มีโลหะไมเคิลชนิดที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ถ้ามีโลหะที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงจะเป็นผลให้รอยต่อที่ได้เป็นรอยต่อแบบเรคตีไฟเออร์ที่มีความสูงของกำแพงต่ำ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจใช้เป็นรอยต่อโอห์มมิกได้

ข). พาหะส่วนใหญ่ของรอยต่อโอห์มมิกขึ้นอยู่กับหลักการที่ว่าสารกึ่งตัวนำที่มีการ โด๊ป มาก ๆ ที่อยู่ติดกับโลหะต้องเป็นชั้นบาง เป็นผลให้บริเวณปลอดพาหะมีความแคบ ทำให้เกิดการปล่อยสนามไฟฟ้าขึ้น และความต้านทานของรอยต่อมีค่าต่ำมาก ๆ ที่การไบแอสเป็นศูนย์

ค). ถ้าพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำถูกทำลาย (ยกตัวอย่าง การเกิดรอยขีดข่วนบนผิว) หรือตำหนิที่เกิดขึ้นบนผลึก ซึ่งเป็นผลให้ประพุดิตัวเป็นจุดศูนย์กลางของการรวมตัวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว มี

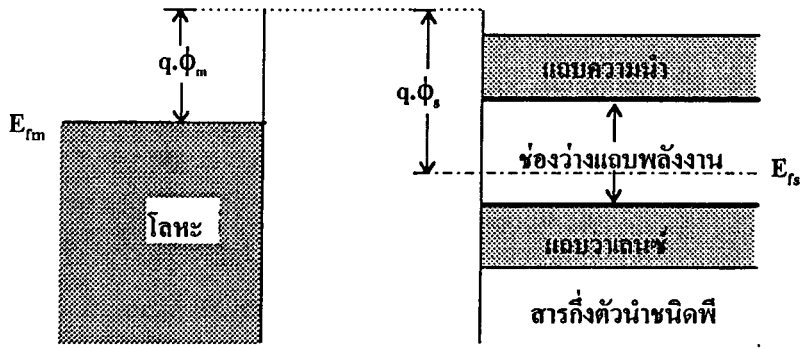
ค่ามากพอ ทำให้การรวมตัวบริเวณปลอดพาหะเป็นกลไกหลักที่มีผลต่อความนำไฟฟ้า และเป็นผลที่สำคัญต่อการลดลงของความต้านทานของรอยต่อ

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเพชร การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้กาเวเงิน หรือพื้นผิวที่เสียหาย และ ทังสเดนโพรบ ในการทำรอยต่อเพื่อจ่ายกระแสสูง พบว่าโลหะดังกล่าวแสดงรอยต่อแบบโอห์มิก ในบางครั้งมีการเผาเพื่อลดความต้านทานของรอยต่อ นอกจากนี้รอยต่อของอินเดียมกับเพชรยังเป็นรอยต่อแบบโอห์มิก แต่อย่างไรก็ตามอินเดียมเป็นโลหะที่ไม่เหมาะสำหรับการศึกษาคคุณสมบัติที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีจุดเดือดต่ำ ต่อมาจึงได้มีการวิจัย และเสนอโลหะที่มีจุดเดือดสูง เพื่อนำมาใช้ในการสร้างรอยต่อแบบโอห์มิก โลหะที่มีการนำมาใช้ คือ Ti, Ta, N, Mo, และ Au ในการใช้งานนั้นรอยต่อจะประกอบด้วยชั้นของ Ti หนา 100-150 Å ตามด้วยชั้นของ Au หนา 1500 Å หลังจากนั้นเพื่อให้เป็นรอยต่อแบบโอห์มิกได้มีการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 885 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8-16 นาที ในบรรยากาศของไฮโดรเจน จากข้างต้นเป็นตัวอย่างหนึ่งของการสร้างรอยต่อแบบโอห์มิก นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นอีกที่ใช้การสร้างรอยต่อโอห์มิกบนพื้นผิวของเพชร

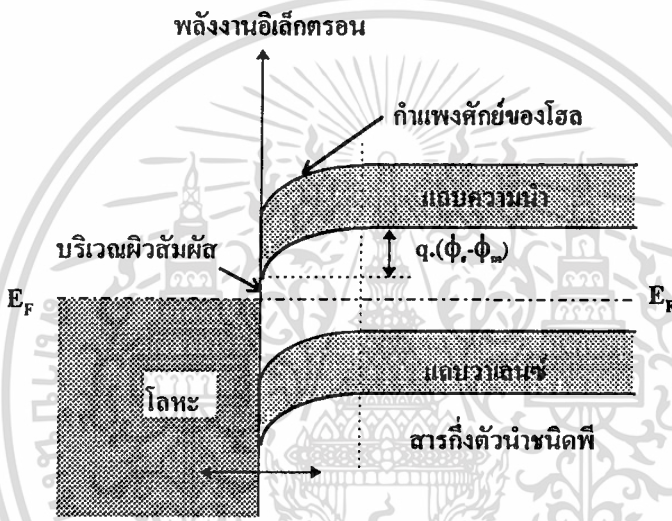
2.6.2 รอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ

การวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ หรือการนำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำไปประกอบใช้งานกับสิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่น จำเป็นต้องสร้างรอยสัมผัสขึ้น โดยรอยสัมผัสต้องไม่ทำให้สมบัติของอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เลย ดังนั้นรอยสัมผัสต้องมีค่าความนำสูงไม่มีผลที่เกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส และรอยสัมผัสซึ่งมีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ เรียกว่า รอยสัมผัสโอห์มิก ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.6.1 โดยทั่วไปรอยสัมผัสโอห์มิกนี้สร้างขึ้นโดยอาศัยการสัมผัสกันระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำ และโลหะ รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำอาจไม่ใช่รอยสัมผัสโอห์มิกก็ได้ บางครั้งอาจแสดงคุณสมบัติในการเรกติไฟเออร์ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่สัมผัสกัน นอกจากนี้จะเห็นว่าไม่ว่ารอยสัมผัส หรือรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จะมีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก หรือรอยสัมผัสแบบเรกติไฟเออร์ก็ตาม ต่างก็ถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสารกึ่งตัวนำเพชรที่ทำการสังเคราะห์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นในตอนนี้จะพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติของรอยต่อที่ถูกสร้างขึ้นระหว่างโลหะ และ สารกึ่งตัวนำชนิดพี

ถ้าสมมติให้ฟังก์ชันงาน(work function)ของโลหะ (ภาคผนวก ข) คือ ϕ_m และมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ϕ_s ดังนั้นลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดพี สามารถพบพิจารณาได้ดังรูปที่ 2-10(ก) และเมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังกล่าวมาสัมผัสกัน เนื่องจากค่าของฟังก์ชันงานของสารทั้งสองไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดมีการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองนี้จนกระทั่งในที่สุดอยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งการถ่ายเทประจุพาหะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2-10 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีในขณะ
(ก) ก่อนสัมผัส (ข) ภายหลังจากสัมผัส ในกรณีที่ $\phi_m < \phi_s$

ลงในภาวะนี้ ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดอยู่ที่ระดับเดียวกัน ผ่านตลอดรอยสัมผัส ในรูปที่ 2-10(ข) ปรากฏการณ์ที่กล่าวมานี้อธิบายได้ว่า เนื่องจากอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ไหลผ่านรอยต่อเข้าไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้เกิดมีไอออนลบของอะตอมสารเจือผู้รับขึ้นที่สารกึ่งตัวนำ และเกิดมีประจุบวกขึ้นทางด้านโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่บริเวณรอยต่อ สนามไฟฟ้างี้ดังกล่าวจะมีทิศทางต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮล และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งในที่สุดสามารถหยุดยั้งการแพร่ของโฮลได้ สนามไฟฟ้าที่ช่วยต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลนี้สามารถเขียนให้ได้ชัดเจนโดยการงอโค้งลงของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะ ซึ่งมีความหมายว่าเกิดมีกัมพวงศักย์เกิดขึ้นที่รอยต่อ โดยมีการสะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยกำแพงศักย์มีความสูง $q(\phi_s - \phi_m)$ ดังแสดงในรูปที่ 2-10 (ข) ดังนั้นในภาวะสมดุลความร้อนจึงไม่มีกระแสใด ๆ ไหลผ่านรอยต่อนี้

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบแอสโดยทางด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับทางด้านโลหะ จะทำให้ระดับพลังงานทุกระดับในสารกึ่งตัวนำมีค่าลดลงจากภาวะเดิมด้วยปริมาณ qV อิเล็กตรอนโวลท์ (V คือแรงดันไบแอสที่ให้แก่อรอยต่อ) ดังนั้นความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างกว่าเดิม ในภาวะนี้ถือว่ารอยต่อได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ กระแสโฮลจากสารกึ่งตัวนำที่จะไหลไปยังโลหะจะถูกขัดขวางไว้ด้วยกำแพงศักย์ที่มีขนาดความสูงมาก อย่างไรก็ตามก็จะมีกระแสของโฮลบางส่วนจากโลหะสามารถไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำได้ โดยที่ปริมาณของกระแสไม่เกี่ยวข้องกับแรงดันไบแอส แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่รอยต่อ ซึ่งเราอาจเรียกว่าเป็นกระแสรั่วของรอยต่อ

ส่วนในกรณีของการให้แรงดันไบแอสตรงแก่อรอยต่อ กล่าวคือ ทางด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับทางด้านโลหะ กรณีนี้จะทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อมีขนาดลดลง และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะก็จะมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นจึงทำให้มีกระแสของโฮลเป็นจำนวนมากไหลจากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยต่อเข้าไปทางด้านโลหะ ดังนั้นเราจึงเห็นได้ชัดเจนว่า รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่ง $\phi_m < \phi_s$ จะมีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ได้เช่นเดียวกับรอยต่อพี-เอ็นโดยทั่วไป คือ ยอมให้กระแสผ่านในกรณีที่ เป็นไบแอสตรงเท่านั้น ในการวิเคราะห์รอยตอดังกล่าวนี้ อาจทำได้ง่าย ๆ โดยพิจารณาว่าโฮลจากโลหะที่จะไหลไปยังสารกึ่งตัวนำได้จะต้องข้ามความสูงของกำแพงศักย์ qV_B ดังนั้นที่อุณหภูมิ T ความหนาแน่นของกระแสโฮลจากโลหะไหลไปยังสารกึ่งตัวนำแสดงได้โดย

$$J_{ms} \propto \exp(-qV_B/kT) \quad (2-2)$$

และนอกจากนี้โฮลจากสารกึ่งตัวนำที่ไหลไปยังโลหะได้ จะต้องข้ามความสูงของกำแพงศักย์ $q(V_B - V)$ ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า qV_B ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของการไบแอส หรือก็คือ เครื่องหมายของ V นั่นเอง ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสโฮลจากสารกึ่งตัวนำไหลไปยังโลหะแสดงได้โดย

$$J_{sm} \propto \exp(-q(V_B - V)/kT) \quad (2-3)$$

และไม่คิดถึงผลของการฉีดพาหะส่วนน้อยคือ อิเล็กตรอนแล้ว ค่าของความหนาแน่นของกระแสรวมที่รอยต่อนี้คือ ผลต่างของกระแสโฮลทั้งสองกระแส นั่นก็คือ

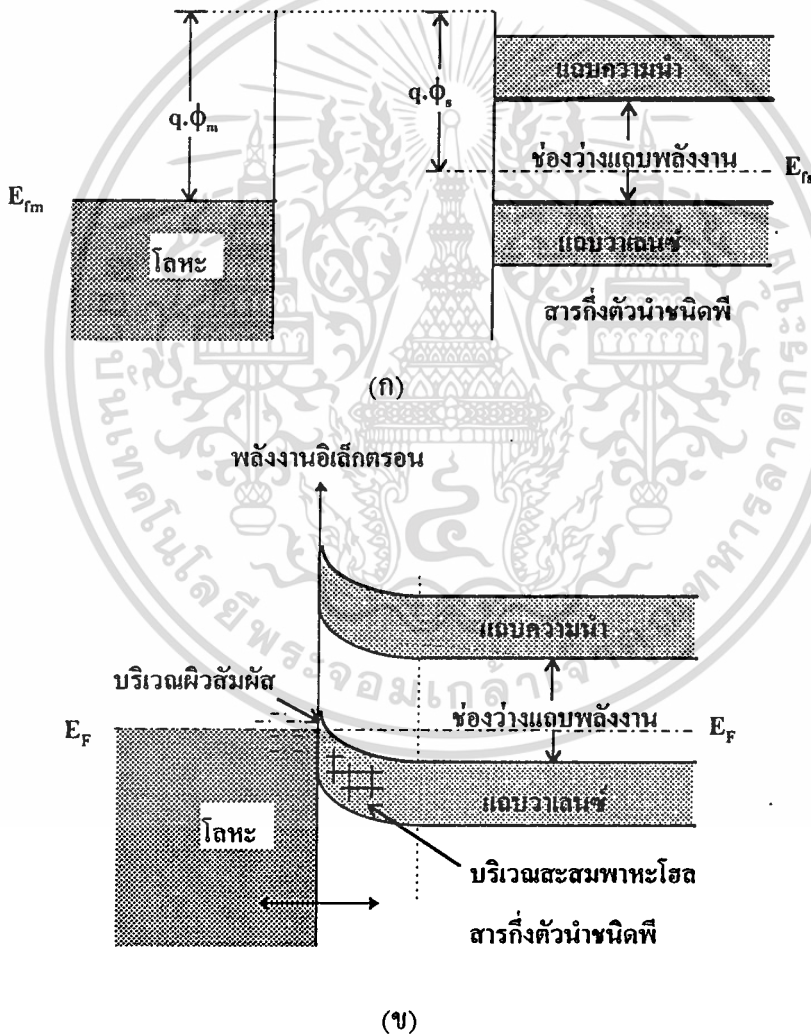
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_{total} \propto \exp(-q \cdot V_B / kT) \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

โดยที่ V_B เป็นกำแพงศักย์ที่รอยต่อขนะสมดุลย์

V เป็นแรงดันไบแอสภายนอกที่ให้แก่อรอยต่อ

เมื่อพิจารณาสมการ(2-4) จะเห็นว่ามิลักษณะเหมือนกับสมการของไดโอด สำหรับรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นลักษณะคุณสมบัติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบนี้เรียกว่า รอยต่อชอตต์กี(Schottky junction) หรือ ชอตต์กีไดโอด(Schottky diodes)



รูปที่ 2-11 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีในขณะ

(ก) ก่อนสัมผัส

(ข) ภายหลังกสัมผัส ในกรณีนี้ $\phi_m > \phi_s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปถ้าเป็นกรณีซึ่ง $\phi_m > \phi$, ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำเมื่อก่อนและหลังที่ถูกลำมาสัมผัสกัน ถูกแสดงดังในรูปที่ 2-11(ก) และ(ข) ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อก่อนสัมผัสระดับเฟอร์มิของโลหะ E_{fm} จะอยู่ที่ระดับต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ E_{fs} และเมื่อนำมาสัมผัสกันแล้ว จะทำให้เกิดการถ่ายเทของประจุพาหะผ่านรอยต่อ โดยที่โฮลจากโลหะจะไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้เกิดไอออนลบขึ้นทางด้านโลหะ และเป็นสาเหตุให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่รอยต่อ การไหลของโฮลจะหยุดลงเมื่อสนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงพอที่จะทำให้สามารถต้านทานการแพร่ของโฮลได้ และเป็นภาวะสมดุล ซึ่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ที่ระดับเดียวกันผ่านตลอดรอยต่อ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสะสมของโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อ ดังในรูปที่ 2-11 (ข) ซึ่งแสดงได้โดยการโค้งงอขึ้นของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัสกับโลหะ ดังนั้นในภาวะสมดุลนี้จะเห็นได้ว่าที่รอยต่อจะไม่มีกำแพงศักย์ที่จะป้องกันการเคลื่อนที่ของโฮลจากสารกึ่งตัวนำไปทางด้านโลหะ กล่าวคือ โฮลสามารถที่จะข้ามรอยต่อนี้ได้ทั้งสองทิศทาง กล่าวคือ รอยต่อไม่มีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ รอยต่อเช่นนี้เรียกว่า รอยต่อแบบโอห์มมิก หรือรอยสัมผัสโอห์มมิก(ohmic contact)

2.7 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชร

2.7.1 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก ความนำจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก ซึ่งก็คือการที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้น พอที่จะเปลี่ยนไปอยู่ที่ระดับพลังงานในแถบความนำ และจะทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ การเกิดประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก เกิดได้เฉพาะในกรณีนี้เท่านั้น และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบความนำจะเท่ากับจำนวนโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ และอาจเขียนสมการได้เป็น

$$n = p = n_i \quad (2-5)$$

โดยที่ n เป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p เป็นความหนาแน่นของโฮลอิสระ

n_i เป็นความหนาแน่นของประจุพาหะชนิดโคชชนิดหนึ่งในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ความหนาแน่นของพาหะอินทรินซิก

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอกนั้นอาจจะขึ้นไปอยู่ยังระดับพลังงานในแถบความนำได้ ถ้าพลังงานจากภายนอกที่อิเล็กตรอนได้รับมีค่ามากกว่า E_g (แถบพลังงานต้องห้าม หรือช่องว่างแถบพลังงาน) หรือถ้าหากพลังงานจากภายนอกมีค่าน้อยกว่า E_g แล้ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนนี้จะตกกลับลงมายังที่ว่างตามเดิมในแถบวาเลนซ์ ซึ่งกลายเป็นการรวมตัวใหม่นั้นเอง ในสถานะสมดุลความร้อนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบความนำ(n) และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์(p) จะมีค่าคงที่ ความหนาแน่นของประจุพาหะทั้งสองจะเปลี่ยนแปลงและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำ คือ

$$n = N \cdot P(E_g) \quad (2-6)$$

โดยที่ $P(E_g)$ เป็นโอกาสของอิเล็กตรอนซึ่งจะมีพลังงานที่ระดับ E_g โดยสามารถหาได้จากเฟอร์มิไดเรคฟังก์ชัน

N เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่มีอยู่ในแถบพลังงานทั้งหมด ดังนั้นเมื่อแทนค่า $P(E_g)$ จะได้ว่า

$$n = \frac{N}{1 + \exp\left[\frac{(E_g - E_F)}{kT}\right]} \quad (2-7)$$

โดยที่ E_F เป็นระดับเฟอร์มิ

เนื่องจากในกรณีของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก อิเล็กตรอนทั้งหมดอยู่ในแถบวาเลนซ์ จึงได้ว่า $E_g=0$ และเมื่อพิจารณาจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ จะได้ว่า

$$n_v = \frac{N}{1 + \exp\left[-E_F/kT\right]} \quad (2-8)$$

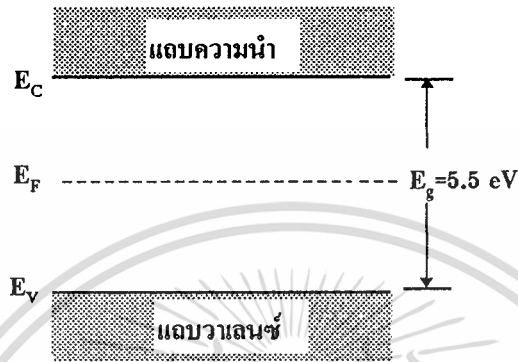
โดยที่ N เป็นผลรวมของจำนวนอิเล็กตรอนในแถบความนำ(n) และในแถบวาเลนซ์(n_v) ดังนั้นจะเขียนได้เป็น

$$N = \frac{N}{1 + \exp\left[\frac{(E_g - E_F)}{kT}\right]} + \frac{N}{1 + \exp\left[-E_F/kT\right]} \quad (2-9)$$

ในที่สุดจะได้ว่า
$$E_F = \frac{E_g}{2} \quad (2-10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่(2-10) แสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก จะมีระดับเฟอร์มีอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางพอดีระหว่างขอบของแถบความนำ และแถบวาเลนซ์ หรืออยู่ที่กึ่งกลางของแถบพลังงานต้องห้าม ดังนั้นจึงสามารถเขียนแบบจำลองแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิกได้ดังรูปที่ 2-12 โดยในกรณีของเพชรจะมีช่องว่างแถบพลังงาน E_g มีค่า 5.5 eV

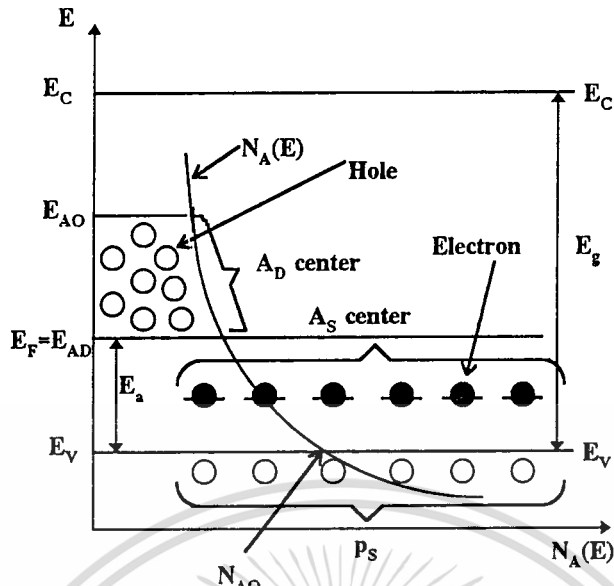


รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิก

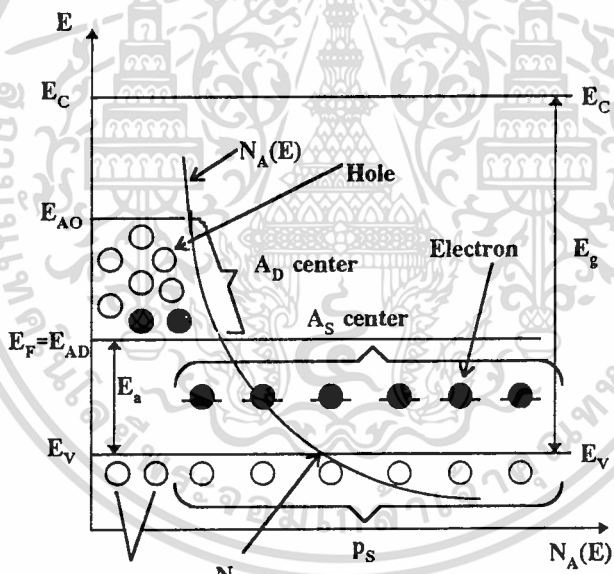
2.7.2 แบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดพี

ในตอนนี้นำเสนอแบบจำลองอย่างง่าย เพื่ออธิบายกลไกความนำของฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งประกอบด้วยสถานะของสิ่งเจือปนสองชนิดที่เกิดจากโบรอนอะตอม จากผลการทดลองให้ข้อเสนอแนะว่า อะตอมโบรอนที่เข้าไปฟอร์มตัวในฟิล์มเพชร ทำให้เกิดสถานะของสารเจือที่ซับซ้อนขึ้น Mort et al. และ Srikanth และ Ashok ได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันการกระจายของสถานะที่เกิดขึ้นในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรมีลักษณะเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียลที่สถานะต่าง ๆ ในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มเพชร เมื่อเจืออะตอมโบรอนในสารกึ่งตัวนำทั่วไป เช่น Si ทำให้เกิดการแทนที่ของอะตอมขึ้น และมีระดับ shallow acceptor เดี่ยวเกิดขึ้น ความลึกของระดับดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมสารเจือ สำหรับกรณีของการเจืออะตอมสารเจือโบรอนลงในฟิล์มเพชร สถานะของสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อน พิจารณาได้จากผลการทดลองที่มีลักษณะการกระจายแบบเอ็กโปเนนเชียล เมื่ออะตอมโบรอนถูกวางในแลททิซของเพชร อะตอมของโบรอนไม่เพียงแทนที่เท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดช่องขึ้นซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างกันของรัศมีของอะตอมระหว่างคาร์บอนและโบรอน นอกจากนี้ทำให้เกิดคำหนิหลายชนิดขึ้น คำหนิหนึ่งที่เกิดขึ้นเป็นระดับ acceptor เดี่ยวที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับแถบวาเลนซ์ และอะตอมอื่นจะทำให้เกิดคำหนิหลายอย่าง ซึ่งระดับ acceptor มีการกระจายอย่างกว้างอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อุนทุมิต่ำ



(ข) อุนทุมิสูง

รูปที่ 2-13 แสดงแบบจำลองแถบพลังงานฟิล์มเพชรชนิดพี

จากรูปที่ 2-13 แสดงแบบจำลองแถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพี ที่มีการโด๊ปอะตอมสารเจือโบรอน โดยจะสมมติให้มีระดับ shallow acceptor (A_{sh}) เกิดขึ้นหนึ่งแห่ง และระดับ deeper acceptor (A_D) ที่กระจายอยู่จาก E_{AO} ถึง $E_F = E_{AD}$ พิจารณาบริเวณที่มีอุนทุมิต่ำ โสไลต์จากแถบวาเลนซ์จะถูกกระตุ้นเฉพาะจาก A_{sh} -center เมื่ออุนทุมิแวดล้อมมีค่าเพิ่มสูงกว่า 300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเคลวิน โสไลต์ที่ถูกกระตุ้นจะเริ่มเกิดจาก A_D -center นั่นก็คือ A_D -center เกิดการไอออนไนซ์ เกิดไอออนลบขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-13(ข)

สภาพความนำไฟฟ้า σ_L ในบริเวณที่มีอุณหภูมิค่าสามารถเขียนได้เป็น

$$\sigma_L = q\mu_p N_A \quad (\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}) \quad (2-11)$$

โดยที่ N_A เป็นความหนาแน่นของสารเจือที่ A_{sh} -center มีค่าใกล้เคียงกับ p_s

จากผลการทดลองที่ได้จาก Srikanth และ Ashok พบความหนาแน่นของสถานะพลังงาน หรือจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยพลังงาน $N_A(E)$ ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$) ของ A_D -center ในเทอมของพลังงานสามารถอธิบายได้จากสมการ

$$N_A(E) = N_{AO} \exp\left[\frac{E_V - E}{kT_i}\right] \quad (\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}) \quad (2-12)$$

โดยที่ N_{AO} เป็นความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ขอบด้านบนของแถบวาเลนซ์ k เป็นค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzman constant)

T_i เป็นพารามิเตอร์ของอุณหภูมิ ที่มีลักษณะการกระจายของ A_D -center ความหนาแน่นสุทธิของ A_D -center มีค่า N_A ซึ่งได้จากการอินทิเกรตดังสมการ

$$N_A = \int_{E_F = E_{AD}}^{E_{AO}} N_A(E) dE \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (2-13)$$

การที่อะตอมสารเจือมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ระดับเฟอร์มี E_F เข้าใกล้ขอบของแถบวาเลนซ์ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2-13

$$N_A = N_{AO} kT_i \left[\exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT_i}\right) - \exp\left(\frac{E_V - E_{AO}}{kT_i}\right) \right] \quad (2-14)$$

จากความสัมพันธ์ $E_F - E_V = E_{AD} - E_V = E_a$ สมการ(2-14)เขียนได้เป็น

$$E_a = kT_t \ln \left[\frac{N_A}{kT_t N_{AD}} + \exp\left(-\frac{E_{AO} - E_V}{kT_t}\right) \right]^{-1} \quad (2-15)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะใช้ได้เฉพาะ $N_A (= 0.01 N_B)$ ความสัมพันธ์

$$E_a \propto -kT_t \ln \frac{N_B}{kT_t N_{AD}} \quad (2-16)$$

และ

$$\frac{dE_a}{dN_B} = -\frac{kT_t}{N_B} < 0 \quad (2-17)$$

สมการที่(2-16) และ(2-17) แสดงให้เห็นว่าพลังงานกระตุ้น E_a ลดลงเมื่อ N_B เพิ่มขึ้น และ E_a มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในขณะที่ N_B เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ

การกระตุ้นโฮลจาก A_D -center เริ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเคลวิน แบบจำลองแถบพลังงานดังรูปที่ 2-14(ข) สอดคล้องกับคุณลักษณะข้างต้น ค่าความนำไฟฟ้าที่บริเวณอุณหภูมิสูงหาได้จาก

$$\begin{aligned} \sigma &= q\mu_p p_D + \sigma_L \\ &= q\mu_p (p_D + N_A) \end{aligned} \quad (2-18)$$

โดยที่ p_D เป็นความหนาแน่นของโฮลที่ถูกกระตุ้นจาก A_D -center ไปในแถบวาเลนซ์ เนื่องจากความสัมพันธ์ $E_a \gg kT$ จากการใช้การประมาณของโบลต์ซมันน์ สามารถหาค่าความเข้มข้นของโฮลจาก

$$p_D = \int_{-\infty}^{E_V} S_p(E) \cdot f_p(E) dE \quad (2-19)$$

โดยที่ $S_p(E)$ และ $f(E)$ เป็นความหนาแน่นของสถานะในแถบวาเลนซ์ และฟังก์ชันการกระจายโบลต์ซมันน์ของโฮล ตามลำดับ มีค่า

$$S_p(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_p}{\hbar^2} \right) (E_V - E)^{1/2} \quad (2-20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_p(E) = \exp\left(\frac{E - E_V}{kT}\right) \quad (2-21)$$

โดยที่ m_p และ $h(=h/2\pi)$ เป็นมวลยังผลของโฮล และค่าคงที่ของไคแรค จากการอินทิเกรตสมการ(2-19) จะได้

$$p_D = 2 \left(\frac{2\pi k T m_p}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (2-22)$$

$$= N_V \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (\text{cm}^{-3})$$

โดยที่ N_V และ E_a มีค่าเป็น

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi k T m_p}{h^2} \right)^{3/2} \quad (\text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}) \quad (2-23)$$

$$E_a = E_F - E_V \quad (\text{eV}) \quad (2-24)$$

โดยที่ N_V เป็น effective state density ของแถบวาเลนซ์ แทนค่าสมการ (2-15) ในสมการ (2-22) จะได้ว่า

$$p_D \propto N_V \left(\frac{N_A}{kT_i N_{A0}} \right)^{T_i/T} \quad (2-25)$$

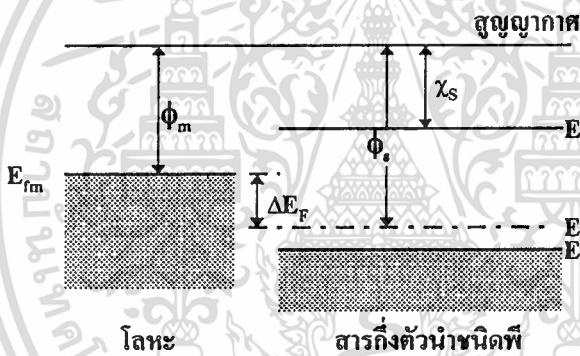
ความสัมพันธ์ข้างต้นหมายถึง $N_A = 0.01 N_B$ p_D มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ N_A เพิ่มขึ้น จากสมการ (2-18) และ (2-22) สูตรของการหาค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเป็น

$$\sigma = q\mu_p \left\{ N_V \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + N_A \right\} \quad (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}) \quad (2-26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ขอตต์กีไดโอด

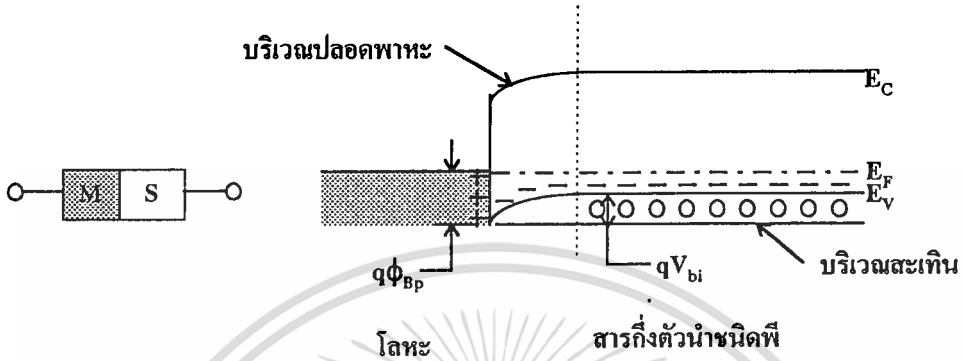
ระดับพลังงานที่สูญญากาศของสารทุกชนิดจะมีระดับเดียวกัน ส่วนระยะช่วงระหว่างระดับพลังงานที่สูญญากาศ และระดับพลังงานเฟอร์มิในสารต่าง ๆ นั้น เรียกว่า ฟังก์ชันงาน(work function) โดยทั่วไปมีหน่วยเป็น eV รูปที่ 2-14 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานที่ระดับสูญญากาศ ในโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด P จากรูป ϕ_m เป็นฟังก์ชันงานของโลหะและ ϕ_s เป็นฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ถ้าโลหะได้รับพลังงานจากภายนอกโดยมีระดับพลังงานสูงกว่า ϕ_m อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณระดับ E_F จะถูกกระตุ้น และเคลื่อนหลุดขึ้นสู่ระดับสูญญากาศเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ช่วงความแตกต่างของระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ระหว่างระดับสูญญากาศและ E_C ซึ่งเป็นระดับแถบความนำ ช่วงความแตกต่างนี้เรียกว่า อิเล็กตรอน แอฟฟินิตี(electron affinity) กำหนดโดย χ_s , รูปที่ 2-14 แสดงถึงลักษณะการแยกตัวกันอยู่ต่างหากของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้ระดับพลังงานศักย์เฟอร์มิแตกต่างกันอยู่เท่ากับ ΔE_F



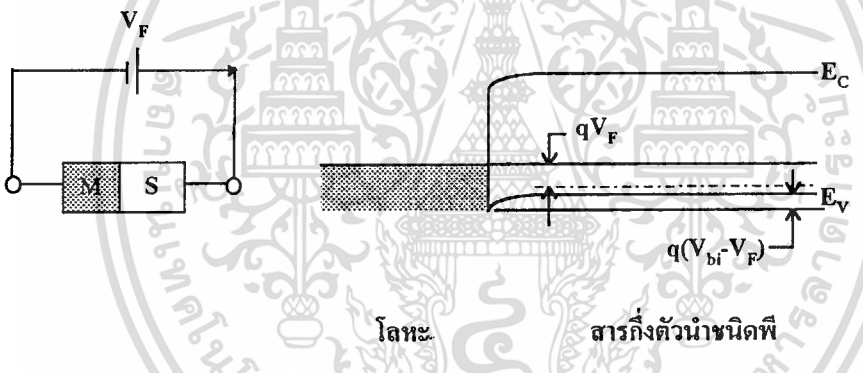
รูปที่ 2-14 แสดงแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่แยกกันอยู่

เมื่อนำโลหะและกึ่งตัวนำมาเชื่อมต่อกันจะเห็นว่าระดับพลังงาน $E_{fm} > E_{fs}$ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการถ่ายเทประจุ จากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะเรื่อย ๆ จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองมีค่าเท่ากัน หรืออยู่ในสภาวะสมดุลของการถ่ายเทประจุ ซึ่ง $\Delta E_F = 0$ กระแสไหลจะหยุดไหล ทำให้จำนวนโฮลในสารกึ่งตัวนำลดลง และทำให้สารกึ่งตัวนำแสดงคุณสมบัติเป็นลบประจุลบเหล่านี้ คือ ไอออนของสารเจือปนผู้รับที่เหลืออยู่หลังจากรับอิเล็กตรอนตามบริเวณแถบรีมรอยต่อระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ ภายในสารกึ่งตัวนำนั้นส่วนโฮลที่เคลื่อนเข้าสู่โลหะนั้นจะมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับโฮลอิสระ ภายในโลหะเองดังรูปที่ 2-15(ก) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ภายหลังจากการเชื่อมต่อสารทั้งสอง โดยระดับพลังงานเฟอร์มิปรับเข้าหากันเรียบร้อยแล้ว จะเกิดบริเวณที่แตกต่างกันสองแห่ง บริเวณแรกเป็นบริเวณปลอดพาหะซึ่งอยู่ติดกับผิวสัมผัสของโลหะ บริเวณนี้มีเฉพาะไอออนสารเจือชนิดผู้รับ ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

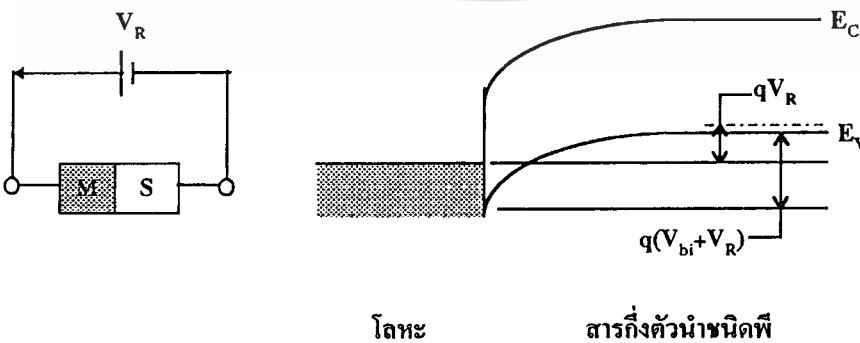
รับอิเล็กตรอนจากโลหะ บริเวณที่สองเป็นบริเวณในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีจำนวนประจุบวก และประจุลบเท่ากันเรียกว่า บริเวณสะเทิน สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยด้านการไหลของกระแสไหล สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะขยับระดับพลังงานบริเวณปลอดพาหะ ดังรูปที่ 2-15 สนามไฟฟ้าที่ด้านการไหลของโฮลนี้เรียกว่ากำแพงศักย์



(ก) กรณีที่ภาวะสมดุลทางความร้อน



(ข) กรณีไบแอสไปหน้า



(ค) กรณีไบแอสย้อนกลับ

เอกสารรูปที่ 2-15 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานที่มีการเชื่อมต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีในด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสิ่งประดิษฐ์ที่มีขอตักก็ แบรีเออร์ หรือเป็นขอตักก็โคโอดนั้น ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดันที่ป้อนสู่ระบบ รูปที่ 2-15(ก) แสดงกรณีที่ไม่มีการไบแอสแรงดัน และรูปที่ 2-15(ข)แสดงกรณีไบแอสแรงดันบวกเข้าทางด้านสารกึ่งตัวนำ รูปที่ 2-15(ค) แสดงกรณีการจ่ายแรงดันลบเข้าทางด้านสารกึ่งตัวนำ ขณะไม่มีการจ่ายแรงดัน โอลที่มีพลังงานมากกว่า $q\phi_{bp}$ สามารถเคลื่อนที่ไปมาโดยอิสระระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะ และในสารกึ่งตัวนำจะเป็นโอลที่มีระดับพลังงานมากกว่า E_v โอลสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระ ซึ่งระดับพลังงาน $q\phi_{bp}$ และระดับพลังงาน $E_F - E_v + qV_{bi}$ จะอยู่สูงกว่าระดับพลังงาน E_F เท่า ๆ กัน ดังนั้นทำให้ความหนาแน่นของโอลสม่าเสมอเท่ากันทั้งหมดทั้งทางด้านโลหะและทางด้านสารกึ่งตัวนำ

ลักษณะการไบแอสในรูปที่ 2-15(ข) สารกึ่งตัวนำจะมีระดับพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานในโลหะอยู่เท่ากับ qV_F ดังนั้นโอลในโลหะเฉพาะส่วนที่มีระดับพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ $q\phi_m$ ได้ E_F สามารถเคลื่อนที่ผ่านข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำได้ เป็นกรณีที่เหมาะสมกับกรณีไม่ได้มีการไบแอส ส่วนด้านสารกึ่งตัวนำโอลที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ไปยังโลหะจะเป็นโอลบริเวณใต้ระดับเฟอร์มิ qV_F ดังนั้นความหนาแน่นของโอลในโลหะ(p_m) ที่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์มายังสารกึ่งตัวนำได้ คือ

$$p_m = N_v \exp\left(-\frac{\phi_{bp}}{kT}\right) \quad (2-27)$$

และ p_s เป็นความหนาแน่นของโอลในสารกึ่งตัวนำที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ไปสู่โลหะ คือ

$$p_m = N_v \exp\left(-\frac{\left[E_{fs} - \left(E_v - q(V_{bi} - V_F)\right)\right]}{kT}\right) \quad (2-28)$$

จากรูปที่ 2-15(ข) $q\phi_{bp} > E_{fs} - (E_v - q(V_{bi} - V_F))$

ดังนั้น $p_m < p_s$ นั่นคือความหนาแน่นของโอลที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ในสารกึ่งตัวนำมีมากกว่า ทำให้เกิดกระแสโอลไหลจากสารกึ่งตัวนำเข้าสู่โลหะมีทิศทางดังรูปที่ 2-15(ข) จากสมการ(2-28) เห็นว่าความหนาแน่นของโอลเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับการไบแอสมากขึ้น

พิจารณาการไบแอสย้อนกลับในรูปที่ 2-15(ค) ระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ qV_R ดังนั้นกำแพงศักย์จะสูงขึ้นจาก qV_{bi} กลายเป็น $q(V_{bi} + V_R)$ หมายความว่ากำแพงศักย์สำหรับโอลอิสระในบริเวณเนื้อสารสูงขึ้น และความหนาแน่นของโอลอิสระในโลหะที่สามารถข้ามกำแพงศักย์มาสู่สารกึ่งตัวนำสามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_s = N_v \exp\left(-\frac{[E_{fm} - (E_v - q(V_{bi} + V_R))]}{kT}\right) \quad (2-29)$$

ซึ่งหมายความว่า $p_m > p_s$ ดังนั้นจะมีโฮลไหลจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางตรงข้ามกับรูปที่ 2-15(ข) โดยสรุปอาจกล่าวได้ว่าที่ขอตั๊กิ แบรีเออร์ ค่าของกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ การจ่ายแรงดันให้กับรอยต่อ และทำให้รอยต่อนั้นมีหน้าที่จัดทิศกระแสไหลในทิศทางเดียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร

ลักษณะผลึกของคาร์บอนมีหลายลักษณะด้วยกัน และมีความไม่เป็นระเบียบในขณะที่เป็นของแข็ง จากผลดังกล่าวทำให้มีผลต่อคุณสมบัติในทางไฟฟ้า, ทางแสง, ทางเคมี และกลไกต่าง ๆ จาก hybridization ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีของคาร์บอนจากโครงสร้างลูกโซ่ sp^1 ของ carbyne ไปยังโครงสร้างที่เป็นชั้น sp^2 ของกราฟไฟท์ จนถึงโครงสร้างที่มีพันธะโควาเลนต์ cubic ของเพชร นอกจากนี้การผสมของ hybridization ยังทำให้การฟอร์มตัวของคาร์บอนไม่เป็นระเบียบ การที่กราฟไฟท์ (sp^2) มีความเสถียรเมื่อเทียบกับเพชร (sp^3) ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ ทำให้การปลูกผลึกและคุณลักษณะของเพชรมีความซับซ้อน

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรก็มีหลายเทคนิคด้วยกันที่มีการนำมาใช้งาน โดยเทคนิคที่ใช้สามารถที่บอกคุณลักษณะทางเคมี ซึ่งชี้เฉพาะความแตกต่างของคาร์บอนเฟสในเทอมขององค์ประกอบ และพันธะทางเคมี และคุณลักษณะทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการศึกษารูปร่างและคุณสมบัติโครงสร้างของฟิล์ม สำหรับในบทนี้ได้นำเสนอเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเพชร ซึ่งประกอบด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะรูปร่างของฟิล์มที่ได้ เทคนิคในการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และ Raman Spectroscopy ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติ และลักษณะโครงสร้างของฟิล์มเพชร ท้ายสุดเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) จะได้กล่าวรายละเอียดต่อไป

3.1 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วย SEM

SEM เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน การทำงานของ SEM ทำโดยการกวาดโพกัสของลำแสงอิเล็กตรอนตลอดพื้นผิว และตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับสองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงมีขนาดพิเศษเพียง 10-20 นาโนเมตร โดยขนาดของลำแสงมีความสำคัญต่อการพิจารณาความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนอันดับสองที่ปล่อยออกขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของลักษณะพื้นผิวเอง ซึ่งทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะแสดงบน CRT (cathode-ray tube) SEM มีข้อได้เปรียบกว่า optical microscopes อื่น ๆ เนื่องจาก SEM มีกำลังขยายสูง (ปกติอยู่ในช่วง 50 ถึง 40,000 X), ความคมชัดของภาพ (2.5-10 นาโนเมตร), ความลึกของสนาม (มากกว่า 500 เท่า) และสามารถเห็นภาพได้สามมิติ เมื่อเทียบกับ TEM ซึ่งต้องใช้สารตัวอย่างที่มีความบางมาก ๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านไปได้ ในขณะที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

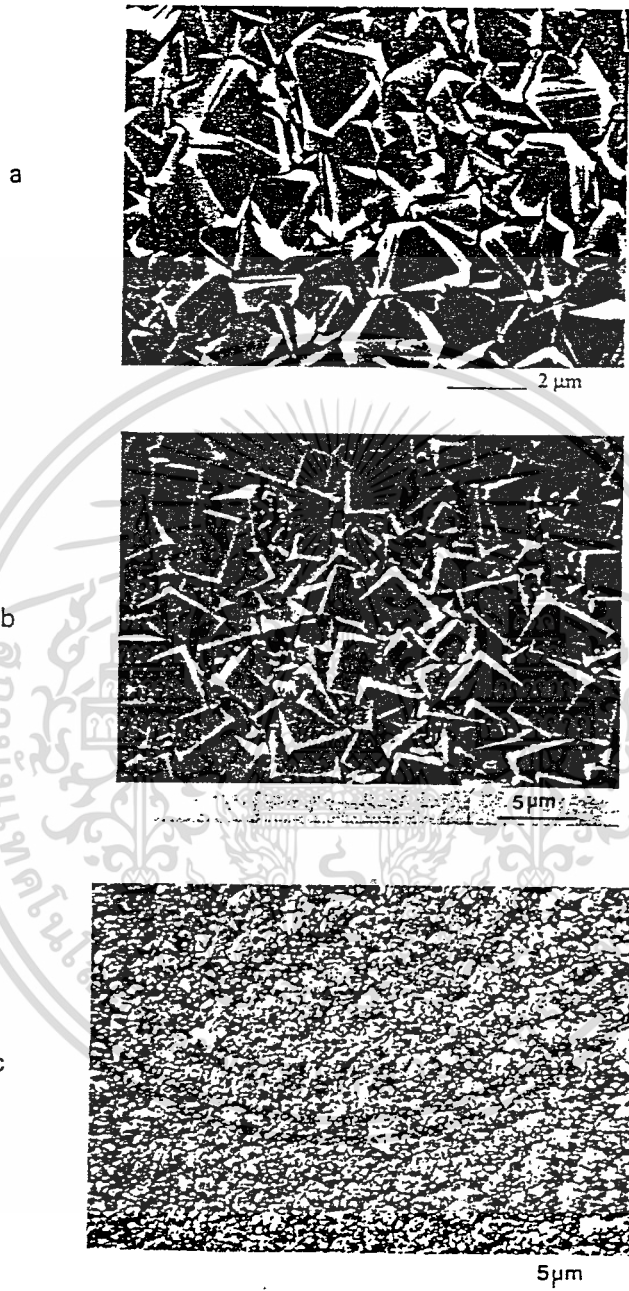
SEM สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำสามารถจะนำไปใช้งานได้เลยโดยไม่ต้องทำการเตรียมก่อน แต่โดยทั่วไปสารตัวอย่างที่ไม่มีความนำ สารตัวอย่างในลักษณะนี้ต้องทำการเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำก่อน(เช่น ทองหรือคาร์บอน) ยกตัวอย่าง เช่น ฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นบน SiO_2 ต้องทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนนำมาวัดด้วย SEM ในขณะที่ฟิล์มเพชรที่สร้างบน Si สามารถที่จะวัดด้วย SEM ได้โดยไม่ต้องทำการเคลือบชั้นความนำบนพื้นผิว อย่างไรก็ตามการใช้งานที่ลำแสงมีค่าแรงดัน และกระแสต่ำ ๆ จะมีประโยชน์ เนื่องจากช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม SEM เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์ต่อคุณลักษณะของรูปร่างพื้นผิวของ CVD เพชร นอกจากนี้ประโยชน์มากสุดของ SEM คือ การที่สามารถสัมพันธ์กับเทคนิคอื่น เช่น Raman Spectroscopy

ในปัจจุบัน จากการใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชร ทำให้ได้ชนิดของฟิล์มที่แตกต่างกัน ซึ่งมีทั้งที่มีเมล็ดขนาดใหญ่ของผลึกรวม, เป็นผลึกเดี่ยว และเมล็ดขนาดเล็ก ส่วนการสร้างฟิล์มด้วย CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มที่แตกต่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้าง โดยทั่วไปฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร โดยเฉพาะ Si มีลักษณะขรุขระ, มีหน้าของเพชรที่มีการเจียรในแล้วอย่างสูง, และเป็นลักษณะของผลึกรวมที่มีเมล็ดผลึกขนาดใหญ่ (>1 ไมโครเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 3-1 (a) และ (b) โดยทั่วไปพื้นผิวดังกล่าวจะสัมพันธ์กับ Raman spectrum ที่มีคุณภาพสูง(มีความเข้มสูงที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} และความเข้มต่ำที่ตำแหน่ง 1500 cm^{-1}) อย่างไรก็ตาม ถ้าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้าง(โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรอง และความเข้มข้นของมีเทนในไฮโดรเจน) ไม่เหมาะสม รูปร่างพื้นผิวมีลักษณะเป็น sub-microcrystalline และ cauliflower-like ดังแสดงในรูปที่ 3-1 (c) ซึ่งจะมีผลต่อยอดของเพชรทำให้ลดลง และเกิดยอดของกราฟที่ขึ้นใน Raman spectrum

Zhu et. al. ได้ทำการศึกษารูปร่างลักษณะของผลึกเพชร และฟิล์มที่สร้างด้วยวิธี microwave plasma CVD พวกเขาพบว่า อุณหภูมิของฐานรอง, ความเข้มข้นของมีเทน และอัตราการไหลของก๊าซมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าที่ระนาบ {111} และ {100} และเป็นผลให้เกิดรูปร่างลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน รูปร่างของฟิล์มไม่มีความไวต่อความดันก๊าซ(อยู่ในช่วง 50-150 torr) ที่อุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสม 900-1000 องศาเซลเซียส การเพิ่มอุณหภูมิของฐานรอง หรืออัตราการไหลของก๊าซ(อุณหภูมิฐานรองในช่วง 800 ถึง 1150 องศาเซลเซียส , อัตราการไหลของก๊าซจาก 0 ถึง 400 sccm.) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวฟิล์มเพชรจาก {100} faces เป็น {111} faces เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนในไฮโดรเจนจาก 0.5% ถึง 2% ทำให้รูปร่างลักษณะของฟิล์มเพชรเปลี่ยนแปลงจาก {111} triangular faces เป็น {100} square face นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนมีค่าเป็น 5% ฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็น sub-micron clusters ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนของกราฟไฟท์ ซึ่งเป็นผลที่ได้จาก Kobashi et. al. จากพื้นฐานของผลการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

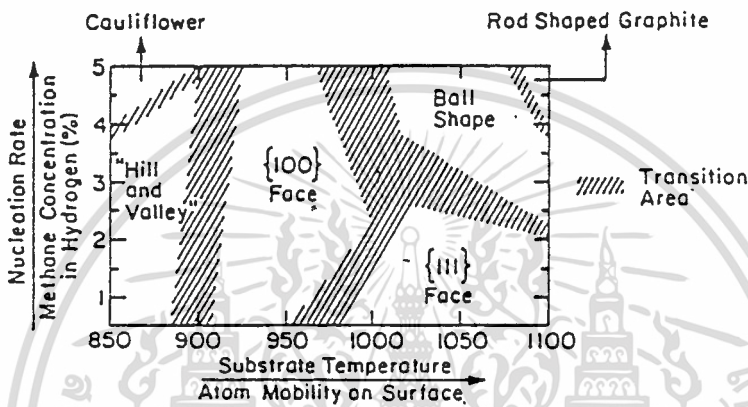


รูปที่ 3-1 แสดงรูปร่างลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพอร์ของ

- (a) {111} triangular faces
- (b) {100} square face
- (c) cauliflower like small crystalline

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองที่ได้ นำมาเขียนแผนภาพลักษณะพื้นผิวบนแกนของอุณหภูมิของฐานรอง และความเข้มข้นของมีเทน ดังแสดงในรูปที่ 3-2 ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อข้อมูลในกระบวนการสร้างฟิล์ม และพัฒนากระบวนการ CVD ของเพชร ยกตัวอย่าง {111} faces จะพบบ่อยภายใต้เงื่อนไขฐานรองที่มีอุณหภูมิสูง และความเข้มข้นของมีเทนมีค่าต่ำ ในขณะที่ฟิล์ม {100} faces สร้างภายใต้เงื่อนไขช่วงอุณหภูมิของฐานรอง และความเข้มข้นของมีเทนที่ค่ากลาง นอกจากนี้ขอบเขตของรูปร่างของฟิล์มมีความสัมพันธ์กับกระบวนการทางฟิสิกส์ อย่างเช่น ความคล่องตัวของอะตอม และ ความอึดตัวของก๊าซเฟส มากกว่าที่จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างอย่างเดียว



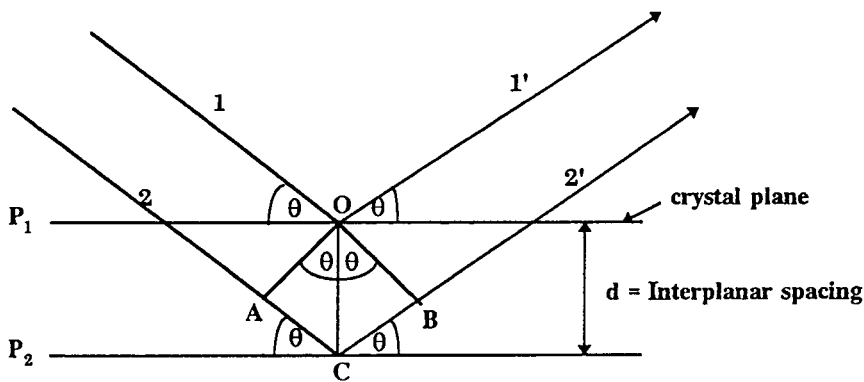
รูปที่ 3-2 แสดงแผนภาพลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรในฟังก์ชันของความเข้มข้นของมีเทนในไฮโดรเจน และอุณหภูมิของฐานรอง

3.2 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบเป็นครั้งแรกในปีค.ศ. 1912 โดย Laue หลังจาก that Roentgen ค้นพบรังสีในปี ค.ศ. 1895 ในช่วงดังกล่าวได้มีผู้พยายามที่จะพิสูจน์ว่ารังสีเอ็กซ์มีสมบัติเป็นอนุภาค หรือเป็นคลื่น จนกระทั่งพบว่าผลึกสามารถทำให้อำนาจรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนได้ จึงเชื่อว่ารังสีเอ็กซ์มีสมบัติเป็นคลื่น โดย Laue ได้แสดงให้เห็นปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยใช้เกรตติง (grating) 3 มิติ และในปีเดียวกันนี้ Bragg ก็ได้แสดงให้เห็นว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถเขียนเป็นสมการแบบง่าย ๆ ได้ โดยคิดว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการสะท้อน (reflection) ของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบในแลตทิซ ซึ่งสมการของ Bragg พิจารณาได้จากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบในแลตทิซ P_1 และ P_2 ที่ขนานกันดังแสดงในรูปที่ 3-3

ลำรังสีเอ็กซ์ที่ 1 และ 2 ตกทำมุม θ กับระนาบ P_1 และ P_2 อิเล็กตรอนที่สมมติว่าอยู่ที่จุด O และ C จะถูกบังคับให้สั่นตาม oscillating field ของรังสีเอ็กซ์ที่เข้ามา ทำให้มีพลังงานแผ่ออกมาทุกทิศทาง และพบว่าในทิศทางที่รังสีที่ 1 และ 2 ออกมาทำมุม θ ซึ่งเสมือนเกิดการสะท้อนออกมาของรังสีเอ็กซ์ จะให้ความเข้มรังสีเอ็กซ์สูงสุด หรือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันขึ้น (in phase)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก

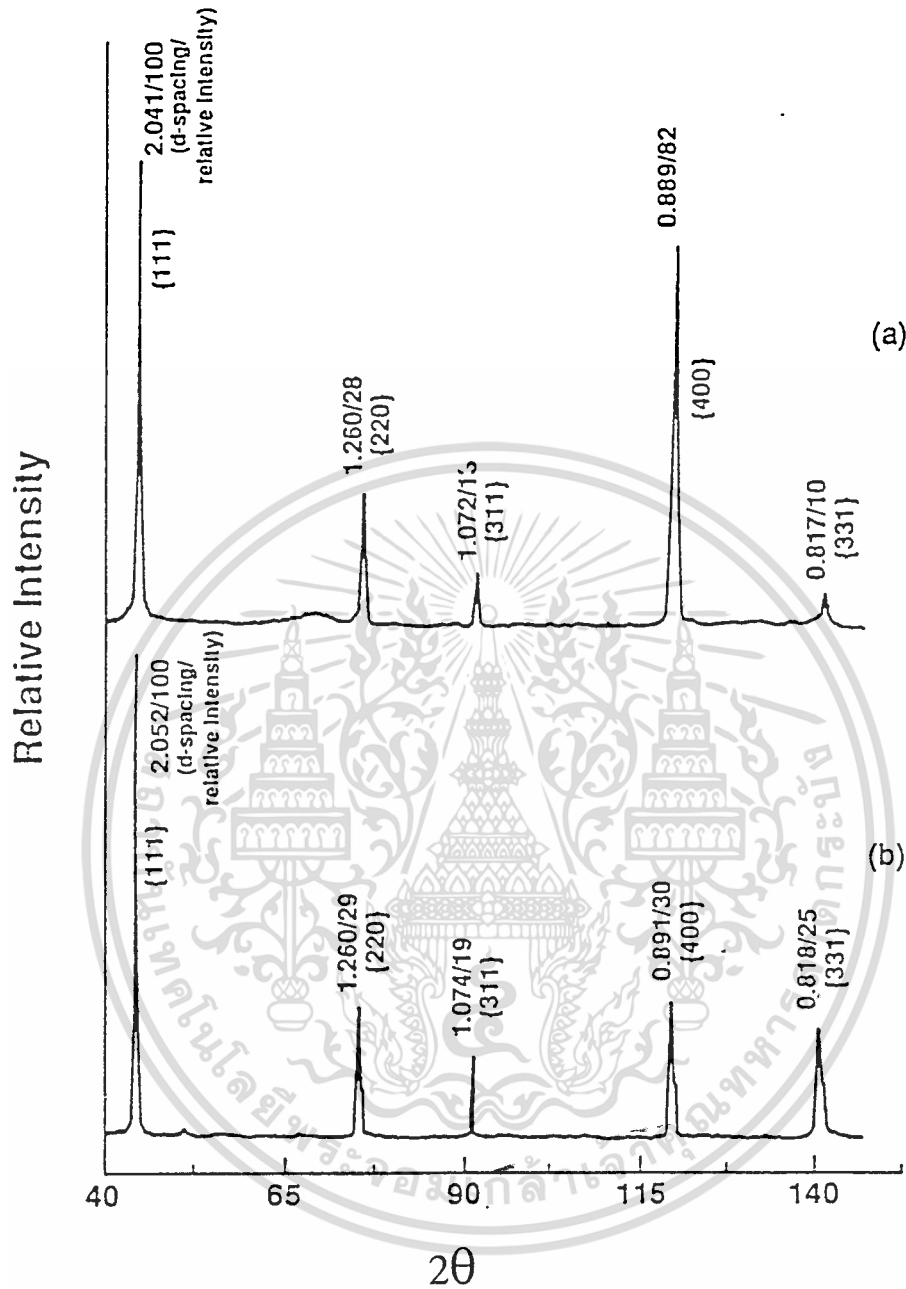
จากรูป $\angle AOC = \angle BOC = \theta$ ดังนั้น $AC = BC$ และต่างเท่ากับ $d \sin \theta$ ซึ่งจะทำให้การแทรกสอดแบบเสริมกัน เมื่อ

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3-1)$$

เรียกสมการ (3-1) ว่า Bragg's law และ n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน ($n = 1, 2, 3, \dots$) จะเห็นว่าการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จะทำมุม θ เมื่อเทียบกับ crystal plane และจะทำมุม 2θ เมื่อเทียบกับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ

สำหรับฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการ CVD เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) สามารถที่จะใช้ในการวัดพารามิเตอร์ของแลตทิซ และพิจารณาถึงลักษณะของฟิล์มได้ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถใช้อธิบายความแตกต่างระหว่างเฟสของผลึกคาร์บอน คุณสมบัติรูปแบบของผลึกรวมของเพชรที่ได้นั้น ผลึกเพชรต้องเป็นผลึกที่ดีพอ (มีผลึกขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร หรือมากกว่า) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกของเพชรเป็นแบบ cubic ซึ่งจะมีความสมมาตรสูง การคำนวณแฟกเตอร์ของโครงสร้างทำให้ระนาบของการเลี้ยวเบนมีจำนวนน้อย (โดยระนาบของการเลี้ยวเบน $\{hkl\}$ ที่ได้คือ $\{111\}$, $\{220\}$, $\{311\}$, $\{400\}$, $\{331\}$ และอื่น ๆ โดย h, k, l จะเป็นคี่ทั้งหมด หรือทั้ง h, k, l เป็นคู่ทั้งหมด และ $h+k+l = 4n$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม) นอกจากนี้ที่ระนาบผลึกต่าง ๆ การเลี้ยวเบนที่ระนาบ $\{111\}$ มีความแรงสูงสุด การที่เส้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีการเลื่อนไป หรือกว้างขึ้นเป็นผลจากตำหนิ หรือการที่ผลึกมีขนาดเล็ก รูปที่ 3-4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทั้งพื้นผิวฟิล์มที่เป็น $\{111\}$ และ $\{100\}$ ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างกันของความเข้มของรูปแบบระนาบของผลึก

Kaate et. al. ได้พิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่มีรูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันห้าแบบ เนื่องจากระนาบผลึกที่ขนานกับพื้นผิวฐานรองเท่านั้นที่จะเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มเพชร

เลี้ยวเบนขึ้น จากการเปรียบเทียบความเข้มของการเบี่ยงเบนของระนาบผลึกที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ กับความเข้มของการเลี้ยวเบนของผงเพชร สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มของยอดได้ ดังตารางที่ 3-1 จากตารางจะเห็นว่าฟิล์ม A และ E มีความแตกต่างของความเข้มการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (111) กับระนาบอื่นมากกว่ากรณีของสารตัวอย่าง ในฟิล์ม B ระนาบ (400) มีความเข้มของการเลี้ยวเบนมากกว่า (400) ในสารตัวอย่าง ดังนั้นฟิล์ม A และ E มีระนาบที่ขนานกับระนาบของการเคลือบเป็น (111) และระนาบที่ขนานกับระนาบของการเคลือบของฟิล์ม B เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ (100) จากผลดังกล่าวสามารถยืนยันด้วยการดูลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจาก SEM สำหรับค่า interplanar spacing มาตรฐานของเพชรนั้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-1 แสดงความเข้มสัมพัทธ์ของยอดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
จากระนาบผลึกในฟิล์มเพชร

| Films | {111} | {220} | {311} | {400} |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| powder(ASTM) | 100 | 25 | 18 | 8 |
| A | 100 | 5 | 3 | 1 |
| B | 100 | 8 | 8 | 100 |
| C | 100 | 28 | 10 | 1 |
| E | 100 | 7 | 7 | 5 |

ตารางที่ 3-2 แสดงค่า interplanar spacing มาตรฐานของเพชร(ASTM 6-675)

| interplanar spacing(A) | 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 |

3.3 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

Raman spectroscopy ใช้ในการศึกษาการสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสารหรือบริเวณพื้นผิวของผลึก พบว่าเทคนิคนี้ได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์คุณลักษณะของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการ CVD เนื่องจากสามารถแยกความแตกต่างชนิดของพันธะทางเคมีได้ ดังนั้น Raman spectroscopy จึงเป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยมกันอย่างมาก และมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD มีอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของ Raman spectroscopy จะอาศัยปรากฏการณ์กระเจิงของแสงเข้าช่วย โดยหลักการของปรากฏการณ์ดังกล่าว คือ การวัดการลดลงของความเข้มของลำแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน ผลของ Raman จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์กระเจิงของโมเลกุล อยู่บนพื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการชนกันระหว่างโฟตอนกับการสั่นของแลตทิซ หรือโฟนอน การกระเจิงของ Raman อาศัยเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นเดียวในการกระตุ้น ทำให้เกิดคู่ของโฟนอนกับโฟตอน สนามไฟฟ้าของความเข้มลำแสงบังคับแสงให้มีคลื่นไปทางเดียวในผลึก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ polarizability ดังสมการ

$$P = \alpha E \quad (3-2)$$

โดยที่ P เป็นโมเมนต์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

E เป็นสนามไฟฟ้า

α เป็น polarizability

เมื่อเกิดการสั่นของแลตทิซเป็นภาวะการกระตุ้นของ Raman ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง polarizability Raman มีการปล่อยโฟตอนบางส่วนออกมาจากการสั่นของไดโพล ซึ่งมีทั้งที่มีความถี่เหมือนกับลำแสงตกกระทบ (elastic Rayleigh scattering) หรือมีการเลื่อนไปของความถี่มีค่าเท่ากับ ความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (inelastic Stokes or anti-Stokes scattering):

$$p = E_0 \alpha_0 \cos(2\pi \nu_0 t) + \frac{1}{2} E_0 \sum \alpha_n \left\{ \begin{array}{l} \cos 2\pi(\nu_0 - \nu_n)t \\ + \cos 2\pi(\nu_0 + \nu_n)t \end{array} \right\} \quad (3-3)$$

โดยที่ E_0 เป็นสนามไฟฟ้าของลำแสงที่ตกกระทบ

t เป็นเวลา

ν_0 เป็นความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ

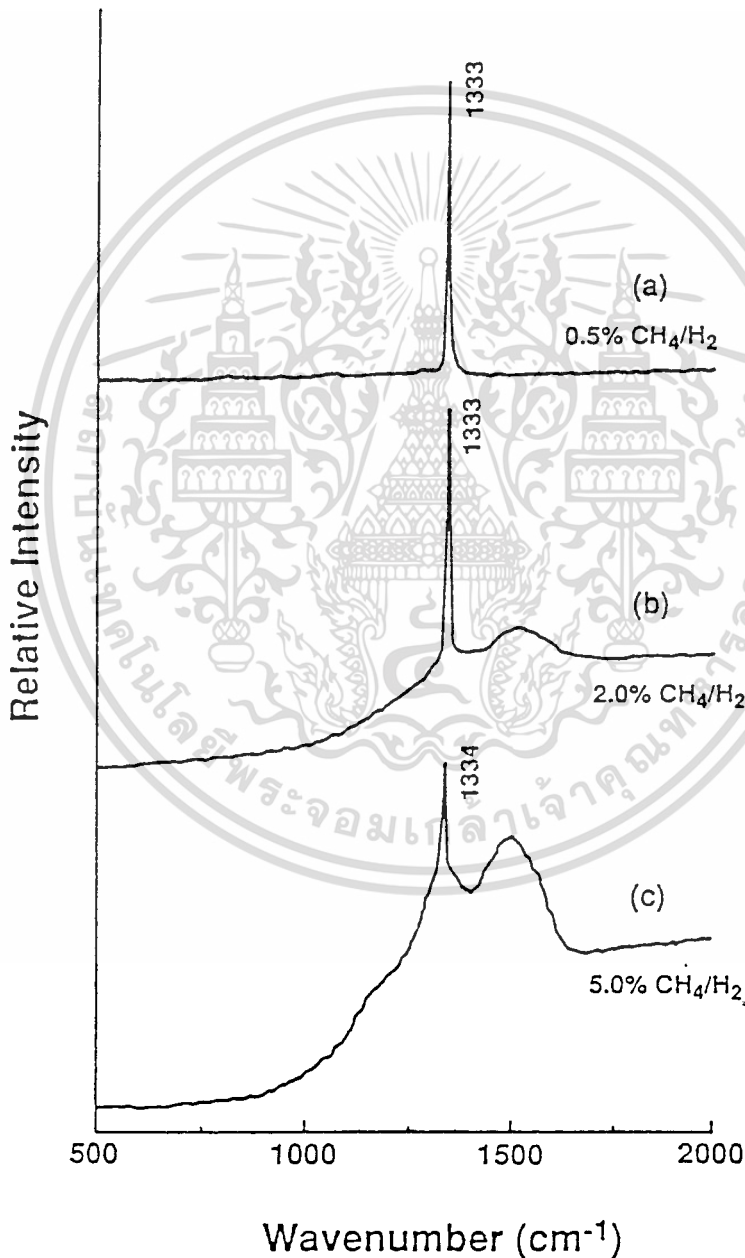
ν_n เป็นความถี่ของโฟนอน

α_n เป็น polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

Stokes scattering (เป็นปรากฏการณ์ปกติของ Raman) เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำแสง ทำให้เกิดการสั่นของแลตทิซขึ้น ในขณะที่ anti-Stokes scattering เกิดจากการทำลายของความร้อนที่กระตุ้นการสั่น โหมดการสั่นจะขึ้นอยู่กับพันธะของอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman spectrum สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Raman scattering มีประโยชน์ในการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของคาร์บอน โดยเฉพาะฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการ CVD ซึ่งจะมีความไวต่อธรรมชาติของพันธะคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถแยกชนิดของคาร์บอนออกเป็น เพชร, กราไฟท์, อมอร์ฟัส คาร์บอน และไฮโดรจิเนตคาร์บอน สำหรับเพชรแล้วความเข้มอันดับแรกของยอด Raman อยู่ที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} และอันดับสองมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ 2458 cm^{-1} ส่วนของกราฟไฟท์ความเข้มอันดับแรก และอันดับสองอยู่ที่ตำแหน่ง 1580 cm^{-1} และ 3240 cm^{-1} ตามลำดับ รวมทั้งยอดที่เกิดที่ตำแหน่ง 1355 cm^{-1} ที่เป็นของ microcrystalline graphite สำหรับในเทอมของอมอร์ฟัสคาร์บอนยอดมีลักษณะกว้าง



รูปที่ 3-5 แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกที่ตำแหน่งประมาณ 1550 cm^{-1} และ 1355 cm^{-1} ด้วยเหตุที่ประสิทธิภาพของ Raman scattering สำหรับกราฟไฟท์ มีค่ามากกว่าเพชร ดังนั้นจำนวนคาร์บอนที่เป็นกราฟไฟท์ในฟิล์มเพชรที่สร้างด้วยวิธี CVD จำนวนน้อย ๆ สามารถที่จะตรวจพบได้ Raman spectroscopy จึงเป็นเทคนิคที่มีความไว และประสิทธิภาพในการทดสอบคุณภาพของฟิล์มในเทอมของชนิดพันธะ นอกจากนี้จากการกว้างออก และเลื่อนไปของ Raman peak สามารถดูความสมบูรณ์ของโครงสร้างของผลึกได้

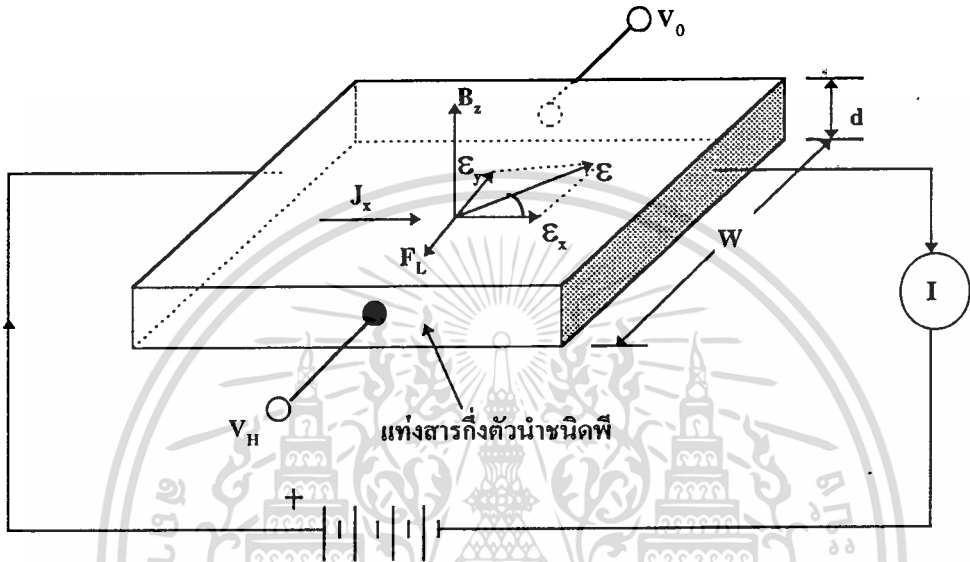
รูปที่ 3-5 เป็นตัวอย่างของ Raman spectra สำหรับฟิล์มเพชรที่สร้างภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันสำหรับฟิล์มที่สร้างภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม สเปกตรัมมีลักษณะแคบที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นของผลึกเพชร (ดังรูปที่ 3-5(a)) ลักษณะการกว้างออกของยอดจากจุดศูนย์กลางที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} รวมทั้งยอดของเพชรที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} จะพบจากฟิล์มที่สร้างภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม ดังรูปที่ 3-5 (b) ฟิล์มจะมีความเป็นเพชรน้อยลง และมีลักษณะเป็น "diamond-like" หรือ อมอร์ฟิสคาร์บอนฟิล์ม ทำให้ยอดดังกล่าวเพิ่มขึ้น และยอด 1332 cm^{-1} มีค่าลดลงหรืออาจหายไป ดังแสดงในรูปที่ 3-5(c) ข้อสังเกตที่สำคัญจากการเปรียบเทียบสเปกตรัมที่แตกต่างกัน ลักษณะสำคัญของพันธะ sp^3 ของเพชร เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำกว่า 1332 cm^{-1} ในขณะที่ยอดที่เกิดจากพันธะ sp^2 ของกราฟไฟท์ เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความถี่สูงกว่า 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากพันธะระหว่าง sp^2 คาร์บอน มีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะระหว่าง sp^3 คาร์บอน

Raman spectroscopy มีประโยชน์อย่างมากต่อการวิเคราะห์ปริมาณความสัมพันธ์ของ sp^3 กับ sp^2 โดยถ้าทราบความแรงของการกระเจิงสัมพันธ์ สามารถที่พิจารณาจำนวนสัมพันธ์ขององค์ประกอบของเพชร และกราฟไฟท์ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธี CVD ได้ ในอีกทางหนึ่งกราฟไฟท์มีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีขาวยาวสูง ส่วนในเพชรจะไม่มี การดูดกลืน ทำให้แสงผ่านเพชรได้ตลอด ดังนั้นถ้าฟิล์มมีกราฟไฟท์ประกอบอยู่แสงที่ผ่านไปในสารจะไม่เป็นระเบียบ ปกติบริเวณของการดูดกลืนจะวัดได้เฉพาะบริเวณผิว ด้วยเหตุนี้ทั้งความเข้มข้น และขนาดของผลึกมีผลที่สำคัญต่อ Raman spectra สำหรับ CVD ของฟิล์มเพชร ที่สร้างภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ผลของขนาดผลึกจึงตัดทิ้งได้ เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบของ microcrystalline graphite ส่วนการสร้างภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม(ตัวอย่าง เช่น ความเข้มข้นของมีเทนในไฮโดรเจนที่มีค่ามากกว่า 2.0%) ขนาดของผลึกมีผลต่อการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์ม ดังนั้นการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มจากเปอร์เซ็นต์สัมพันธ์ของพันธะ sp^3 กับ sp^2 จึงมีความสำคัญ นอกจากนี้ขนาดของผลึกที่บริเวณ sp^2 ก็มีความสำคัญเช่นกัน

3.4 การ วดปรากฏการณ์ฮอลล์

ถ้าหากมีกระแสไหลผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศทางหนึ่ง และให้มีสนามแม่เหล็ก B ตัดผ่านตั้งฉากกับทิศทางของกระแสแล้ว จะปรากฏมีการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าขึ้น โดยมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก การปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า "ปรากฏการณ์ฮอลล์" ในการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Hall effect) จากการทดลองเรื่องปรากฏการณ์ฮอลล์นี้เองทำให้เป็นที่ยืนยันได้ว่าในสารกึ่งตัวนำจะมีประจุพาหะอยู่สองชนิดที่ไม่เหมือนกัน คือ อิเล็กตรอนและโฮล และจะเห็นว่าการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์(Hall coefficient) ไม่เพียงแต่จะบอกให้ทราบว่าพาหะนั้นเป็นชนิดใดเท่านั้น หากแต่ยังสามารถบอกค่าความหนาแน่นของพาหะนั้นได้อีกด้วย และนอกจากนี้จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญได้อีกด้วย



รูปที่ 3-6 แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ก่อนอื่นมาพิจารณากันง่าย ๆ ว่ามีแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีอยู่แท่งหนึ่งดังในรูปที่ 3-6 สมมติว่าพาหะส่วนมากในที่นี้คือโฮล ซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกเท่านั้นและให้ความหนาแน่นของกระแสคือ J_x โฮลผ่านเข้าไปในแท่งสารกึ่งตัวนำโดยการให้สนามไฟฟ้า E_x และในสนามแม่เหล็กมีความหนาแน่นเป็น B_z มีทิศทางไปตามแกน Z

โฮลจะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า E_x ทำให้เกิดมีแรงกระทำต่อโฮลให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v และเนื่องจากโฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในสนามแม่เหล็ก B ทำให้เกิดมีแรงที่เรียกว่า "แรงลอเรนซ์" กระทำต่อโฮล กล่าวคือ

$$F_L = qv \times B \tag{3-4}$$

โดยที่ F_L คือแรงลอเรนซ์และมีขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน | $F_L = q \cdot v_{DX} \cdot B_z$ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้(3-5) ยชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทิศทางไปทางแกน -Y แรงลอเรนซ์นี้จะกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่มาทางแกน -Y (ดูในรูปที่ 3-6) ดังนั้นบริเวณด้านหน้า(แกน -Y) ของแท่งผลึกสารกึ่งตัวนำนี้จะมีโฮลสะสมอยู่เป็นจำนวนมากทำให้ด้านหลังของแท่งผลึกมีจำนวนโฮลลดลงและสาเหตุดังกล่าวนี้เองทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าขึ้นในทิศทาง +Y(ϵ_Y) ช่วยต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ดังนั้นในภาวะสมดุลจะได้ว่า

$$q\epsilon_Y = F_L = q \cdot v_{DX} B_Z \quad (3-6)$$

ความหนาแน่นของกระแส $J_X \cong pq \cdot v_{DX}$

เมื่อแทนค่า v_{DX} ลงในสมการ(3-7) จะได้ว่า

$$\epsilon_Y = \frac{J_X B_Z}{p \cdot q} \quad (3-7)$$

สมมติว่าแท่งสารกึ่งตัวนำนี้กว้าง W เมื่อทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมด้านหน้า และด้านหลังของแท่งผลึกนี้ จะวัดได้เป็น

$$V_H = \epsilon_Y W \quad (3-8)$$

โดยที่ V_H คือ แรงดันฮอลล์ที่ปรากฏตกคร่อมด้านหน้าและหลังของแท่งผลึกกว้าง w นอกจากนี้แล้วจากสมการ(3-7) จัดสมการใหม่เป็น

$$\frac{\epsilon_Y}{J_X B_Z} = \frac{1}{p \cdot q} = R_H \quad (3-9)$$

โดยที่ R_H ถูกนิยามว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และถ้าหากกระแสที่ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งหนา d นี้คือ I แล้วจะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{W \cdot I \cdot B_Z} \cdot W \cdot d = \frac{V_H \cdot d}{I \cdot B_Z} = \frac{1}{p \cdot q} \quad (3-10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันสำหรับปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งนำชนิดเอ็นซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมากจะปรากฏว่าทิศทางของสนาม ϵ_y ที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงข้ามกับกรณีของโฮล และจะได้ว่า

$$R_{He} = -\frac{1}{nq} \quad (3-11)$$

เราจะเห็นว่าการวัดของกระแสทั้งขนาดและเครื่องหมายของแรงดันฮอลล์ (V_H) ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กนี้จะสามารถทำให้เราทราบชนิดของประจุพาหะได้ ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกว่าสารกึ่งตัวนำนี้เป็นชนิดเอ็น หรือชนิดพี นอกจากนี้ยังบอกให้รู้ค่าความหนาแน่นของพาหะส่วนมากในแท่งสารกึ่งตัวนำนั้นอีกด้วย

และเป็นที่น่าสนใจว่าสนามไฟฟ้ารวมในสารกึ่งตัวนำ ก็คือผลรวมของ ϵ_x และ ϵ_y และจะมีทิศทางทำมุม θ กับแกน X และ Y ซึ่งมุม θ ดังรูปที่ 3-6 นี้ถูกเรียกว่า "มุมฮอลล์"(Hall angle) และแสดงโดย

$$\tan \theta = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (3-12)$$

แทนค่า ϵ_y จากสมการ(3-7) และแทน ϵ_x ด้วยค่า J_x/σ แล้วจะได้ว่า

$$\tan \theta = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot q} \cdot \frac{\sigma}{J_x} = \mu_h B_z \quad (3-13)$$

โดยที่

$$\mu_h = \frac{1}{p \cdot q} \cdot \sigma = R_H \cdot \sigma \quad (3-14)$$

ดังนั้นจากการวัดค่าของ R_H และ σ ทำให้เราสามารถคำนวณหาค่า μ_h ซึ่งคือความคล่องตัวของประจุพาหะได้ แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากการพิจารณาของเราไม่ได้คำนึงถึงกลไกของการชนกันระหว่างประจุพาหะซึ่งโดยความเป็นจริงแล้วจะมีผลเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ที่เคหาได้แล้วนั้นก็จะเปลี่ยนไปเป็น

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{p \cdot q} \quad (3-15)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tan \theta = \frac{3\pi}{8} \cdot \mu_h \cdot B_z = \mu_H B_z \quad (3-16)$$

โดยที่ μ_H คือความคล่องตัวของฮอลล์ และมีค่าเป็น

$$\mu_H = \frac{\tan \theta}{B_z} = \frac{3\pi}{8} \cdot \mu_h \quad (3-17)$$

และในกรณีนี้

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma \quad (3-18)$$

สำหรับการหาค่าสภาพนำ (ρ) ของฟิล์มเพชรชนิดพีที่ค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ ใช้การวัดด้วยวิธีของ Van der Pauw ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานของวัสดุต่าง ๆ ที่มีค่าความต้านทานต่ำ โดยวิธี Van der Pauw นี้สามารถใช้วัดสารที่มีรูปร่างใด ๆ ก็ได้

วิธีการของ Van der Pauw จะทำการวัดแรงดันเปิดค่า โดยมีการจ่ายกระแสในลักษณะต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-7 จากนั้นนำค่าแรงดันทั้งแปดค่ามาหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ_A และ ρ_B ดังสมการ :

$$\rho_A = \frac{1.1331 f_A t_s}{I} (V_2 + V_4 - V_1 - V_3) \quad (3-19)$$

$$\rho_B = \frac{1.1331 f_B t_s}{I} (V_6 + V_8 - V_5 - V_7)$$

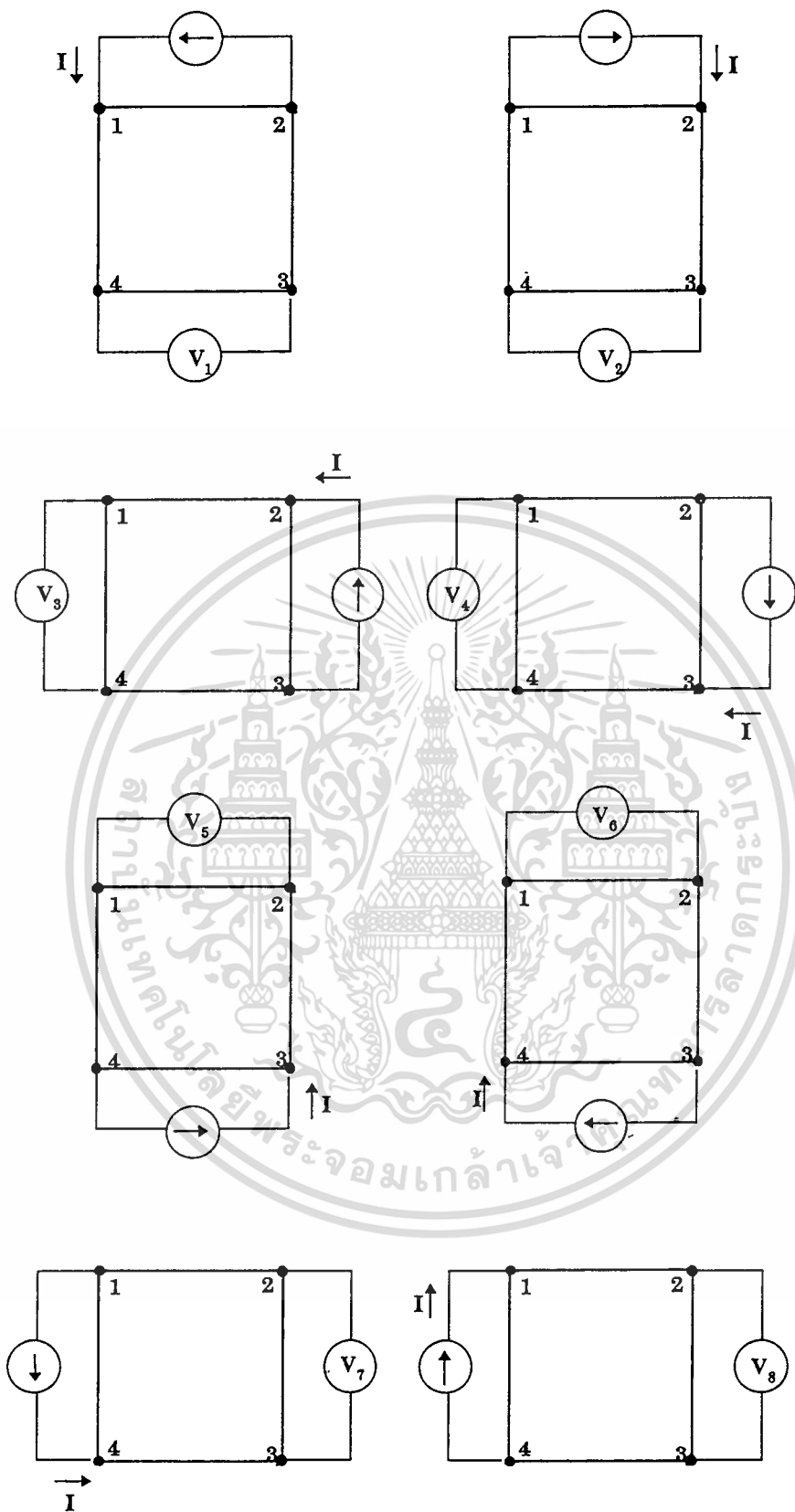
โดยที่ ρ_A และ ρ_B เป็นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ในหน่วยโอห์มเซนติเมตร

t_s เป็นความหนาของชิ้นงาน ในหน่วยเซนติเมตร

V_1 - V_8 เป็นแรงดันที่วัดจากโวลต์มิเตอร์ ในหน่วยโวลต์

I เป็นค่ากระแสที่จ่ายให้ชิ้นสาร ในหน่วยแอมแปร์

ความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนของความต้านทาน Q_A และ Q_B (สำหรับชิ้นสารที่มีความสมมาตรที่สมบูรณ์ จะได้ว่า $f_A = f_B = 1$)



รูปที่ 3-7 แสดงการวัดค่าแรงดันด้วยวิธีการของ Van der Pauw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ Q_A และ Q_B สามารถคำนวณหาจากความสัมพันธ์

$$Q_A = \frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_3} \quad (3-20)$$

$$Q_B = \frac{V_6 - V_5}{V_8 - V_7}$$

นอกจากนี้ Q และ f มีค่าสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{0.693} \operatorname{arccosh} \left(\frac{e^{0.693/f}}{2} \right) \quad (3-21)$$

จากนั้นนำค่า ρ_A และ ρ_B มาหาค่า ρ_{AVG} จาก

$$\rho_{AVG} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \quad (3-22)$$

และสามารถหาสภาพนำได้จาก

$$\sigma = \frac{1}{\rho_{AVG}} \quad (3-23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กระบวนการสร้าง

4.1 กระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง

การสร้างฟิล์มเพชรจากฐานรองที่ไม่ใช่เพชรนั้นมีวัสดุหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้เป็นฐานรองได้ ยกตัวอย่าง เช่น Si, SiC, WC, Ta, W, Mo, และ Al_2O_3 เป็นต้น โดยวัสดุที่เลือกมาทำเป็นฐานรองในการสร้างฟิล์มเพชรจะเป็น Si เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีใช้อยู่แล้วในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่าง ๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ก่อนที่จะนำฐานรองไปใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรนั้น ต้องมีการเตรียมฐานรองก่อน วิธีที่นำเสนอเป็นวิธีการเตรียมฐานรองโดยใช้การขัดด้วยครีมเพชร และการชุบด้วยสารละลายของผงเพชรผสมเอทิลแอลกอฮอล์ มีรายละเอียดการเตรียมดังนี้คือ



รูปที่ 4-1 แสดงครีมเพชรที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรอง

4.1.1 การขัดด้วยครีมเพชร

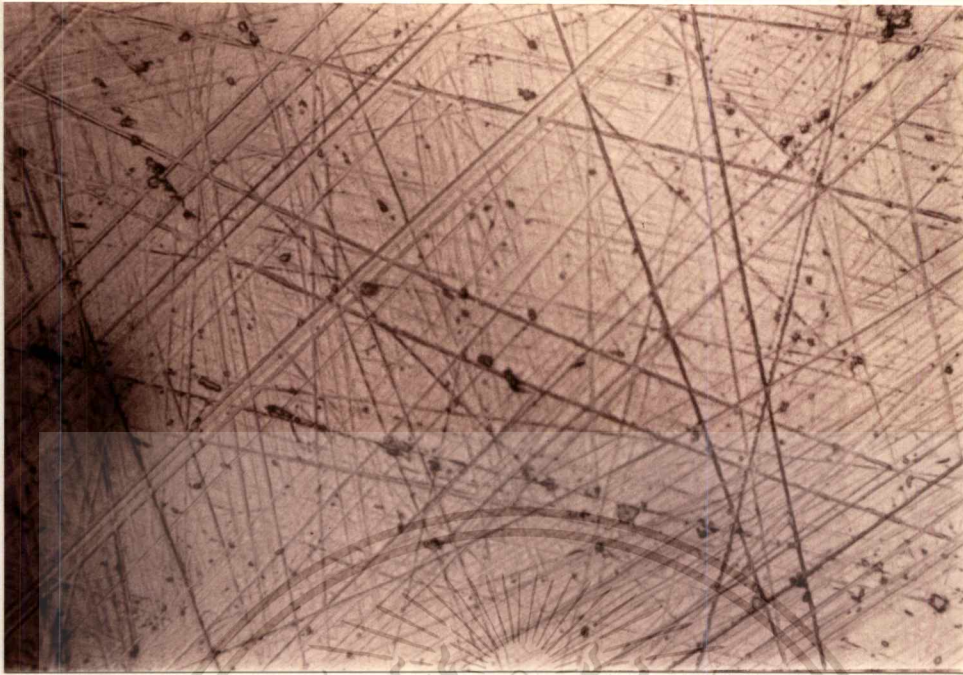
การเตรียมแผ่นฐานรองด้วยวิธีนี้จะใช้ครีมเพชรที่มีขนาด 5 ไมครอน และ 9 ไมครอน ครีมเพชรมีลักษณะดังรูปที่ 4-1 การขัดฐานรองจะขัดในลักษณะวนไปรอบ ๆ เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากขัดเสร็จเรียบร้อยแล้วนำแผ่นไปทำความสะอาด โดยมีวิธีการดังนี้

1). ต้มฐานรองที่ขัดเสร็จแล้วในไตรโคโลอะซิโตน(Trichloacetone) เป็นเวลา 5 นาที

2). super sonic ในอะซิโตน(Acetone) เป็นเวลา 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนโวสสำหรับกรเชงนเพอกรศกษเทहनน ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 แสดงพื้นผิวของแผ่นฐานรองซิลิกอนที่ขัดด้วยครีมเพชร



รูปที่ 4-3 แสดงลักษณะของผงเพชรและสารละลายของผงเพชรในเอทิลแอลกอฮอล์

3). ล้างด้วยน้ำ DI (Deionized water)

4). เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

จากนั้นนำแผ่นฐานรองไปดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ลักษณะพื้นผิวของฐานรองที่ได้จะมี

ลักษณะดังรูปที่ 4-2 กรณีที่ดูแล้วร่องรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นมีน้อยต้องนำไปขัดใหม่ สำหรับร่องรอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวก่อให้เกิดการนิเวศลิเอชั่นของฟิล์มเพชรขึ้น หลังจากเตรียมชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการแยกชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร และยาว 6 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

4.1.2 การชุบด้วยสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์

สำหรับการเตรียมด้วยวิธีนี้ ผงเพชรที่ใช้มีขนาดประมาณ 0.05 ไมครอน กระทำโดยการนำผงเพชรผสมในเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไป super sonic เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ผงเพชรกระจายออก ลักษณะของผงเพชรและสารละลายที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 4-3 นำฐานรองซิลิกอนที่แยกส่วนเรียบร้อยแล้ว(ขนาด 5 x 6 มิลลิเมตร) มาชุบในสารละลาย แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากการตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ฐานรองมีลักษณะของเม็ดเพชรที่กระจายอยู่ทั่วไปดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะพื้นผิวที่ได้จากการชุบสารละลายผงเพชร

4.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

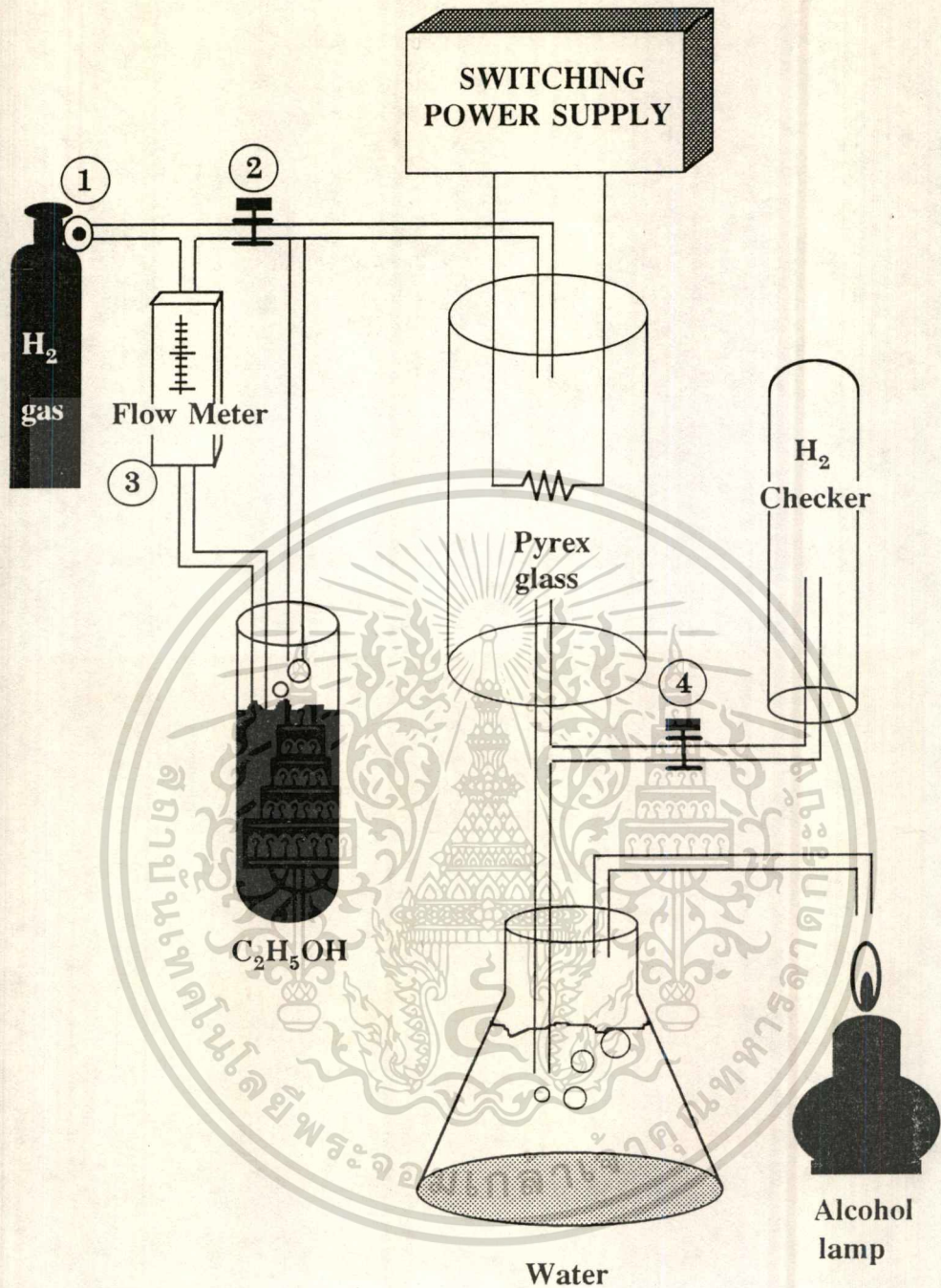
สำหรับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรนั้น จะใช้วิธีการ CVD แบบความร้อนจากระบบที่ประกอบขึ้นเอง ลักษณะของอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นแสดงไว้ในภาคผนวก 2 โดยกระบวนการสร้างพิจารณาจากรูปที่ 4-5 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้คือ

- 1). ตรวจสอบวาล์ว 2 และ 3 ให้อยู่ที่ตำแหน่งเปิดออก ส่วนวาล์ว 4 ให้ปิดไว้
- 2). เปิดวาล์ว 1 ของถังก๊าซไฮโดรเจน ปรับวาล์ว 1 ให้ได้อัตราการไหลของก๊าซ

ไฮโดรเจน 200 ml/min จับเวลา 15 นาที (เพื่อให้ระบบเป็นบรรยากาศของไฮโดรเจน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-5 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างแผ่นฟิล์มเพชร

- 3). ปรับวาล์ว 2 เพื่อแบ่งก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนให้ไหลผ่าน Flow meter โดยปรับวาล์ว 4 จนกระทั่งอ่านสเกลของ Flow meter ได้อัตราการไหล 10 ml/min
- 4). ปรับวาล์ว 3 ให้ได้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเหลือ 70 ml/min พร้อมทั้งปรับวาล์ว 4 ให้ได้อัตราการไหล 10 ml/min จับเวลา 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5). เปิดวาล์ว 4 เพื่อตรวจสอบระบบว่าเป็นก๊าซไฮโดรเจน โดยจุดไฟเผาก๊าซในหลอด จากนั้นปิดวาล์ว 4

6). จุดตะเกียงแอลกอฮอล์ และเปิดพัดลมระบายความร้อน

7). จ่ายกระแสให้กับไส้ทั้งสแตน(ค่อย ๆ เพิ่มกระแส) เพิ่มกระแสจนสามารถวัดอุณหภูมิที่ไส้หลอดให้มีความเหมาะสม(กระแสที่ใช้ประมาณ 7-8 แอมแปร์ AC)

8).ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่โดยใช้ Portable Radiation Thermometer ของ CHINO (แสดง ดังรูปที่ 4-6)

9). ปรับระยะห่างระหว่างฐานรองกับไส้หลอดทั้งสแตนให้มีความประมาณ 1-2 มิลลิเมตร

10). ใช้เวลาในการสร้าง 2 ชั่วโมง

11). ปิดแหล่งจ่ายกระแส(ค่อย ๆ ลดลง) พร้อมทั้งปิดวาล์ว 1

12). รอจนกระทั่งก๊าซที่ค้างอยู่ในหลอดหมด จึงดับตะเกียงแอลกอฮอล์

13). ปิดวาล์ว 2 รอจนระบบเย็นจึงนำฟิล์มออกมาทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป



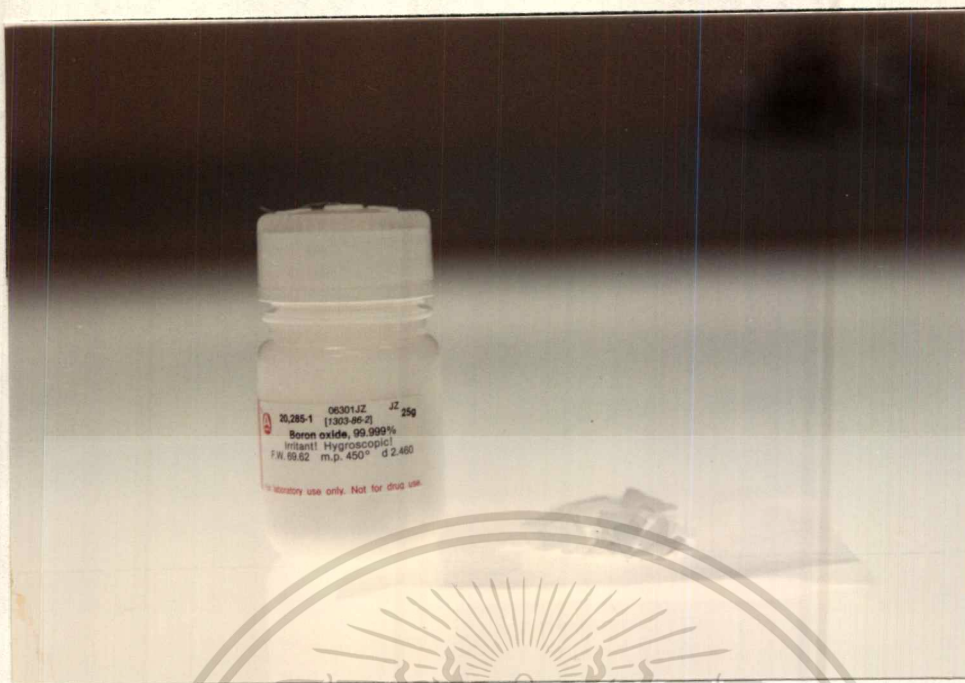
รูปที่ 4-6 แสดง Portable Radiation Thermometer

4.3 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี

ในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี แหล่งจ่ายที่ใช้จะแตกต่างจากที่ใช้ในการสร้างฟิล์มชนิดอินทรินซิก ซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นเอทิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว การสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีทำโดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน โดยสารเริ่มต้นที่ใช้เป็นโบรอนไตรออกไซด์(B_2O_3) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% ผลึกมีลักษณะดังรูปที่ 4-7 สำหรับวิธีการเตรียมสารละลายของโบรอนไตร

ออกไซด์ในเอทิลแอลกอฮอล์ ต้องมีการคำนวณปริมาณ โบรอนไตรออกไซด์และเอทิลแอลกอฮอล์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-7 แสดงลักษณะผลึกของโบรอนไดรอกไซด์

สอลที่ใช้ในรูปของอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอน(B/C) ที่มีหน่วยเป็น ppm(part per million) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

4.3.1 การคำนวณหาปริมาณโบรอนไดรอกไซด์ที่ค่า B/C ต่าง ๆ

สำหรับการคำนวณหาปริมาณโบรอนต่อคาร์บอน อาศัยความรู้จากมวลสารสัมพัทธ์ ก่อนอื่นต้องทราบน้ำหนักอะตอมของธาตุแต่ละชนิด ซึ่งสารที่ใช้เป็นโบรอนไดรอกไซด์ และเอทิลแอลกอฮอล์ที่ประกอบด้วยอะตอมของ โบรอน, ออกซิเจน, คาร์บอน และไฮโดรเจน น้ำหนักอะตอมของธาตุแต่ละชนิดมีค่าดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงน้ำหนักอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ

| อะตอม | น้ำหนักอะตอม(กรัม) |
|----------|--------------------|
| โบรอน | 10.811 |
| คาร์บอน | 12.01115 |
| ออกซิเจน | 15.9994 |
| ไฮโดรเจน | 1.00797 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากน้ำหนักอะตอมคำนวณหาค่าน้ำหนักโมเลกุลได้เป็น

โบรอนไตรออกไซด์(B_2O_3) ประกอบด้วย โบรอนจำนวน 2 อะตอม

ออกซิเจนจำนวน 3 อะตอม

ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลมีค่า

$$\begin{aligned} &= (\text{น้ำหนักอะตอมของโบรอน} \times 2) + (\text{น้ำหนักอะตอมของออกซิเจน} \times 3) \\ &= (10.811 \times 2) + (15.9994 \times 3) \\ &= 69.6202 \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

เอทิลแอลกอฮอล์(C_2H_5OH) ประกอบด้วย คาร์บอนจำนวน 2 อะตอม

ไฮโดรเจนจำนวน 6 อะตอม

ออกซิเจนจำนวน 1 อะตอม

ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลมีค่า

$$\begin{aligned} &= (\text{น้ำหนักอะตอมของคาร์บอน} \times 2) + (\text{น้ำหนักอะตอมของไฮโดรเจน} \times 6) + \\ &\quad (\text{น้ำหนักอะตอมของออกซิเจน} \times 1) \\ &= (12.01115 \times 2) + (1.00797 \times 6) + (15.9994 \times 1) \\ &= 46.0695 \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของโบรอน และคาร์บอนจาก

โบรอนไตรออกไซด์หนัก 69.6202 กรัม เป็นน้ำหนักของโบรอน 21.622 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นมีโบรอนอยู่ร้อยละ} &= \frac{21.622 \times 100}{69.6202} \quad \text{กรัม} \\ &= 31.0571 \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

เอทิลแอลกอฮอล์หนัก 46.0223 กรัม เป็นน้ำหนักของคาร์บอน 24.0223 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นมีคาร์บอนอยู่ร้อยละ} &= \frac{24.0223 \times 100}{46.0692} \quad \text{กรัม} \\ &= 52.1439 \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

เนื่องจากสาร 1 โมลประกอบด้วยอะตอมจำนวน 6.02×10^{23} อะตอม ดังนั้นโบรอนไตรออกไซด์ 1 โมล ประกอบด้วยโบรอนจำนวน $6.02 \times 10^{23} \times 31.0571$ อะตอม ถ้าโบรอนไตรออกไซด์จำนวน X โมล จะประกอบด้วยโบรอนจำนวน $6.02 \times 10^{23} \times 31.0571 \times X$ อะตอม ในทำนองเดียวกันกับเอทิลแอลกอฮอล์ ถ้ามีเอทิลแอลกอฮอล์ Y โมล จะประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน $6.02 \times 10^{23} \times 52.1439 \times Y$ อะตอม โดยที่

$$X = \frac{\text{น้ำหนักโบรอนไตรออกไซด์(กรัม)}}{69.6202} \quad \text{โมล} \quad (4.1)$$

$$Y = \frac{\text{น้ำหนักเอททิลแอลกอฮอล์(กรัม)}}{46.0695} \quad \text{โมล} \quad (4.2)$$

ดังนั้นอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าเป็น

$$B/C = \frac{6.02 \times 10^{23} \times 31.0571 \times X}{6.02 \times 10^{23} \times 52.1439 \times Y} \times 10^6$$

$$= \frac{31.0571 \times X}{52.1439 \times Y} \times 10^6 \quad \text{ppm} \quad (4.3)$$

ตัวอย่าง การคำนวณหาปริมาณโบรอนไดรอกไซด์ที่มีค่าโบรอนต่อคาร์บอนเป็น 10,000 ppm

เตรียมสารละลายจำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีทำ เนื่องจากทราบว่าเอททิลแอลกอฮอล์ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรหนัก 0.789 กรัม
 ดังนั้นเอททิลแอลกอฮอล์จำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรหนัก 0.789×50 กรัม
 = 39.45 กรัม

จากสมการ(4.2) $Y = \frac{\text{น้ำหนักเอททิลแอลกอฮอล์(กรัม)}}{46.0695}$ โมล

จำนวนโมลของเอททิลแอลกอฮอล์จำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรมีค่า

$$Y = \frac{39.45}{46.0695} = 0.8563 \quad \text{โมล}$$

จากสมการ(4.3)

$$B/C = \frac{31.0571 \times X}{52.1439 \times Y} \times 10^6$$

แทนค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน และจำนวน โมลของเอททิลแอลกอฮอล์ได้

$$X = \frac{10000 \times 52.1439 \times 0.8563}{31.0571 \times 10^6}$$

$$= 0.01438 \quad \text{โมล}$$

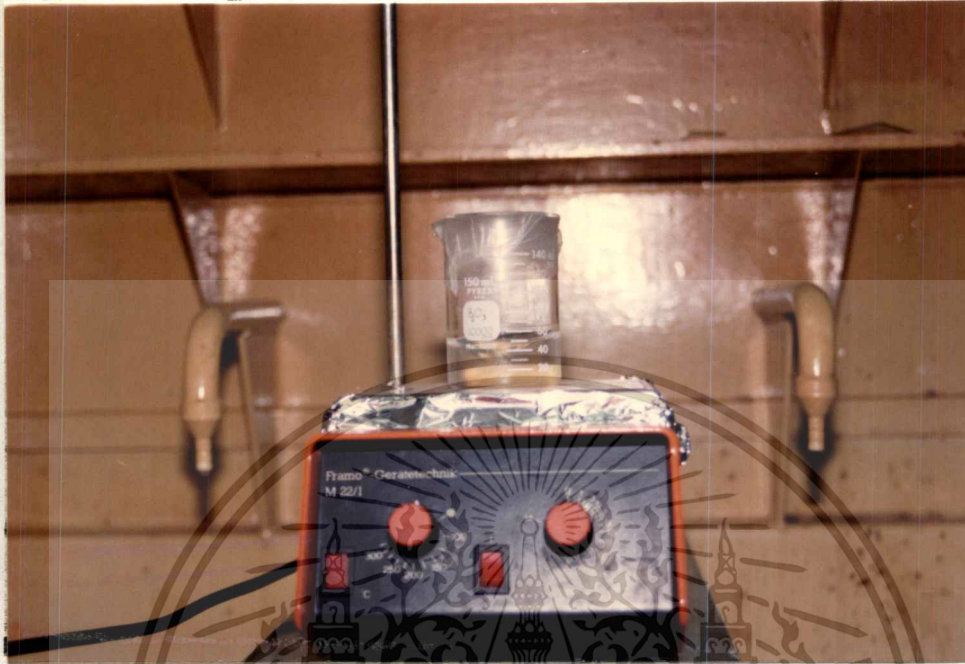
จากสมการ(4.1) $X = \frac{\text{น้ำหนักโบรอนไดรอกไซด์(กรัม)}}{69.6202}$

ดังนั้นน้ำหนักของโบรอนไดรอกไซด์ที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายจำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าเป็น $(0.01438 \times 69.6202) = 1.0011$ กรัม

สำหรับน้ำหนักของโบรอนไดรอกไซด์ที่ค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนอื่น ๆ ที่เตรียมสารละลายจำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-2

ไดรอกไซด์หนัก 0.00001 กรัม การชั่งจึงต้องใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดอย่างมาก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จะเตรียมสารละลายโดยเริ่มเตรียมที่อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าสูง เช่น 10000 ppm จากนั้นจึงเจือจางสารละลายลงมาตามส่วน โดยจากข้างต้นทราบว่าเมื่ออัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนลดลง 10 เท่า น้ำหนักของโบรอนไดรอกไซด์จะลดลง 10 เท่าเช่นกัน ดังนั้นถ้าเจือจางสารละลายจาก 10000 ppm ให้เป็นสารละลายที่ 1000 ppm ต้องเจือลงมา 10 เท่า เช่น จากสารละลาย 10000 ppm จำนวน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้เป็นสารละลายที่ 1000

ppm ได้ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการเติมเอทิลแอลกอฮอล์อีก 45 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับที่ค่าโบรอนต่อคาร์บอนค่าอื่น สามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 4-8 แสดงการเตรียมสารละลายของโบรอนไตรออกไซด์

4.3.3 การสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี

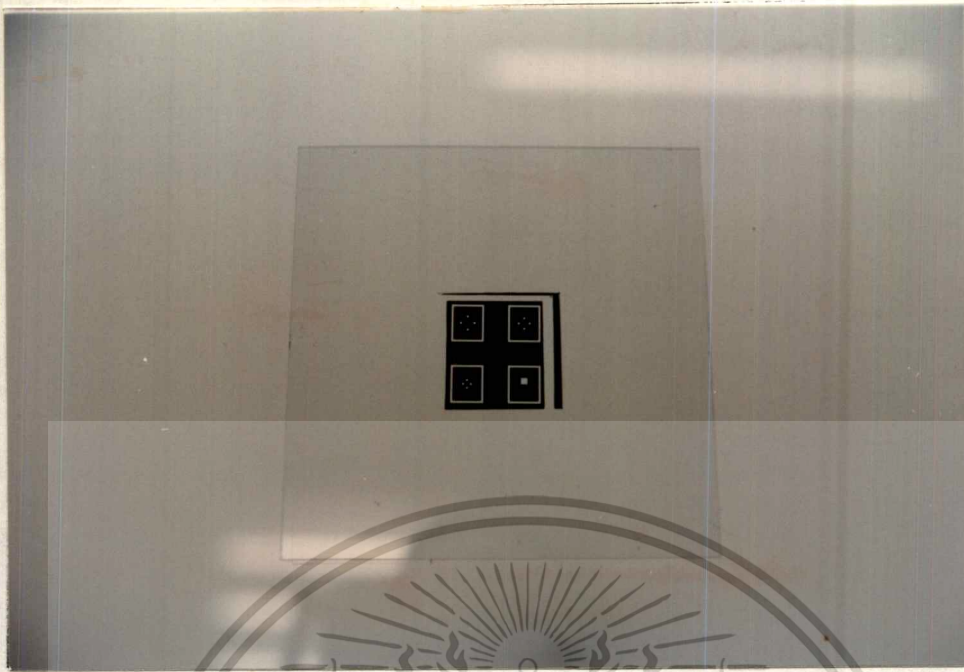
กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีมีขั้นตอนการสร้างเช่นเดียวกับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 4-5 จะแตกต่างกันตรงแหล่งจ่ายที่ใช้จะเป็นสารละลายของโบรอนไตรออกไซด์ในเอทิลแอลกอฮอล์ แทนที่จะเป็นเอทิลแอลกอฮอล์อย่างเดียว สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรที่มีอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าต่าง ๆ กันนั้นทำโดยการเปลี่ยนแหล่งจ่ายเป็นสารละลายที่เตรียมที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าตามต้องการ

เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของอะตอมสารเจือของโบรอน ระบบที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีจึงสร้างขึ้นใหม่อีกชุดหนึ่ง โดยแยกออกจากระบบที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

4.4 กระบวนการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรด้วยวิธี lift-off

ในการนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ต้องมีการสร้างขั้วโลหะ สำหรับวิธีที่นำเสนอเป็นอีกวิธีหนึ่งของการสร้างรอยต่อโลหะที่เหมาะสมสำหรับใช้กับฟิล์มเพชร คือวิธี lift-off การสร้างเริ่มจากการสร้างกระจกต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4-9 ส่วนรายละเอียดขั้นตอนการสร้างด้วยวิธีนี้แบ่งเป็นขั้นตอนย่อย ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-9 แสดงกระจกต้นแบบในการสร้างขั้วโลหะ

4.4.1 การทำความสะอาดพื้นผิวฟิล์มเพชรเริ่มต้น

การทำความสะอาดพื้นผิวเป็นการกำจัดคราบไขมัน และสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจากพื้นผิวฟิล์ม เพื่อให้มีความสะอาดในการนำไปทำกระบวนการต่อไป มีขั้นตอนดังนี้

- 1). ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน(Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที
- 2). ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูง(Supersonic cleaner) เป็นเวลา 3 นาที
- 3). ล้างด้วยน้ำ DI(Deionization water)
- 4). เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน(N_2)

4.4.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

โฟโตลิโทกราฟีเป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายจากกระจกต้นแบบลงบนฟิล์มที่เคลือบนำยาไวแสงไว้ วิธีการ lift-off นี้ใช้น้ำยาไวแสงที่ใช้เป็นชนิดบวก ขั้นตอนการสร้างมีดังนี้

- 1). นำฟิล์มไปปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 2). เคลือบนำยาไวแสง Az โดยใช้เครื่องสปินเนอร์(Spinner) ที่ความเร็ว 2000 รอบ/นาที นำไปปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)
- 3). นำฟิล์มที่เคลือบนำยาไวแสงไปฉายลวดลายด้วยเครื่อง Mask aligner เป็นเวลา 30 วินาที
- 4). ล้างฟิล์มด้วย Az developer

เอกสารนี้ 5). เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 การเคลือบชั้นโลหะในสุญญากาศ

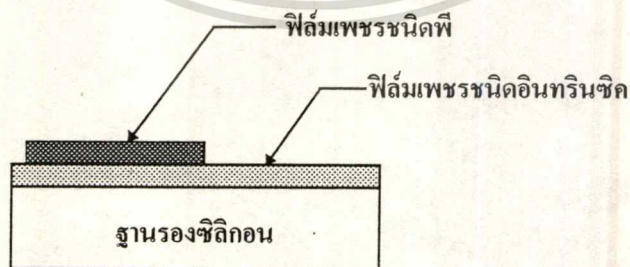
การเคลือบชั้นโลหะ(Au,Al) ในสุญญากาศ กระทำที่ความดัน $1-3 \times 10^{-6}$ ทอร์ โดยวิธีแบบความร้อน ด้วยเครื่อง vaccum evaporator ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ ค-4 ในภาคผนวก ค จากการเคลือบจะให้ความหนาของชั้นโลหะประมาณ 1 ไมครอน จากนั้นทำการ lift-off โดยใช้น้ำยา Az ด้วยอะซิโตน โลหะที่ติดบนน้ำยา Az จะหลุดออกไปเหลือเฉพาะโลหะส่วนที่เป็นขั้วที่เปิดช่องไว้

4.4.4 กระบวนการซินเตอร์ริง(sintering)

การซินเตอร์ริง กระทำเพื่อให้รอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรเกาะติดแน่นขึ้น กระทำในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 1000 cc/min กระจกของทองคำ การซินเตอร์ริงกระทำที่อุณหภูมิ 890 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที สำหรับกรณีลูมิเนียมจะซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที

4.5 กระบวนการสร้างฟิล์มชนิดรอยต่อ p-i

การสร้างฟิล์มชนิดรอยต่อ p-i วิธีการสร้างเริ่มจากการสร้างฟิล์มชนิดอินทรีนซิก ตามด้วยกระบวนการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 จากนั้นนำฟิล์มไปสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อให้เกิดรอยต่อขึ้นของฟิล์มชนิดอินทรีนซิกกับชนิดพีขึ้น ซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่า รอยต่อ p-i โดยในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีจะสร้างผ่านหน้าฉาก ที่สร้างจากการกัดแผ่นซิลิกอนด้วยน้ำยา KOH ให้ทะลุเป็นช่อง และนำไปติดบนฐานรองที่สร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นเมื่อทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี เกิดฟิล์มขึ้นตรงบริเวณที่ทำการเปิดช่องไว้ตามต้องการ รูปที่ 4-13 เป็นภาพตัดขวางของรอยต่อ p-i



รูปที่ 4-11 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่อ p-i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 กระบวนการสร้างขอตต์กีไดโอด

ขอตต์กีไดโอดเป็นไดโอดที่เกิดจากรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากการเกิดโลหะต้องมีค่าฟังก์ชันงานน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาเชื่อมต่อกัน บริเวณรอยต่อเกิดมีกำแพงศักย์ขึ้น ทำให้สามารถควบคุมทิศทางการไหลของกระแสได้ โดยควบคุมจากขั้วของแรงดันที่ป้อนให้กับระบบ ดังนั้นรอยต่อที่เกิดขึ้นจึงมีคุณสมบัติเป็นไดโอด จากการศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ รอยต่อระหว่างทองกับฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก ในขณะที่รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรมีแบริเออร์เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงนำอลูมิเนียมมาสร้างเป็นส่วนหนึ่งของโลหะ เพื่อสร้างเป็นขอตต์กีไดโอด

การสร้างขอตต์กีไดโอด มีกระบวนการสร้างดังนี้คือ

- 1). การสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีตามกระบวนการในหัวข้อ 4.3
 - 2). นำฟิล์มเพชรมาทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารละลายอิมตัวของ $\text{CrO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
 - 3). จากนั้นล้างด้วยสารละลายเค็ดของ H_2O_2 และ 30 % NH_4OH ในอัตราส่วน 1:1
 - 4). ล้างด้วยน้ำ DI
 - 5). เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - 6). นำฟิล์มที่ทำความสะอาดแล้วไปทำขั้วโลหะทอง โดยการเคลือบในสุญญากาศที่ความดัน $1-3 \times 10^{-6}$ ทอร์
 - 7). นำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 890 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที
 - 8). นำฟิล์มไปเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศที่ความดัน $1-3 \times 10^{-6}$ ทอร์
 - 9). นำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที
- จากวิธีการสร้างในข้อที่ 2 และ 3 เป็นวิธีการทำความสะอาดพื้นผิวของฟิล์ม ซึ่งจะทำให้ส่วนของคาร์บอนที่ไม่มีโครงสร้างเป็นเพชรหลุดออกหมด

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงระบบ CVD ที่ประกอบขึ้น และกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน ทั้งที่เป็นชนิดอินทรีนซิค และชนิดพี ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่สร้างขึ้น โดยแบ่งออกเป็น การศึกษาฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค และฟิล์มเพชรชนิดพี โดยศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม และการนำฟิล์มไปประยุกต์ใช้งาน พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ สำหรับรายละเอียดได้กล่าวต่อไป

5.1 การศึกษาฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค

เนื่องจากการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค เป็นการเริ่มต้นศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม และนำฟิล์มที่สร้างได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วย SEM, การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ Raman Spectroscopy เพื่อยืนยันถึงฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อนนี้มีคุณสมบัติเป็นเพชร

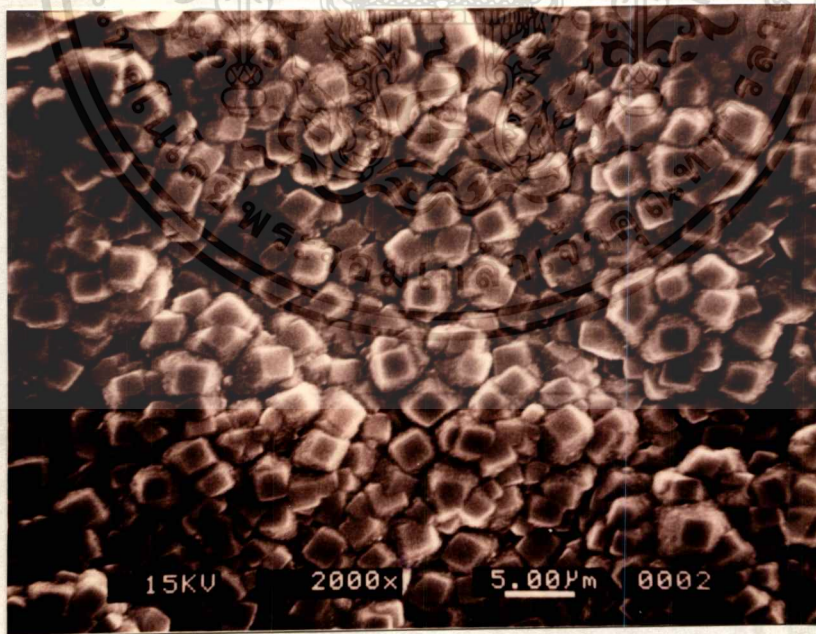
5.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะพื้นผิว

ในการสร้างเพชรด้วยวิธีการ CVD มีพารามิเตอร์หลายอย่างที่มีผลต่อคุณภาพของฟิล์ม ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาเงื่อนไขการสร้างที่เหมาะสม อุณหภูมิของฐานรองเป็นพารามิเตอร์แรก ที่ทำการศึกษา ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของฟิล์มและลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม โดยลักษณะพื้นผิวของฟิล์มขึ้นกับเงื่อนไข และสิ่งแวดล้อมในการสร้าง ดังนั้นรายละเอียดในการทำความเข้าใจรูปร่างลักษณะของฟิล์ม และกลไกการสร้างจึงมีความสำคัญต่อการนำฟิล์มเพชร ไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากวิธีการ CVD แบบความร้อนที่นำมาใช้ในการสร้างฟิล์มนี้ อุณหภูมิของฐานรองได้จากการส่งผ่านความร้อนจากไส้หลอด ดังนั้นระยะห่างระหว่างไส้หลอด และฐานรองจึงต้องมีค่าเหมาะสม กำหนดให้มีค่าเป็น 1.4 มิลลิเมตร ในการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิให้มีค่าต่าง ๆ กันนั้น อาศัยการควบคุมจากการจ่ายกระแสให้กับไส้หลอด โดยทั่วไปกระแสที่จ่ายให้กับไส้หลอดมีค่าประมาณ 7-8 แอมแปร์ การวัดอุณหภูมิของไส้หลอด และอุณหภูมิของฐานรองใช้ Portable Radiation Thermometer ของ CHINO-IR-AH อุณหภูมิของไส้หลอดที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วง 2000-2100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของฐานรองอยู่ระหว่าง 900-1000 องศาเซลเซียส ก๊าซไฮโดรเจนที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาเอาไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ไปยังบริเวณที่สร้างฟิล์ม มีอัตราการไหลเป็น 10 มิลลิลิตร/นาที กระทำที่ความดันบรรยากาศ ใช้เวลาในการสร้าง 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

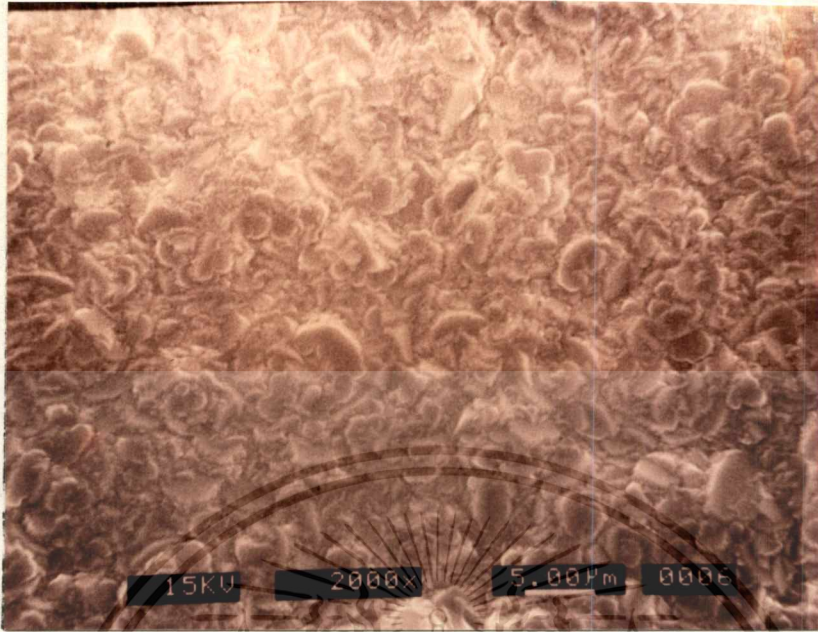


รูปที่ 5-1 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM ของระนาบ(111)
ที่อุณหภูมิฐานรองมีค่า 950 องศาเซลเซียส

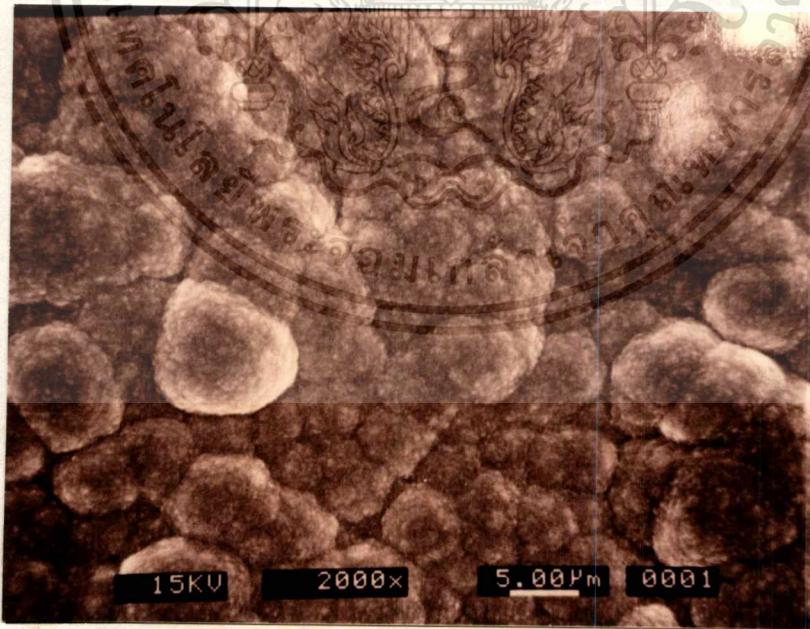


รูปที่ 5-2 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM ของระนาบ(100)
ที่อุณหภูมิฐานรองมีค่า 940 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-3 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่
ที่อุณหภูมิฐานรองมีค่า 930 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5-4 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์เล็ก
ที่อุณหภูมิฐานรองมีค่า 920 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในตอนนี้แสดงให้เห็นลักษณะรูปร่างของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM ที่เงื่อนไขของอุณหภูมิต่าง ๆ กัน แสดงได้ดังรูปที่ 5-1 ถึง 5-4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่สร้างจากเงื่อนไขของอุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสมค่าหนึ่ง(950 องศาเซลเซียส) ดังแสดงในรูปที่ 5-1 มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมทั่วทั้งแผ่น พิจารณาจาก Miller indices ที่ h,k,l มีค่าเป็น 1,1,1 พบว่าลักษณะของระนาบจะเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าลักษณะพื้นผิวมีระนาบเป็น (111) รูปที่ 5-2 ลักษณะพื้นผิวของผลึกเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งสร้างโดยลดค่าอุณหภูมิของฐานรองลงมาจากตอนที่ใช้ในการสร้างฟิล์มในรูปที่ 5-1 ประมาณ 10 องศาเซลเซียส ในทำนองเดียวกัน ลักษณะพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม Miller indices มีค่า h,k,l เป็น 1,0,0 หรือมีระนาบเป็น(100) เมื่อลดอุณหภูมิของฐานรองลงมาก่อประมาณ 10 องศาเซลเซียส พื้นผิวของฟิล์มจะมีลักษณะผลึกไม่เป็นรูปขนาดใหญ่อีก ดังรูปที่ 5-3 ส่วนรูปที่ 5-4 ลักษณะพื้นผิวเป็นลักษณะของผลึกขนาดเล็กคล้ายดอกกะหล่ำ(cauliflower) ซึ่งเป็นผลจากการลดอุณหภูมิของฐานรองลงมาก่อประมาณ 10 องศาเซลเซียส สำหรับการสร้างที่อุณหภูมิฐานรองมีค่าสูงกว่า 950 องศาเซลเซียส ฐานรองมีรอยไหม้เกิดขึ้น และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 920 องศาเซลเซียส บนฐานรองไม่มีฟิล์มเกิดขึ้น จากลักษณะพื้นผิวต่าง ๆ ที่ได้ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของฐานรองมีผลต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ดังนั้นในการนำฟิล์มไปประยุกต์ใช้งาน จึงสามารถเลือกระนาบที่จะนำไปใช้งานได้ โดยควบคุมอุณหภูมิของฐานรองที่ใช้ในการสร้างฟิล์มให้มีค่าเหมาะสม

5.1.2 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

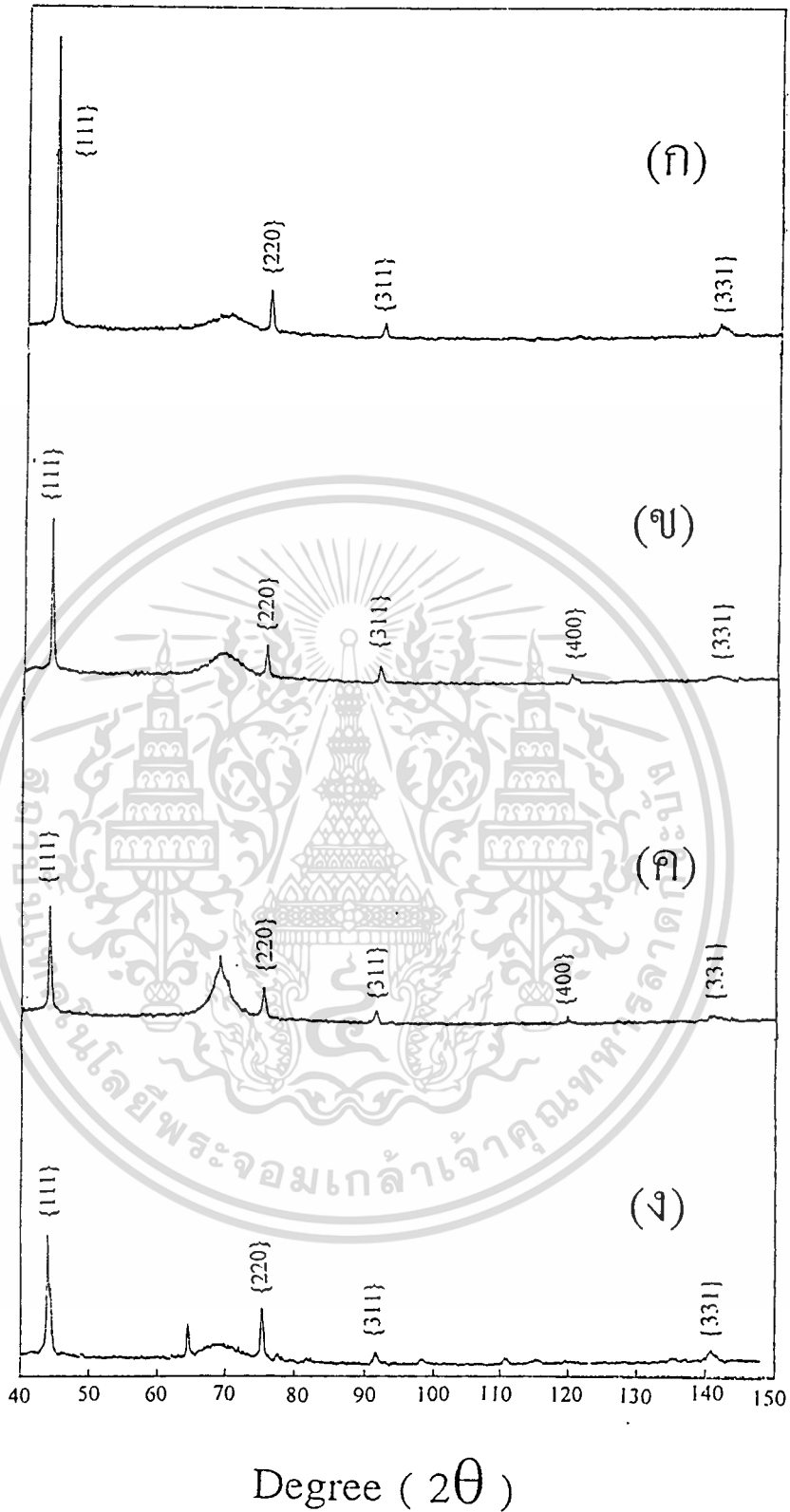
การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นวิธีที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาพารามิเตอร์ของแลตทิซ และลักษณะของฟิล์มเพชรที่สร้างด้วยวิธีการ CVD นอกจากนี้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถบอกความแตกต่างระหว่างเฟสของผลึกคาร์บอนได้ จากการนำฟิล์มไปทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ออกมา โดยฟิล์มที่ทำการศึกษาจะสร้างภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิฐานรองที่แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงได้ดังรูปที่ 5-5 การศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแลตทิซนั้น จะวิเคราะห์จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้ พิจารณาจาก Bragg's law

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

ยกตัวอย่างการคำนวณค่า interplanar spacing (d) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ระนาบ(111) ที่ตำแหน่ง $2\theta = 44.09$ หรือ $\theta = 22.045$ เนื่องจากเป็นการเลี้ยวเบนอันดับแรก ดังนั้น $n = 1$ และแหล่งจ่ายรังสีเอ็กซ์ที่ใช้เป็นของ $\text{CuK}\alpha$ ซึ่งมีค่าความยาวคลื่น 1.5418 Å เมื่อแทนค่าในสมการของ Bragg จะได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Relative Intensity (Arb.Units)



รูปที่ 5-5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ

ก) ระบาย(111)

ข) ระบาย(100)

ค) ผลึกขนาดใหญ่

ง) ผลึกขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$= \frac{1.5418}{2 \sin 22.045} = 2.054$$

จากการเปรียบเทียบค่า interplanar spacing ที่คำนวณได้กับค่ามาตรฐาน ASTM (6-675) ที่ค่า interplanar spacing ค่าดังกล่าวจะมี Miller indices h,k,l เป็น 1,1,1 สำหรับที่ค่า 2θ อื่น ๆ ก็สามารรถได้ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ 5-1 แสดงค่า interplanar spacing ที่มุม 2θ ต่าง ๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่ามาตรฐาน

ตารางที่ 5-1 แสดงการเปรียบเทียบค่า interplanar spacing ของฟิล์มเพชรชนิด อินทรินซิกกับค่ามาตรฐาน ASTM (6-675)

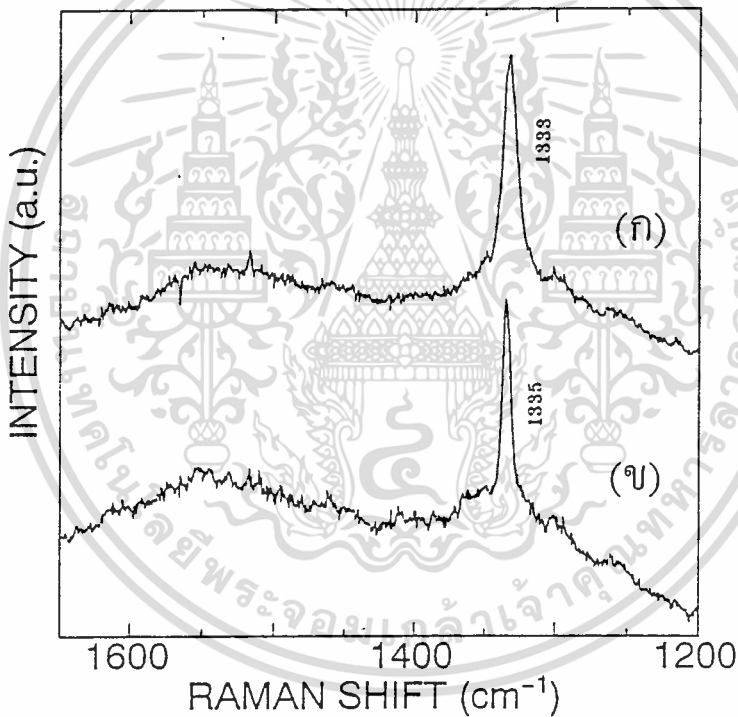
| ระนาบ(111) d(A) | ระนาบ(100) d(A) | ค่ามาตรฐาน d(A) | ASTM hkl |
|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| 2.054 | 2.058 | 2.06 | 111 |
| 1.261 | 1.261 | 1.261 | 220 |
| 1.0735 | 1.0753 | 1.0754 | 311 |
| - | 0.8915 | 0.8916 | 400 |
| 0.8188 | 0.8181 | 0.8182 | 331 |

จากตารางจะเห็นได้ว่าระนาบหลักของเพชรที่เกิดขึ้นคือ ระนาบ (111), (200), (311), (400), และ(331) สังเกตเห็นว่าระนาบของการเลี้ยวเบนมีจำนวนน้อย และเป็นจำนวนคู่หรือคี่หมด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเพชรมีลักษณะสมดุลงเป็นผลึกแบบ cubic จากภาพถ่าย SEM เราทราบว่าผลึกรูปสามเหลี่ยมมีระนาบเป็น (111) ส่วนผลึกรูปสี่เหลี่ยมมีระนาบเป็น (100) พิจารณารูปที่ 5-5 ข) มีตำแหน่งยอดเกิดขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 119.7 องศา ซึ่งที่ตำแหน่งดังกล่าวมีระนาบเป็น (400) เนื่องจากระนาบ(400) เป็นระนาบที่ขนานกับระนาบ(100) ดังนั้นจึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่ารูปที่ 5-6 เป็นของระนาบ(100) ส่วนรูปที่ 5-5 ก) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) จะไม่พบยอดดังกล่าวเกิดขึ้น

พิจารณารูปที่ 5-5 ค) มียอดที่ไม่ใช่ยอดของเพชรเกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 69.2 องศา เมื่อดำเนินการหาค่า interplanar spacing มีค่า 1.36 Å ส่วนรูปที่ 5-5 ง) มียอดที่ไม่ใช่ยอดของเพชรเกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 119.7 องศา ซึ่งที่ตำแหน่งดังกล่าวมีระนาบเป็น (400) เนื่องจากระนาบ(400) เป็นระนาบที่ขนานกับระนาบ(100) ดังนั้นจึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่ารูปที่ 5-6 เป็นของระนาบ(100) ส่วนรูปที่ 5-5 ก) เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) จะไม่พบยอดดังกล่าวเกิดขึ้น

เพชรเกิดขึ้นที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 44.4, 64.6, 98.2 และ 110.7 องศา ค่าของ interplanar spacing มีค่า 2.04, 1.44, 0.98 และ 0.94 ตามลำดับ สำหรับค่า interplanar spacing เท่ากับ 2.04 Å พบว่าเป็นข้อมูลของคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นกราฟไฟท์ สำหรับยอดอื่นที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการที่พื้นผิวมีจุดบกพร่อง, ผลึกมีขนาดเล็ก และอุณหภูมิของฐานรองมีค่าต่ำ

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะเห็นว่ายอดที่ตำแหน่งมุม 2θ สูง ๆ ลักษณะของยอดมีลักษณะกว้างออกเป็นผลเนื่องจากแหล่งจ่ายรังสีเอ็กซ์ที่ใช้เป็น $\text{CuK}\alpha$ ที่มีค่าความยาวคลื่น 1.5418 Å ซึ่งเป็นความยาวคลื่นระหว่าง $K\alpha_1$ และ $K\alpha_2$ ที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก ความแตกต่างของความยาวคลื่นจะไม่มีผลที่ค่ามุม 2θ น้อย ๆ (น้อยกว่า 100 องศา) แต่ที่มุม 2θ สูง ๆ ความยาวคลื่นจะมีผลต่อการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ค่ามุมสูง ๆ ไม่ชัดเจน



รูปที่ 5-6 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ของ
 ก) ระบาย (111) ข) ระบาย (100)

5.1.3 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วย Raman Spectroscopy

Raman Spectroscopy เป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของคาร์บอน โดยเฉพาะฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการ CVD เนื่องจากมีความไวต่อธรรมชาติของพันธะคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถแยกชนิดของคาร์บอนที่เป็น เพชร, กราไฟท์, อมอร์ฟิส และไฮโดรจีเนต คาร์บอน ได้ การวิเคราะห์จะพิจารณาจาก Raman Spectrum สำหรับเพชรในธรรมชาติไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชาตินั้น Raman Spectrum มียอดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} พันธะเคมีของเพชรมีพันธะเป็นแบบ sp^3 โดยทั่วไปฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการ CVD ยอดที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะมีความกว้างอยู่ในช่วงเลขคลื่น 1500 cm^{-1} ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลเนื่องจากพันธะ sp^2 หรือ พันธะของกราฟไฟท์ จากรูปที่ 5-6 แสดง Raman Spectrum ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy โดยรูปที่ 5-6 ก) เป็นของฟิล์มที่มีระนาบ (111) มียอดอยู่ที่ตำแหน่ง 1333 cm^{-1} และรูปที่ 5-6 ข) เป็นของฟิล์มที่มีระนาบ (100) มียอดอยู่ที่ตำแหน่ง 1335 cm^{-1} เปรียบเทียบตำแหน่งยอดของระนาบทั้งสองพบว่าฟิล์มที่มีระนาบ (111) มียอดใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นของเพชรในธรรมชาติมากกว่า ระนาบ(100) แสดงว่าฟิล์มที่มีระนาบ(100) มีองค์ประกอบของพันธะ sp^2 มากกว่าของฟิล์มที่มีระนาบเป็น (111) ดังนั้นผลที่ได้จากการวัดด้วย Raman Spectroscopy จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชร โดยมีตำแหน่งเลขคลื่นใกล้เคียงกับของเพชรในธรรมชาติ การที่ยอดของสเปกตรัมมีการเลื่อนตำแหน่งไปเล็กน้อยเป็นผลจากพันธะ sp^2 ของกราฟไฟท์ที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม

5.1.4 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม

จากการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน โดยอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นเอง พบว่าการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD ให้มีคุณภาพดีนั้น มีพารามิเตอร์หลายอย่างที่มีผลต่อคุณภาพของฟิล์ม พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของฟิล์มเพชรคือ อุณหภูมิของฐานรอง และเปอร์เซ็นต์ของเอทิลแอลกอฮอล์ในก๊าซไฮโดรเจน สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจากอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นนี้ อุณหภูมิของฐานรองมีค่า 950 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของไส้หลอดมีค่า 2060 องศาเซลเซียส โดยมีระยะห่างระหว่างไส้

ตารางที่ 5-2 แสดงเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม

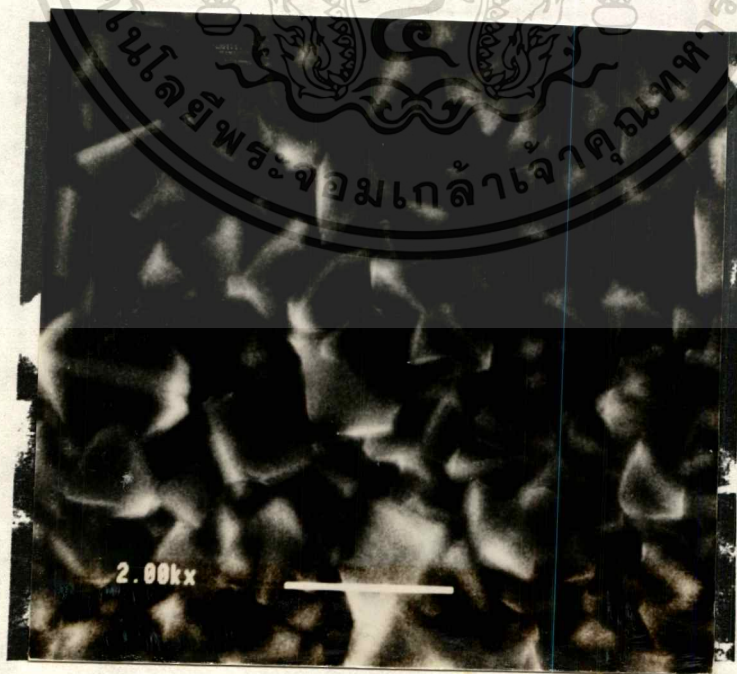
| | |
|---|-------------------|
| อุณหภูมิของไส้หลอด | 2060 องศาเซลเซียส |
| อุณหภูมิของฐานรอง | 950 องศาเซลเซียส |
| อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน | 10 มิลลิลิตร/นาที |
| อัตราส่วนของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อก๊าซไฮโดรเจน | 14 % โดยปริมาตร |
| ความดันก๊าซ | ความดันบรรยากาศ |
| ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง | 1.4 มิลลิเมตร |
| ระยะเวลาในการสร้าง | 2 ชั่วโมง |
| ความหนาของฟิล์มเพชร | 14 ไมครอน |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลดและฐานรองมีค่าเป็น 1.4 มิลลิเมตร ส่วนเปอร์เซ็นต์ของเอทิลแอลกอฮอล์ในก๊าซไฮโดรเจนมีค่าเป็น 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผ่านไปในเอทิลแอลกอฮอล์ให้มีค่า 10 มิลลิลิตร/นาที ระบบ CVD ที่ใช้นี้ทำงานที่ความดันบรรยากาศจากการวัดความหนาของฟิล์มเพชรด้วย Digital Linear Gauge ของ ONO SOKKI รุ่น EG-100 ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีความหนาประมาณ 14 ไมครอน เมื่อใช้เวลาในการสร้าง 2 ชั่วโมง สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์มนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5-2

5.2 การศึกษาฟิล์มเพชรชนิดพี(p-type)

จากตอนที่ผ่านมาเป็นการศึกษาเบื้องต้นของการสังเคราะห์ฟิล์มชนิดอินทรินซิก ทำให้เราทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม สำหรับเงื่อนไขดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกนั้น ไม่เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เป็นผลจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี โดยการเจืออะตอมสารเจือโบรอน ทำให้ได้ฟิล์มเพชรชนิดพี หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ สารกึ่งตัวนำชนิดพี สำหรับในตอนนี้ได้กล่าวถึงการนำฟิล์มเพชรชนิดพีไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น สภาพต้านทานไฟฟ้า, ค่าพลังงานกระตุ้น, ค่าความคล่องตัวพาหะ และความเข้มข้นของพาหะ เป็นต้น เนื่องจากในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจำเป็นต้องทราบข้อมูลต่าง ๆ ของฐานรองที่ใช้ ยกตัวอย่างการเลือกฐานรองให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ทำการสร้าง ดังนั้นข้อมูลเหล่านี้จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกฟิล์มเพชรไปใช้งานต่อไป



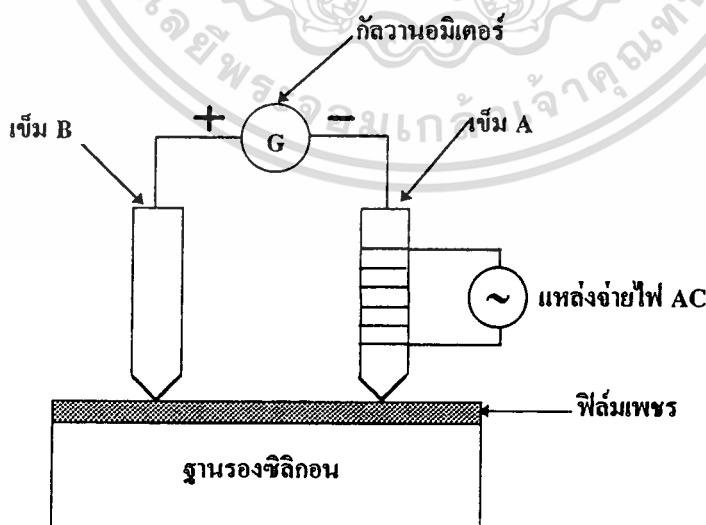
รูปที่ 5-7 แสดงภาพถ่ายฟิล์มจาก SEM ที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน 1000 ppm เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 ลักษณะพื้นผิวที่ค่า B/C ต่าง ๆ

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ กัน พบว่าพื้นผิวจะมีรูปร่างลักษณะคล้ายกันทั้งหมด รูปที่ 5-7 เป็นตัวอย่างของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่เคลือบบนฐานรองซิลิกอน จากภาพถ่าย SEM สร้างภายใต้เงื่อนไขของค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าเป็น 1000 ppm จากรูปลักษณะพื้นผิวจะไม่เรียบ และลักษณะผลึกเป็นแบบผลึกรวม(polycrystalline) การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อนนั้น จะได้อัตราการเคลือบของฟิล์มบนฐานรองมีค่าประมาณ 8-10 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง

5.2.2 การวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มโดยอาศัยหลักการซีเบก

ปรากฏการณ์ซีเบก(Seebeck effect) เป็นปรากฏการณ์ที่ได้จากการสังเกตจากการทดลอง โดยการนำเอาตัวนำ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ที่มีปลายด้านหนึ่งต่อเชื่อมติดกัน ส่วนอีกปลายหนึ่งไม่ได้มีการเชื่อมติดกัน เมื่อมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างส่วนที่เชื่อมติดกันกับส่วนที่ไม่ได้ต่อเชื่อมกันแล้ว จะทำให้มีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างส่วนที่ไม่ได้ต่อเชื่อมติดกัน ในทำนองเดียวกัน ถ้าเราให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่ปลายด้านหนึ่ง ซึ่งทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามแท่งวัสดุ และพบว่ามีการปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามมา คือ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทำให้ความเข้มข้นของประจุพาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะในแท่งวัสดุขึ้น



รูปที่ 5-8 แสดงอุปกรณ์การหาชนิดพาหะในการนำกระแสของฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการซีเบก นำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ว่ามีพาหะหลักในการนำกระแสชนิดใด การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าว จะใช้ชุดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5-8 จากรูปจะเห็นว่าชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเข็ม 2 เล่ม จี๊ดคบนฟิล์มเพชรที่เคลือบบนฐานรองซิลิกอน โดยเข็ม A มีลวดทั้งสแตนพันอยู่โคจรรอบ ทำหน้าที่เป็นเข็มความร้อน ส่วนเข็ม B จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง นำกัลวานอมิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกของกัลวานอมิเตอร์ต่อเข้ากับเข็ม B และขั้วลบต่อเข้ากับเข็ม A เริ่มให้ความร้อนแก่เข็ม A ถ้าเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ไปทางบวก แสดงว่าชนิดพาหะในการนำกระแส คือ โฮล แต่ถ้าเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ไปทางลบ แสดงว่าพาหะหลักในการนำกระแสเป็นอิเล็กตรอน

ผลการทดลองที่ได้หลังจากให้ความร้อนกับเข็ม A ปรากฏว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์ ชี้เอนไปทางด้านบวก แสดงว่ามีประจุเคลื่อนที่จากเข็ม A ไปยังเข็ม B แล้วผ่านกัลวานอมิเตอร์ทางขั้วบวก ทำให้เข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้เบนไปทางบวก ดังนั้นพาหะหลักในการนำกระแสของฟิล์มเพชรที่ทำการวัดนี้คือโฮล จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

5.2.3 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

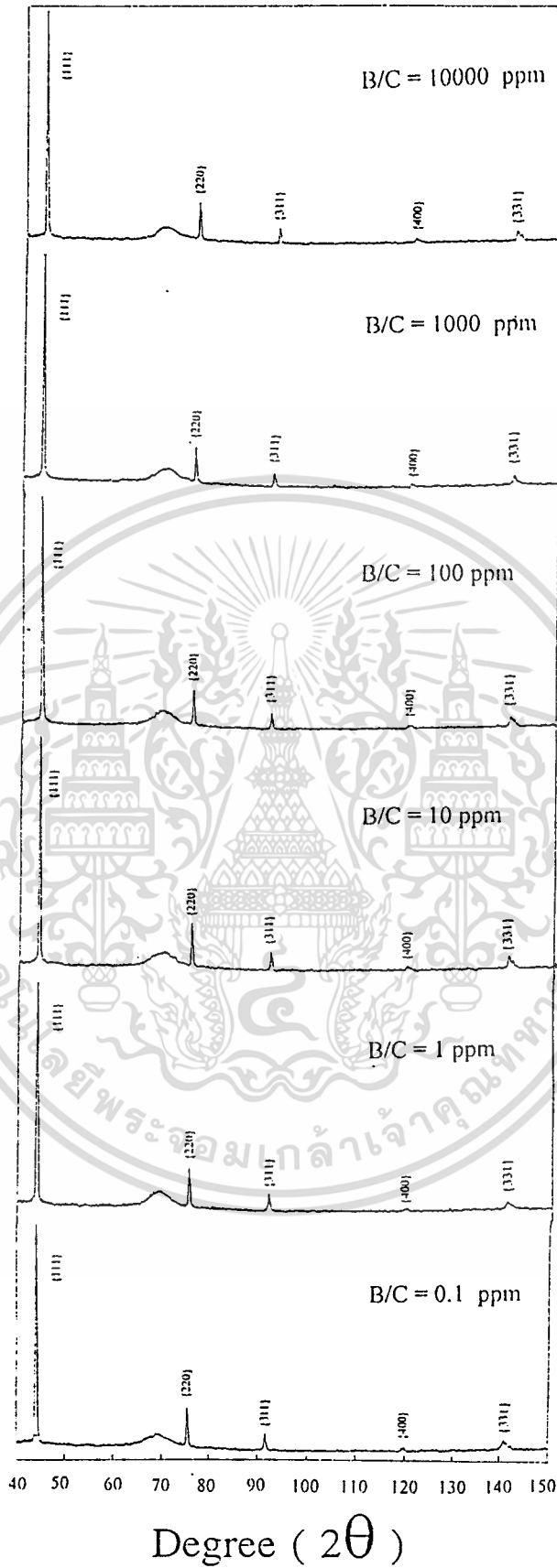
รูปที่ 5-9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนเป็น 0.1 ppm, 1 ppm, 10 ppm, 100 ppm, 1000 ppm และ 10000 ppm ตามลำดับ พร้อมทั้งที่ตำแหน่งยอดแต่ละยอด แสดง Miller indices ที่กำหนดโดยการเปรียบเทียบค่า interplanar spacing ที่คำนวณจากมุม 2θ ของแต่ละยอด กับค่ามาตรฐาน (ASTM 6-675) ซึ่งเป็นของเพชรในทางธรรมชาติ แสดงการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 5-3 และจากข้อมูลยืนยันได้ว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรที่ทุกค่าของอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 5-3 แสดงการเปรียบเทียบค่า interplanar spacing ของฟิล์มเพชรชนิดพี กับค่ามาตรฐาน (ASTM 6-675)

| 0.1 ppm | 1 ppm | 10 ppm | 100 ppm | 1000 ppm | 10000 ppm | ASTM (6-675) | |
|---------|--------|--------|---------|----------|-----------|--------------|-----|
| | | | | | | d(A) | hkl |
| 2.058 | 2.058 | 2.058 | 2.058 | 2.058 | 2.058 | 2.06 | 111 |
| 1.261 | 1.261 | 1.262 | 1.261 | 1.262 | 1.261 | 1.261 | 220 |
| 1.0753 | 1.0753 | 1.0753 | 1.0753 | 1.0753 | 1.0753 | 1.0754 | 311 |
| 0.8915 | 0.8919 | 0.8919 | 0.8919 | 0.8919 | 0.8919 | 0.8916 | 400 |
| 0.8186 | 0.8188 | 0.8190 | 0.8188 | 0.8190 | 0.8188 | 0.8182 | 331 |

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Relative Intensity (Arb. Units)



รูปที่ 5-9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ค่าอัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ของหน่วยงานราชการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 การหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแส

$$J = \sigma \mathcal{E}$$

$$\sigma = q(\mu_{n,n} + \mu_{p,p}) \quad (5-1)$$

ระหว่างความหนาแน่นของกระแส J และสนามไฟฟ้า \mathcal{E} และ σ แสดงสภาพนำไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนกลับของสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ เราสมมติว่ากระแส I ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำ ที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A (cm^2) และยาว L (cm) โดยมีศักดาตกคร่อมเท่ากับ V (V) เนื่องจากความหนาแน่นของกระแส J เท่ากับ I/A (A/cm^2) และสนามไฟฟ้า \mathcal{E} เท่ากับ V/L (V/cm) ดังนั้นสมการ(5-1) จะกลายเป็น

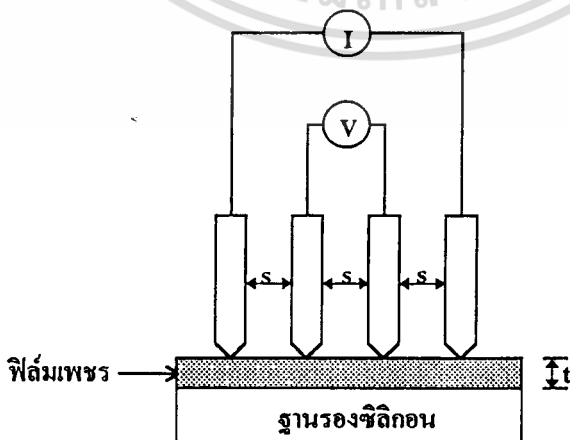
$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho} \frac{V}{L} \quad (5-2)$$

ความต้านทาน R ของสารกึ่งตัวนำ เท่ากับ $R = V/I$ ดังนั้น

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A} \quad (5-3)$$

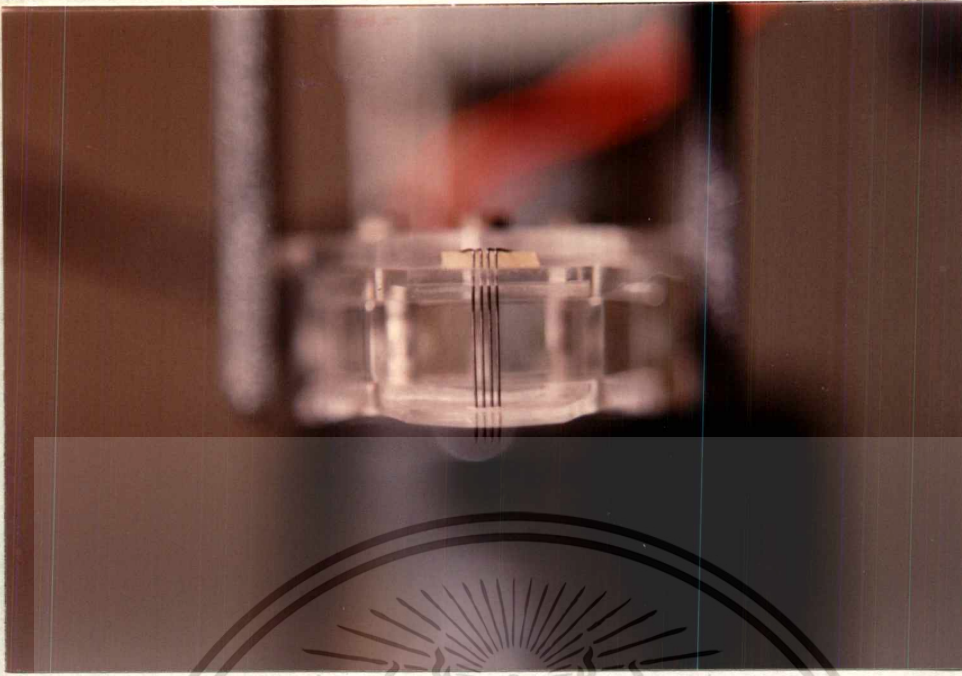
หรือ

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (5-4)$$



รูปที่ 5-10 แสดงหลักการของเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-11 แสดงเครื่องมือวัดของเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าจะใช้วิธีโฟร์พอยท์โพรบ ซึ่งมีหลักการแสดงได้ดังรูปที่ 5-10 ส่วนเครื่องมือวัดแสดงได้ดังรูปที่ 5-11 มีระยะห่างระหว่างหัวเข็ม 0.5 mm หลักการทำงานกระทำโดยจ่ายกระแส I ผ่านเข็มบนอกสองเข็ม ส่วนสัปดาห์จะวัดโดยใช้โวลท์มิเตอร์ระหว่างเข็มด้านใน สภาพต้านทานไฟฟ้าคำนวณจาก แรงดัน, กระแส, ระยะห่างระหว่างหัวเข็ม และความหนาของสารกึ่งตัวนำ

สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดใหญ่ ($t \gg s$) สภาพต้านทานไฟฟ้าคำนวณจาก

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (5-5)$$

โดยที่ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}$) V เป็นแรงดันที่วัดได้ (V)
 s เป็นระยะห่างระหว่างหัวเข็ม (cm) I เป็นกระแสจากแหล่งจ่าย (A)

ในกรณีที่ความหนาของสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยกว่า s มาก ($t \ll s$) จะได้ว่า

$$\rho = \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) \left(\frac{V}{I}\right) = 4.532 \left(\frac{tV}{I}\right) \quad (5-6)$$

โดยที่ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}$) V เป็นแรงดันที่วัดได้ (V)

เอกสารนี้เป็นความหนาของสารกึ่งตัวนำ (cm) เป็นการศึกษา I เป็นกระแสจากแหล่งจ่าย (A) โดยขึ้นด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

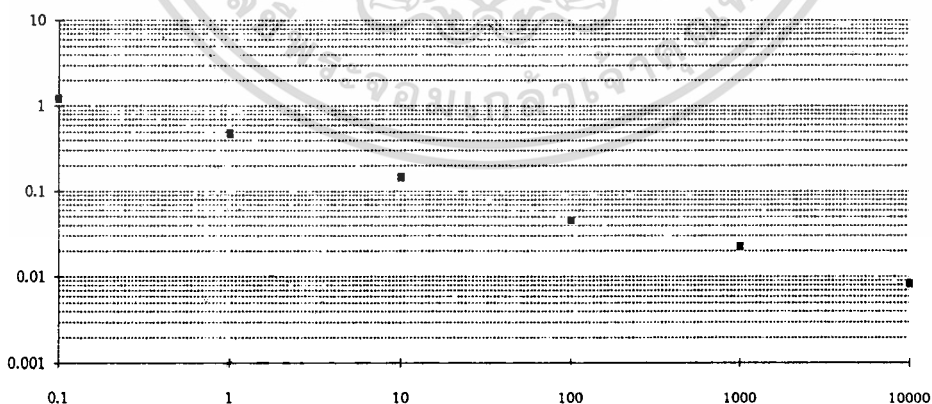
เนื่องจากสารตัวอย่างเป็นฟิล์มเพชรซึ่งมีความหนาน้อยมาก เมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างหัวเข็ม ดังนั้นในการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าจะใช้สมการ(5-6) การทดลองทำการวัดค่าแรงดันที่ค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนเป็น 0.1 ppm, 1 ppm, 10 ppm, 100 ppm, 1000 ppm และ 10000 ppm โดยจ่ายกระแสคงที่ 453 ไมโครแอมป์ สรุปค่าต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ

| B/C (ppm) | ความหนา (μm) | กระแส (μA) | แรงดัน (mV) | สภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}$) |
|-----------|---------------------------|-------------------------|-------------|---|
| 0.1 | 14 | 453 | 86.564 | 1.2119 |
| 1 | 14 | 453 | 33.779 | 0.4729 |
| 10 | 14 | 453 | 10.421 | 0.1459 |
| 100 | 14 | 453 | 3.233 | 0.0453 |
| 1000 | 14 | 453 | 1.586 | 0.0222 |
| 10000 | 14 | 453 | 0.594 | 8.32×10^{-3} |

จากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5-12

สภาพต้านทานไฟฟ้า($\Omega\text{-cm}$)



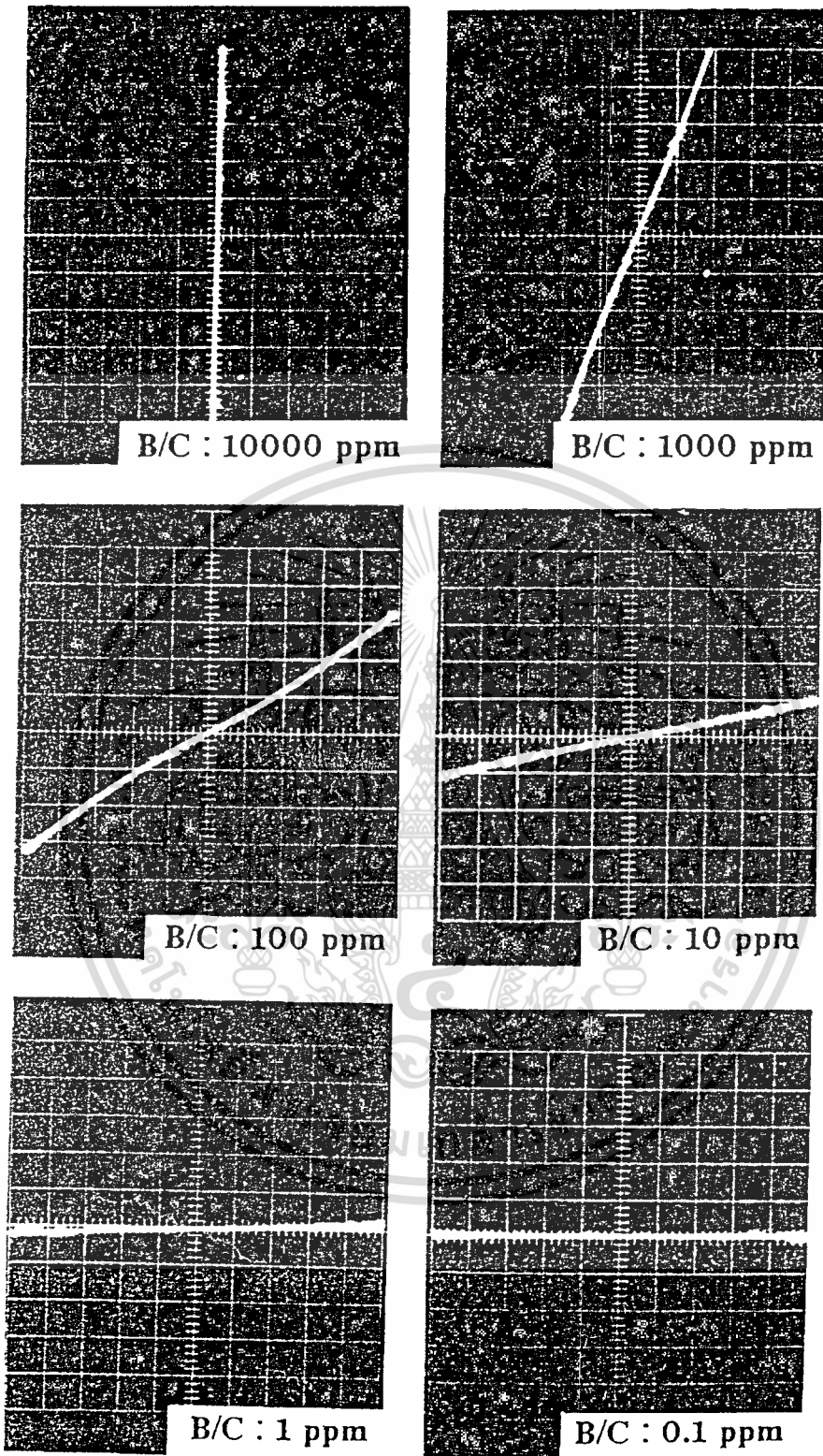
อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน(ppm)

รูปที่ 5-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า

กับอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ver: 1 mA/Div Hor: 2 V/Div

รูปที่ 5-13 แสดงคุณลักษณะกระแสกับแรงดันของฟิล์มเพชรที่อัตราส่วน โบรอน

ต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ได้มีความชันเป็นลบ สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์

$$\rho = \frac{1}{q\mu p} \quad (5-7)$$

จะได้ว่า $\ln \rho \propto -\ln p$ (5-8)

โดยที่ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}$) q เป็นประจุไฟฟ้า (C)
 μ เป็นค่าความคล่องตัวของพาหะ ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) p เป็นความเข้มข้นของพาหะ (cm^{-3})

เนื่องจากความเข้มข้นของพาหะแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน จากความสัมพันธ์(5-8) ได้ว่า กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนควรเป็นเชิงเส้นกับความชัน -1 ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มจึงแปรผกผันกับอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน นอกจากนี้จากความสัมพันธ์(5-7) สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะได้ถ้าทราบค่าความคล่องตัวของพาหะ

พิจารณาคุณลักษณะกระแสกับแรงดันของฟิล์ม ศึกษาโดยใช้ทั้งสแตนท์โพรบที่มีระยะห่างระหว่างหัวเข็มมีค่าคงที่ 500 ไมโครเมตร ซึ่งให้รอยต่อเกือบเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก ผลการวัดแสดงได้ดังรูปที่ (5-13) จากรูปเห็นว่าความชันของกราฟมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคุณลักษณะกระแสกับแรงดันที่ได้เป็นข้อมูลยืนยันในการสรุปผลเกี่ยวกับสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แปรผกผันกับความเข้มข้นของพาหะ หรืออัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน

5.2.5 การหาค่าพลังงานกระตุ้น

จากแบบจำลองแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2-10 พลังงานกระตุ้นเป็นพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นพาหะจากแถบวาเลนซ์ ให้ขึ้นมายังระดับพลังงานสารเจือผู้รับ (E_a) ทำให้มีประจุพาหะอิสระขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าพลังงานดังกล่าวนี้เป็นพลังงานยึดเหนี่ยว(binding energy) ของแต่ละ โฮลของอะตอมสารเจือผู้รับ จากโครงสร้างของแถบพลังงาน พลังงานกระตุ้นมีค่าเป็น ($E_A - E_V$) พิจารณาความสัมพันธ์

$$I = I_0 \exp(-(E_A - E_V)/kT) \quad (5-9)$$

จะได้ว่า $I \propto \exp(-(E_A - E_V)/kT)$ (5-10)

โดยที่ E_A เป็นระดับพลังงานสารเจือผู้ให้ k เป็นค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์
 E_V เป็นระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความสัมพันธ์ (5-10) ให้ข้อแนะนำว่า เราสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้ ถ้าทำการวัดกระแสที่แปรผันกับอุณหภูมิ ที่อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ โดยจ่ายแรงดันคงที่ 10 mV แสดงได้ดังตารางที่ 5-5 นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟดังรูปที่ 5-14 กำหนดให้แกนตั้งเป็นแกนของกระแสในหน่วยแอมแปร์ และแกนนอนเป็นแกนของส่วนกลับของอุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวิน

ตารางที่ 5-5 แสดงข้อมูลของกระแสที่อุณหภูมิต่าง ๆ

| อุณหภูมิ (C°) | กระแส (A) | | | | | |
|------------------|-----------|---------|---------|---------|----------|-----------|
| | 0.1 ppm | 1 ppm | 10 ppm | 100 ppm | 1000 ppm | 10000 ppm |
| -20 | 5.00E-9 | 1.15E-7 | 2.40E-7 | 1.03E-6 | 5.50E-6 | 1.93E-4 |
| -10 | 9.00E-9 | 1.20E-7 | 2.45E-7 | 1.03E-6 | 5.75E-6 | 2.09E-4 |
| 0 | 9.90E-8 | 1.20E-7 | 2.45E-7 | 1.08E-6 | 6.25E-6 | 2.13E-4 |
| 10 | 1.00E-8 | 1.30E-7 | 2.70E-7 | 1.08E-6 | 6.65E-6 | 2.20E-4 |
| 20 | 1.50E-8 | 1.42E-7 | 3.70E-7 | 1.15E-6 | 7.15E-6 | 2.28E-4 |
| 30 | 1.97E-8 | 1.63E-7 | 5.00E-7 | 1.37E-6 | 7.20E-6 | 2.33E-4 |
| 40 | 2.33E-8 | 2.35E-7 | 6.00E-7 | 1.50E-6 | 8.60E-6 | 2.41E-4 |
| 50 | 2.80E-8 | 2.86E-7 | 6.33E-7 | 1.63E-6 | 8.80E-6 | 2.41E-4 |
| 60 | 3.37E-8 | 3.60E-7 | 7.33E-7 | 1.83E-6 | 10.5E-6 | 2.42E-4 |
| 70 | 4.97E-8 | 4.33E-7 | 8.67E-7 | 2.10E-6 | 11.45E-6 | 2.45E-4 |
| 80 | 7.05E-8 | 4.57E-7 | 1.02E-6 | 2.35E-6 | 12.00E-6 | 2.50E-4 |
| 90 | 9.92E-8 | 4.67E-7 | 1.17E-6 | 2.58E-6 | 13.25E-6 | 2.52E-4 |
| 100 | 1.50E-7 | 5.83E-7 | 1.30E-6 | 2.85E-6 | 14.25E-6 | 2.55E-4 |

จากกราฟสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้ โดยคำนวณจากความชันของกราฟ ยกตัวอย่างการคำนวณที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนเป็น 1000 ppm พิจารณาจากสมการ(5-9)

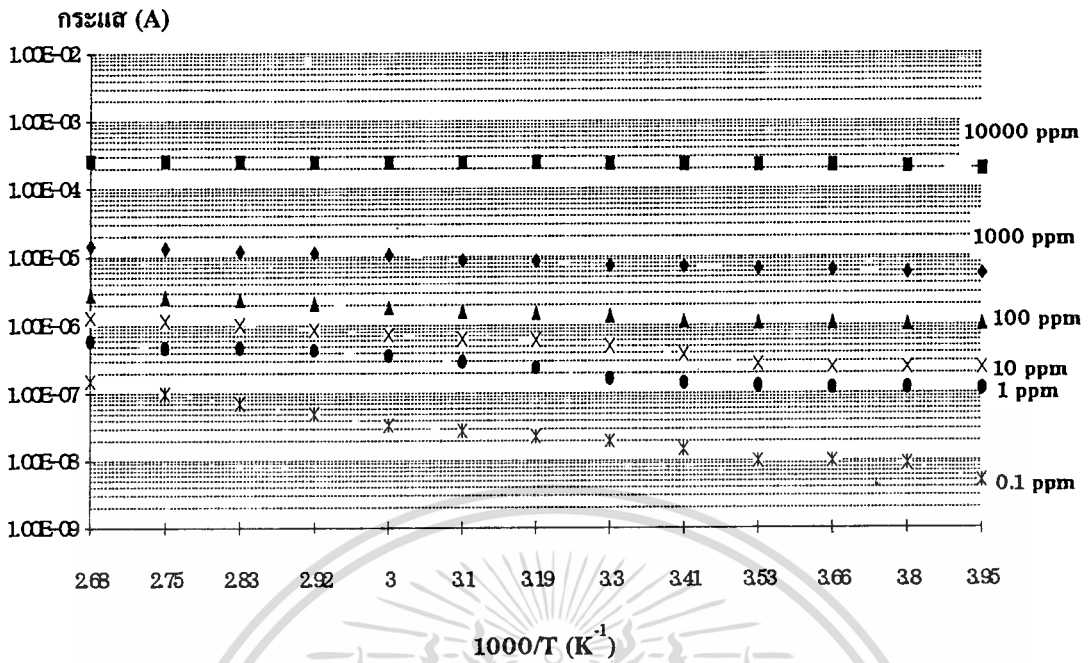
$$I = I_0 \exp\left(-\frac{(E_A - E_V)}{kT}\right) \quad (5-9)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$E_a = -kT \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

โดยที่ $E_a = E_A - E_V$ เป็นพลังงานกระตุ้น(activation energy)

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับส่วนกลับของอุณหภูมิ
ที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ

ในการแปลงลอการิทึม e ให้เป็นลอการิทึมฐาน 10 พิจารณาจาก $\ln X = \frac{\log X}{\log e}$

ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$E_a = \frac{-kT \log(I/I_0)}{\log e}$$

แทนค่าความชันของกราฟ และค่าคงที่จะได้ $E_a = 0.068 \text{ eV}$

สำหรับพลังงานกระตุ้นที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนอื่น ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 5-6 และจากตารางเห็นว่าค่าพลังงานกระตุ้นขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน โดยถ้าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าลดลง

ตารางที่ 5-6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ

| B/C (ppm) | 0.1 | 1 | 10 | 100 | 1000 | 10000 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ค่าพลังงานกระตุ้น | 0.320 | 0.228 | 0.133 | 0.098 | 0.068 | 0.015 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.6 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นปรากฏการณ์ที่มีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ เช่น จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) ทำให้สามารถศึกษาชนิดประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำว่ามีพาหะส่วนมากเป็นโฮลหรืออิเล็กตรอนได้ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ไม่เพียงแต่จะบอกให้ทราบถึงชนิดของพาหะเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญได้อีกด้วย ดังนั้นปรากฏการณ์ฮอลล์จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ โดยเฉพาะสารกึ่งตัวนำ ก่อนที่จะนำชิ้นงานไปทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ต้องทำการเตรียมชิ้นงาน ตามวิธีดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4 ลักษณะชิ้นงานที่เตรียมเสร็จเรียบร้อยแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 5-15 ซึ่งประกอบด้วยขั้วโลหะทองคำสี่ขั้ววางในตำแหน่งที่สมมาตรกัน สำหรับชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์แสดงได้ดังรูปที่ ค-5 ของภาคผนวก ค



รูปที่ 5-15 แสดงลักษณะชิ้นงานในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชรแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกเป็นการวัดเพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเพชร หรืออีกนัยหนึ่งคือการหาค่าสภาพนำ การวัดแรงดันของชิ้นงานในการหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะวัดในขณะที่ไม่มีการป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงานในการวัดจะใช้วิธีของ Van der Pauw ที่ทำการวัดค่าแรงดันออกมาแปดค่า โดยแรงดันทั้งแปดค่าที่ได้ จะได้จากการจ่ายกระแสในทิศทางต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3-7 จากค่าแรงดัน V_1 - V_8 นำมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

พิจารณาจากสมการ (3-19)

$$\rho_A = \frac{1.1331 f_A t_S}{I} (V_2 + V_4 - V_1 - V_3)$$

$$\rho_B = \frac{1.1331 f_B t_S}{I} (V_6 + V_8 - V_5 - V_7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากลักษณะของชิ้นงานมีความสมมาตร ดังนั้นค่า geometrical factor (f) มีค่าเป็น $f_A=f_B=1$ และความหนาของฟิล์มเพชร(t_s) มีค่า 14 μm ยกตัวอย่างฟิล์มเพชรที่สร้างที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนเป็น 0.1 ppm มีค่าแรงดัน V_1-V_8 เป็น 14.548, 15.638, 14.447, 14.444, 14.752, 15.842, 14.384 และ 14.369 mV ตามลำดับ โดยจ่ายกระแสคงที่ 500 μA เมื่อนำมาแทนค่าในสมการ(3-19) จะได้

$$\rho_A = 3.354 \Omega\text{-cm}$$

$$\rho_B = 3.411 \Omega\text{-cm}$$

นำมาหาค่าเฉลี่ยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็น

$$\rho = 3.3825 \Omega\text{-cm}$$

ดังนั้นสภาพนำมีค่าเป็น

$$\sigma = 0.2956 \Omega^{-1}\text{-cm}^{-1}$$

สำหรับส่วนที่สองเป็นการวัดแรงดันของฮอลล์ ต้องมีการจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นงาน ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางกระแส และทำการวัดแรงดันฮอลล์ จากค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้นำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) ยกตัวอย่างการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนมีค่า 0.1 ppm จากการวัด แรงดันฮอลล์มีค่าเป็น(V_H) 2.333 mV โดยในการทดลองทำการจ่ายกระแสคงที่(I) 500 μA และสนามแม่เหล็กมีค่า(B_z) 2000 Gauss หรือ 0.2 Tesla และแผ่นฟิล์มมีความหนา(d) 14 μm นำค่าต่าง ๆ ไปแทนในสมการ(3-10) ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เป็น

$$R_H = \frac{V_H \cdot d}{I B_z} = 326.62 \text{ cm}^3/\text{A-s}$$

นำค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของประจุพาหะจากสมการ(3-15)

$$p = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{R_H q} = 2.25 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

นอกจากนี้จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และค่าสภาพนำ สามารถนำไปคำนวณหาค่าความคล่องตัวฮอลล์(μ_H) ได้ จากสมการ(3-17)

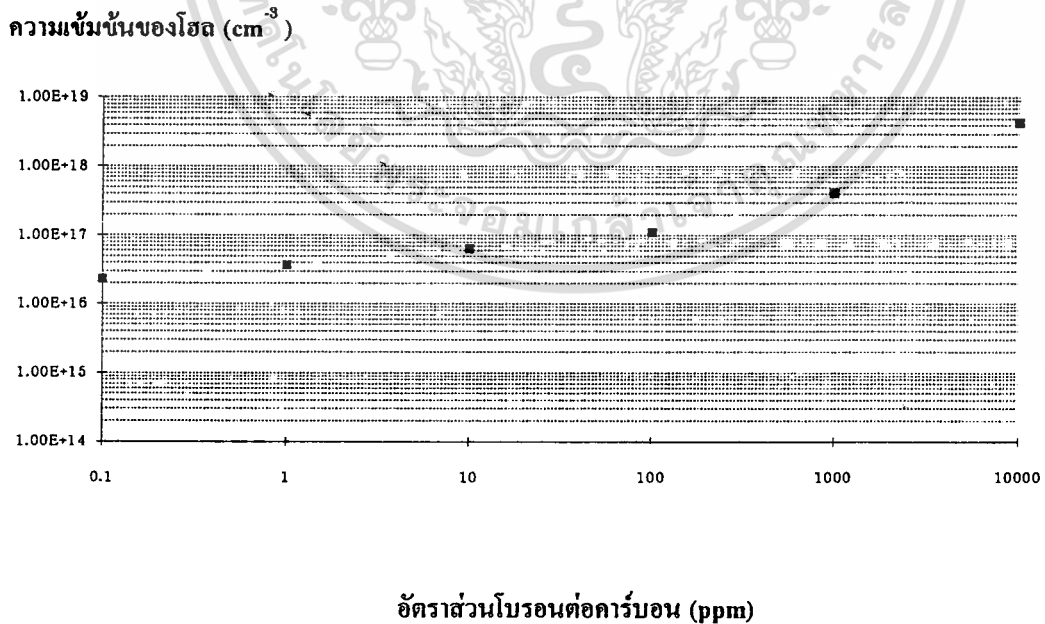
$$\mu_H = \frac{3\pi}{8} R_H \cdot \sigma = 113.74 \text{ cm}^2/\text{V-s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟิล์มเพชรได้ดังตารางที่ 5-7 ซึ่งในตารางแสดงค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพนำ, แรงดันฮอลล์, ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์, ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ และค่าความคล่องตัวของฮอลล์ ที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าต่าง ๆ

ตารางที่ 5-7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของฟิล์มเพชรที่ค่าอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ

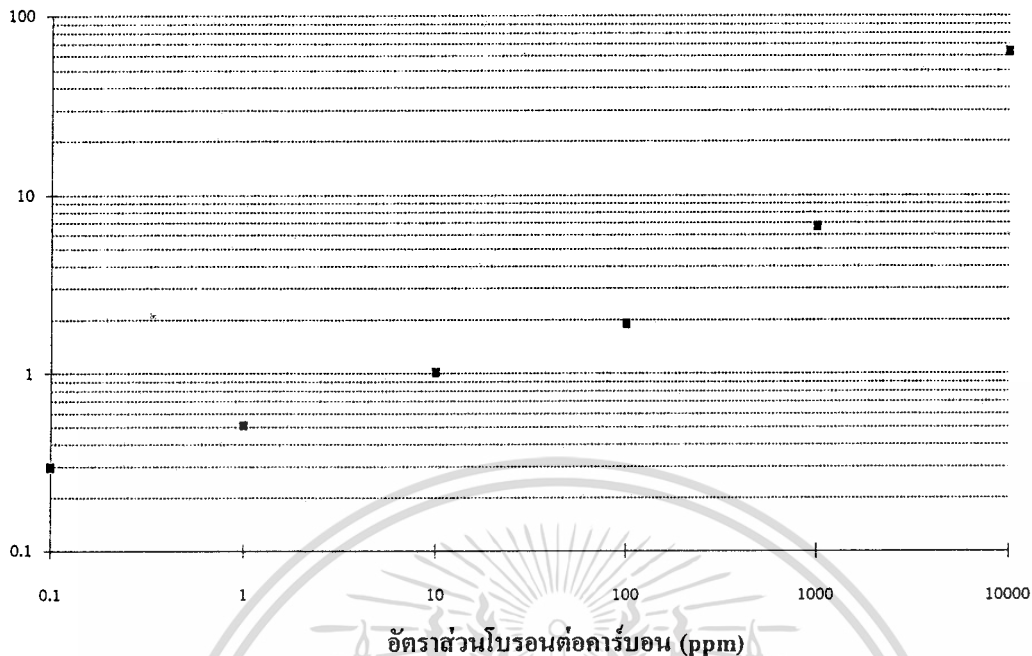
| B/C (ppm) | ρ (Ω -cm) | σ (Ω^{-1} -cm $^{-1}$) | V_H (mV) | R_H (cm 3 /A-s) | p (cm $^{-3}$) | μ_H (cm 2 /V-s) |
|-----------|------------------------|--|------------|----------------------|-------------------|------------------------|
| 0.1 | 3.3825 | 0.2956 | 2.333 | 325.62 | 2.252E+16 | 113.74 |
| 1 | 1.7563 | 0.5112 | 1.423 | 199.22 | 3.691E+16 | 119.97 |
| 10 | 0.9822 | 1.0181 | 0.836 | 117.04 | 6.283E+16 | 140.38 |
| 100 | 0.5271 | 1.8972 | 0.479 | 67.06 | 1.097E+17 | 149.88 |
| 1000 | 0.1498 | 6.6756 | 0.129 | 18.06 | 4.072E+17 | 142.03 |
| 1000 | 1.5863E-2 | 63.038 | 0.012 | 1.68 | 4.377E+18 | 124.77 |



รูปที่ 5-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นพาหะที่ค่าอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอนค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพนำไฟฟ้า ($\Omega\text{-cm}^{-1}$)



รูปที่ 5-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนต่าง ๆ

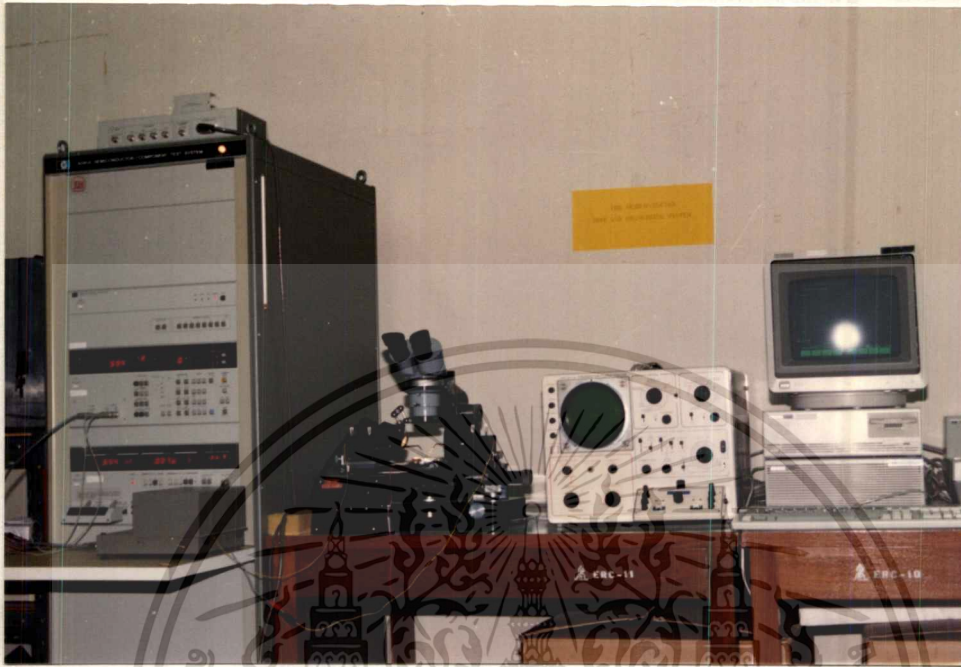
จากค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพนำ ที่ค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนมีค่าต่าง ๆ สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5-16 และรูปที่ 5-17 จากกราฟพบว่าค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพนำ มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นกับค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของฟิล์มแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมความนำไฟฟ้าของฟิล์มได้ โดยการแปรค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนเป็นค่าต่าง ๆ กัน

5.3 การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชร

ในตอนนี้จะได้กล่าวถึงการศึกษาผลของรอยต่อโลหะที่มีต่อฟิล์มเพชร โดยโลหะที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ทองคำ(Au), อลูมิเนียม(Al) และ อินเดียม(In) การเคลือบโลหะทองคำ และ อลูมิเนียมลงบนฟิล์มเพชรกระทำด้วยวิธีการเคลือบในสูญญากาศที่ความดัน $1-3 \times 10^{-6}$ torr ตามกระบวนการที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4 มีพื้นที่ของขั้วโลหะ 1 mm^2 ส่วนอินเดียมใช้การบัดกรีด้วยหัวแสงความถี่สูง ทำการศึกษาทั้งฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก และฟิล์มเพชรชนิดพี สำหรับฟิล์มเพชรชนิดพี ขอบยกตัวอย่างเฉพาะฟิล์มเพชรที่สร้างที่ค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนเป็น 1000 ppm จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยศึกษาจากคุณสมบัติของกระแสและแรงดันด้วยเครื่อง Hewlett packard รุ่น 4061A Semiconductor/Component Test System และ Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tracer ดังแสดงในรูปที่ 5-18 สามารถแยกการศึกษาค่าออกเป็นการศึกษาผลของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร, ผลของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร และผลของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชร

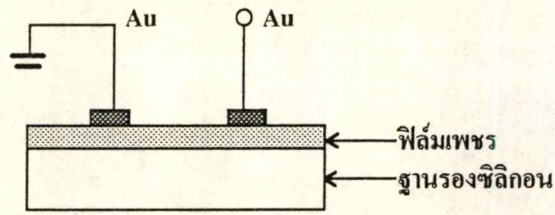


รูปที่ 5-18 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน

5.3.1 คุณสมบัติของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร

แผ่นฟิล์มเพชรประกอบด้วยขั้วของรอยต่อทองคำสองขั้วดังแสดงในรูปที่ 5-19 โดยป้อนแรงดันให้กับขั้วทั้งสอง คุณลักษณะของกระแส-แรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 5-20 ซึ่งเป็นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก สำหรับฟิล์มเพชรชนิดพีที่แสดงได้ดังรูปที่ 5-21 ลักษณะของกราฟทั้งสองที่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น กรณีของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากขนาดอะตอมของทองคำซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับเพชรที่เป็นรูปหนึ่งของคาร์บอน ดังนั้นอะตอมของทองคำจึงไม่ก่อพันธะกับเพชร ดังนั้นจึงสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระ ทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก สำหรับกรณีของฟิล์มเพชรชนิดพีสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากค่าฟังก์ชันงาน(work function) ของทองคำกับเพชร พบว่าฟังก์ชันงานของทองคำมีค่ามากกว่าเพชร ดังนั้นระดับเฟอร์มิของเพชรจะอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของทองคำ เมื่อนำทองคำกับเพชรมาเชื่อมต่อกัน ทำให้ไม่มีกำแพงศักย์ของโฮลเกิดขึ้น นั่นคือโฮลจากฟิล์มเพชรชนิดพีสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้โดยอิสระ ซึ่งรอยต่อในลักษณะนี้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

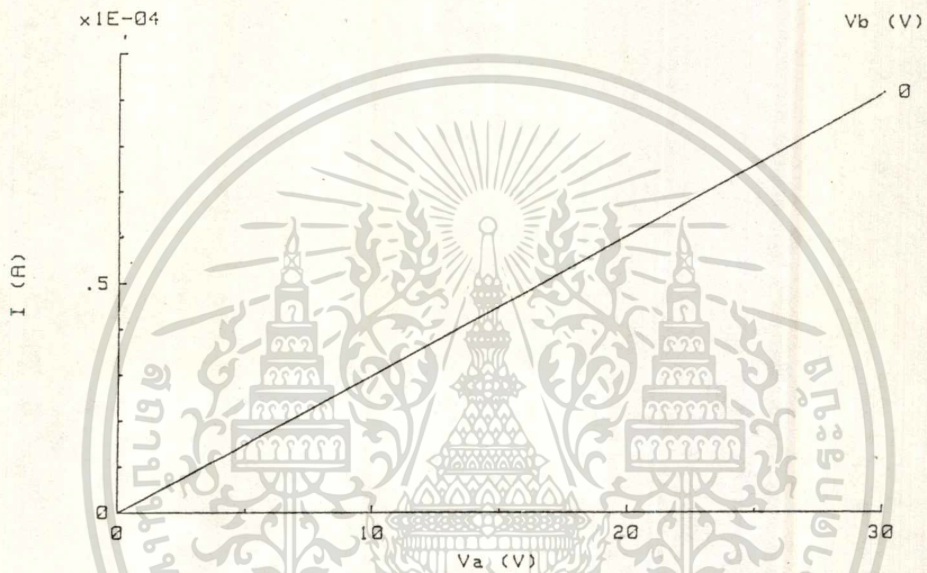


รูปที่ 5-19 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร

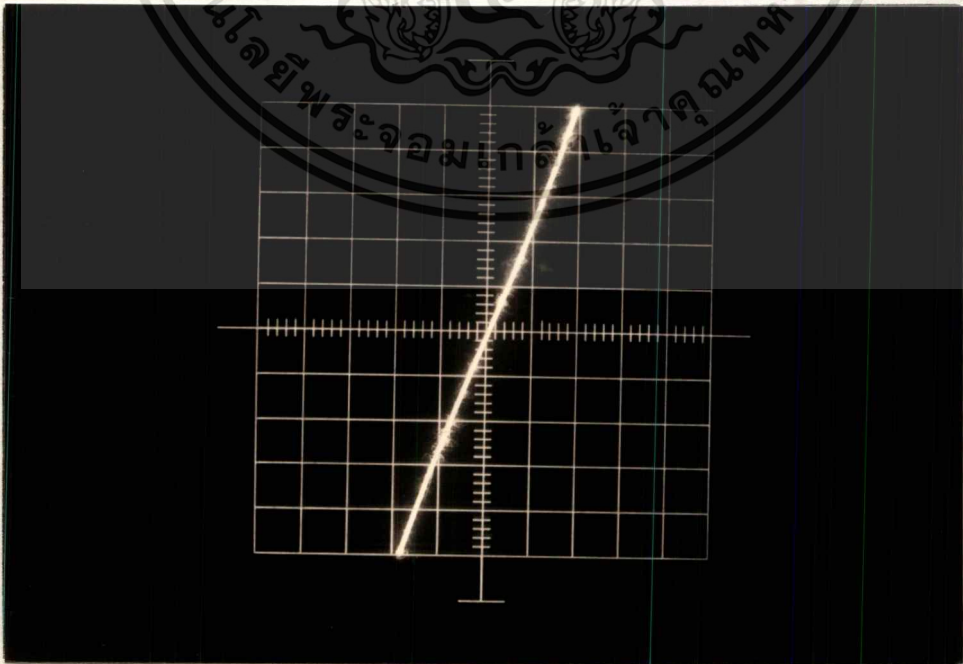
I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= INTRINSIC Au-Au



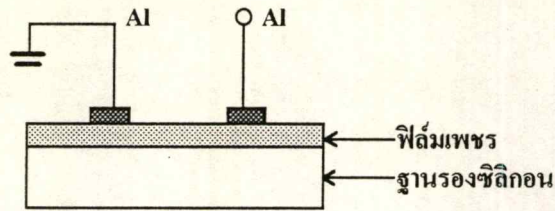
รูปที่ 5-20 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก



รูปที่ 5-21 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชรชนิดพี

Ver : 0.5 mA/Div Hor : 1 V/Div

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

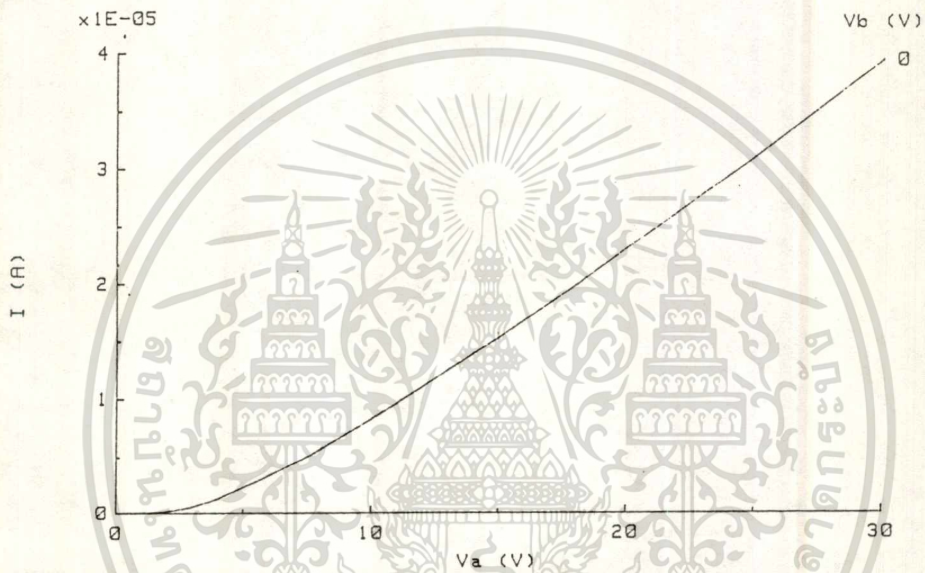


รูปที่ 5-22 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร

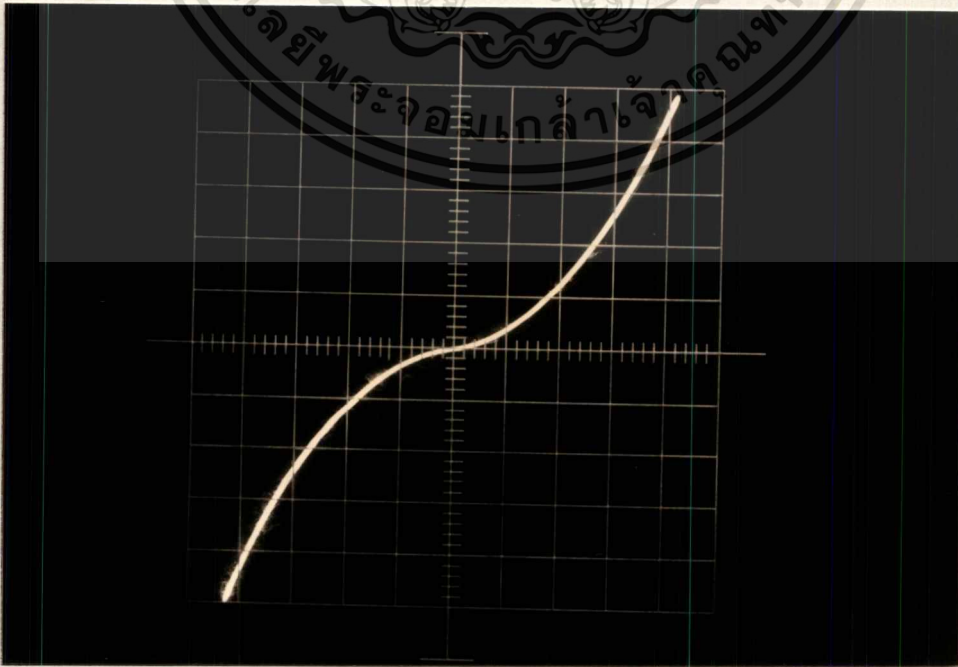
I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

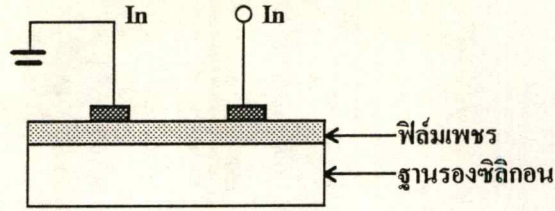
SAMPLE= INTRINSIC Al-Al



รูปที่ 5-23 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก



รูปที่ 5-24 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ลิขสิทธิ์ทางทรัพย์สินทางปัญญา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 Ver : 0.5 mA/Div Hor : 1 V/Div

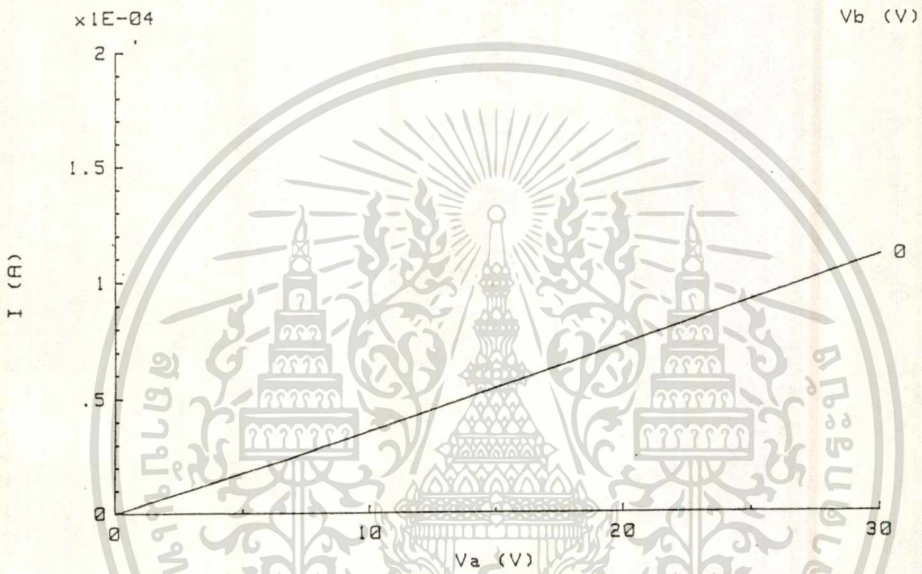


รูปที่ 5-25 แสดงภาพตัดขวางของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพอร์

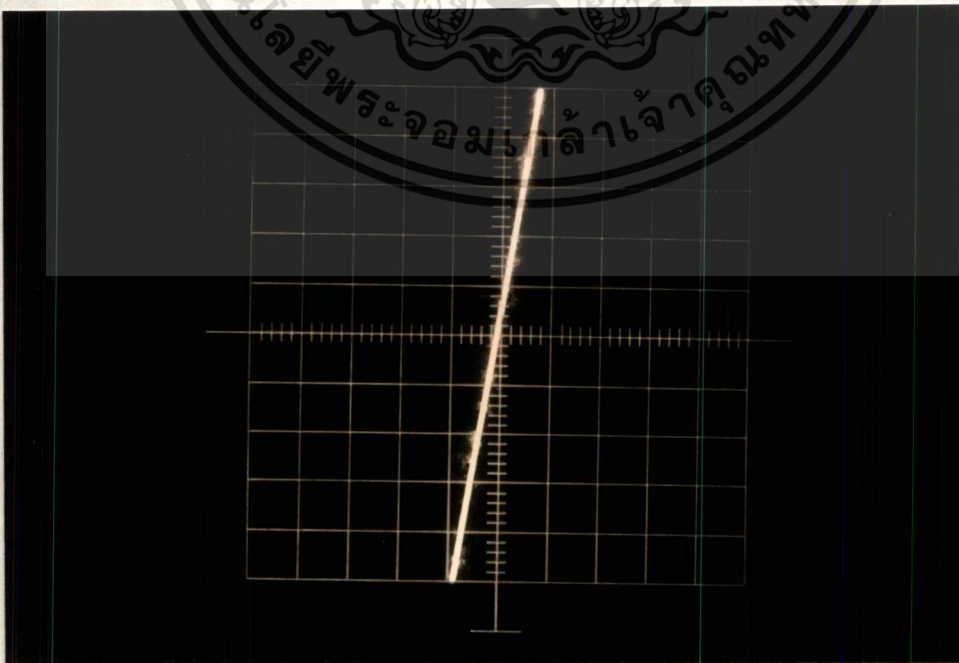
I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= INTRINSIC In-In



รูปที่ 5-26 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพอร์ชนิดอินทรีนซิก



เอกสารนี้รูปที่ 5-27 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพอร์ชนิดพี ยชนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น Ver : 0.5 mA/Div ปล Hor : 1 V/Div อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 คุณสมบัติของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร

อลูมิเนียมถูกสร้างเป็นขั้วทั้งสองของฟิล์มเพชร ดังแสดงในรูปที่ 5-22 ผลของคุณลักษณะกระแส-แรงดันของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก และชนิดพี แสดงได้ดังรูปที่ 5-23 และรูปที่ 5-24 ตามลำดับ ลักษณะของกราฟที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้น จะสังเกตเห็นว่ามีแรงดันตกคร่อมเกิดขึ้นที่รอยต่อ โดยจากกราฟจะมีค่าแรงดันค่าหนึ่งก่อนที่มีการนำกระแส จากผลการทดลองที่ได้กรณีของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกสามารถอธิบายโดยพิจารณาจากขนาดอะตอมของอลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กใกล้เคียงกับคาร์บอน ทำให้เกิดการก่อกันระขึ้น สำหรับกรณีของฟิล์มเพชรชนิดพีสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกัน หรือพิจารณาจากฟังก์ชันงานของอลูมิเนียม และเพชร พบว่าอลูมิเนียมมีฟังก์ชันงานน้อยกว่าเพชร ระดับเฟอร์มิของฟิล์มเพชรจึงอยู่ที่ระดับต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของ อลูมิเนียม เมื่อนำมาสัมผัสกันจึงเกิดมีกำแพงศักย์ขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้นรอยต่อจึงมีคุณสมบัติในการเรกติไฟเออร์ได้คล้ายกับรอยต่อพี-เอ็น

5.3.3 คุณสมบัติของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชร

ทำการสร้างขั้วอินเดียมสองขั้วลงบนฟิล์มเพชร ดังแสดงในรูปที่ 5-25 จากนั้นทำการศึกษาคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีลักษณะดังรูปที่ 5-26 และรูปที่ 5-27 สำหรับรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี ลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเชิงเส้นเหมือนกับกรณีของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร สามารถอธิบายผลการทดลองที่ได้โดยพิจารณาจากขนาดอะตอมของอินเดียมเมื่อเทียบกับคาร์บอน พบว่ามีขนาดใหญ่กว่ามาก ดังนั้นอะตอมของอินเดียมจึงไม่ก่อกันระกับเพชร เพียงแต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ รอยต่อจึงไม่มีกำแพงศักย์เกิดขึ้น ลักษณะของรอยต่อจึงเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก

ผลการศึกษารอยต่อโลหะชนิดต่าง ๆ กับฟิล์มเพชรให้ข้อสรุปว่า รอยต่อของทองคำกับฟิล์มเพชร และรอยต่ออินเดียมกับฟิล์มเพชรจะให้รอยต่อแบบโอห์มมิก ซึ่งเป็นประโยชน์ในการนำไปสร้างขั้วสัมผัส เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม แต่สำหรับโลหะอินเดียมจะไม่เหมาะสำหรับการนำไปสร้างขั้วในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ กรณีของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรจะให้รอยต่อแบบเรกติไฟเออร์ดังนั้นจากคุณสมบัติการเรกติไฟเออร์ ทำให้สามารถนำอลูมิเนียมไปสร้างเป็นขอตดักทีโอดได้ ซึ่งจะได้อ่านในตอนต่อไป

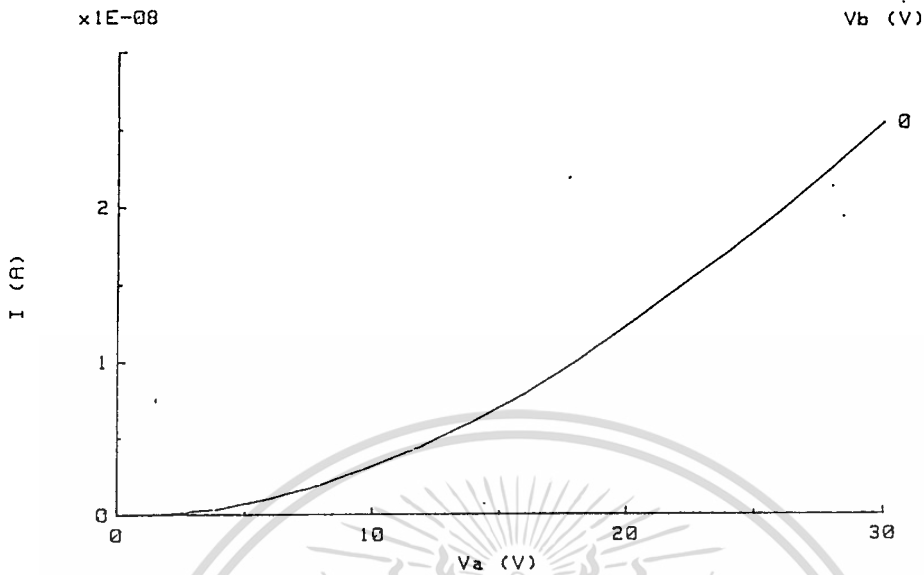
5.4 การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อ p-i

รูปที่ 5-28 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อ p-i ทั้งกรณีไบแอสไปหน้าและไบแอสย้อนกลับ พิจารณาที่อุณหภูมิห้อง คุณลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติการเรกติไฟเออร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= INTRINSIC - P-TYPE

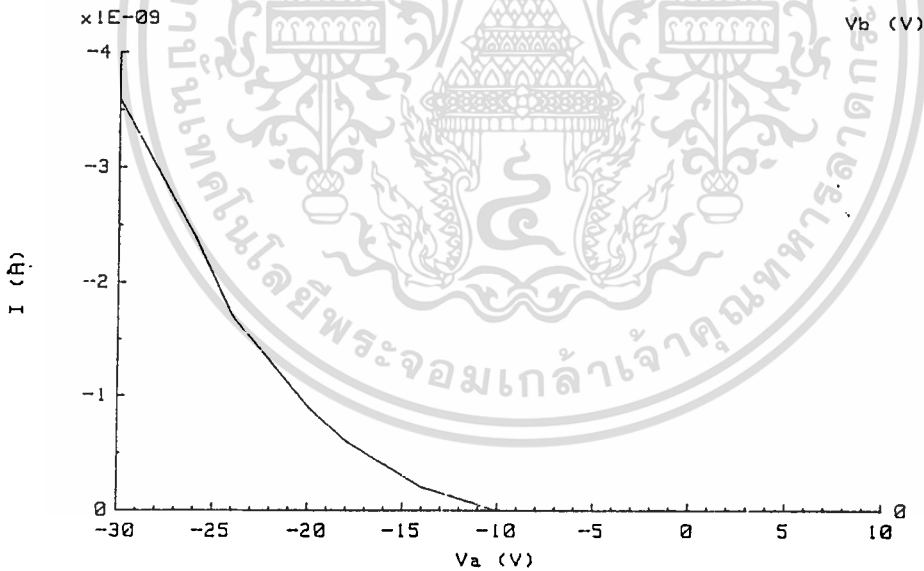


(ก) กรณีกการไบแอสไปหน้า

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= INTRINSIC - P-TYPE



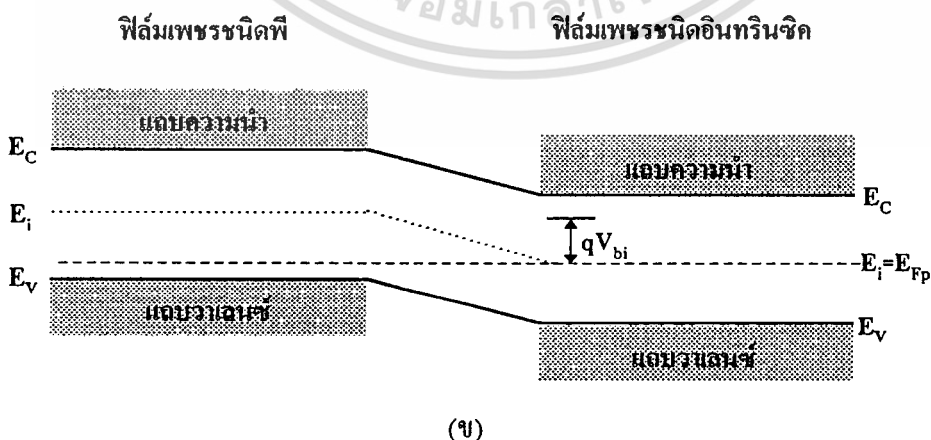
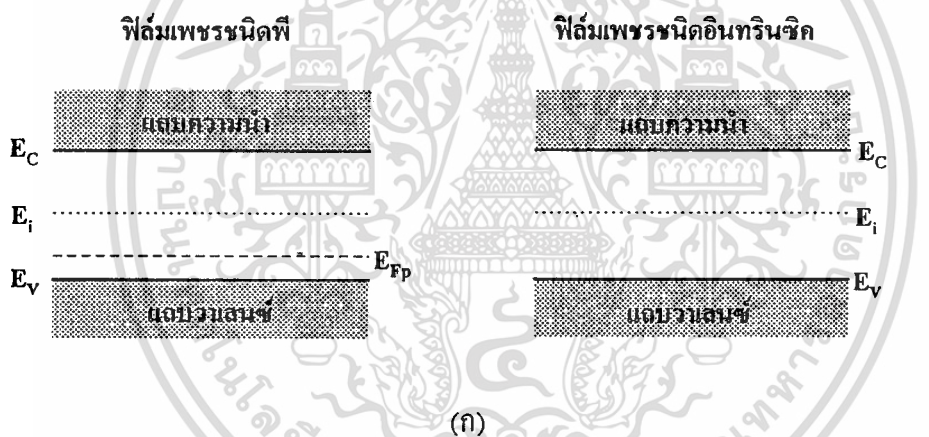
(ข) กรณีกการไบแอสย้อนกลับ

รูปที่ 5-28 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อ p-i

โดยเมื่อไบแอสบวกให้กับทางด้านพี ทำให้รอยต่อ p-i ได้รับเงื่อนไขการไบแอสไปหน้า โสไลนบริเวณพีถูกฉีดเข้าไปในบริเวณอินทรินซิก จากผลของการไบแอสไปหน้า จะเกิดมีกระแสพาหะของโฮลขึ้น การเพิ่มการไบแอสทำให้เกิดกระแสพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5-28 (ก) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในทิศทางไบแอสย้อนกลับ ต้องทำการไบแอสให้มีความแรงดันประมาณ 10 V จึงทำให้เกิดกระแสไหลขึ้น ดังรูปที่ 5-28 (ข) การที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณรอยต่อมีกำแพงศักย์เกิดขึ้นจากผลของบริเวณปลอดพาหะ แต่เมื่อทำการไบแอสย้อนกลับเพิ่มขึ้นเป็นผลให้บริเวณรอยต่อมีสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบดริฟของพาหะจากผลของสนามไฟฟ้าขึ้น เกิดมีกระแสไหล เนื่องจากบริเวณอินทรินซิกมีพาหะน้อยมากเมื่อเทียบกับทางด้านพี ทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลอยู่ในระดับนาโนแอมป์ จากผลการทดลองที่ได้จึงกล่าวได้ว่ารอยต่อ p-i มีคุณสมบัติเป็นไดโอดเช่นเดียวกับรอยต่อพี-เอ็น

พิจารณาในเทอมของไดโอด ต้องทำการศึกษาค่าแรงดันภายใน(built-in voltage) ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่คำนวณได้ ก่อนอื่นมาพิจารณาไดอะแกรมแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก และสารกึ่งตัวนำชนิดพี ก่อนนำมาเชื่อมต่อกัน แสดงได้ดังรูปที่ 5-29 (ก)



รูปที่ 5-29 (ก) แสดงไดอะแกรมโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและชนิดอินทรินซิก

(ข) แสดงไดอะแกรมโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อ p-i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรอยต่อพี-อินทรีนซิกเกิดขึ้น จะเห็นว่าเนื่องจากด้านทั้งสองของรอยต่อมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นพาหะ กล่าวคือ โฮลทางด้านพีจะมีค่ามากกว่าทางด้านอินทรีนซิก เป็นสาเหตุให้เกิดมีแรงกระทำต่อพาหะให้เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อ เพื่อให้ด้านทั้งสองมีพาหะเท่ากัน ดังนั้นพาหะจากด้านพีซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะแพร่ไปยังด้านอินทรีนซิก ซึ่งมีความหนาแน่นพาหะน้อยกว่า นั่นคือ โฮลทางด้านพีจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้าไปทางด้านอินทรีนซิกจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ ดังนั้นอะตอมสารเจือผู้รับทางด้านพีบริเวณรอยต่อมีสภาพเป็นไอออนลบ ส่วนทางด้านอินทรีนซิกมีสภาพเป็นไอออนบวก ประจุไฟฟ้าของไอออนดังกล่าวทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอยต่อ ช่วยต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากทางด้านพี จนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอจนทำให้รอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล ที่บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้น จะเป็นบริเวณซึ่งไม่มีพาหะอยู่ เนื่องจากพาหะจะถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าผลักออกไปจากบริเวณนี้ บริเวณดังกล่าวนี้เรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ ในบริเวณปลอดพาหะนี้เองที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านพี และด้านอินทรีนซิกขึ้น ซึ่งเรียกว่า แรงดันภายใน ที่เราจะทำการหาค่า ผลของรอยต่อพี-อินทรีนซิก ที่เกิดขึ้นทำให้แถบพลังงานมีลักษณะดังรูปที่ 5-29 (ข)

พิจารณาจากรูป 5-29 ค่าแรงดันภายในมีค่าเท่ากับ $E_i - E_{Fp}$

เนื่องจากกรณีของเพชร $E_g = 5.5 \text{ eV}$ กรณีของอินทรีนซิก $E_i = E_g/2 = 2.75 \text{ eV}$ และจากการศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มเพชรชนิดพีที่อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน 1000 ppm มีค่าพลังงานกระตุ้นเป็น 0.068 eV หรือ $E_{Fp} - E_v = 0.068 \text{ eV}$ ดังนั้นแรงดันภายในมีค่า

$$\begin{aligned} qV_{bi} &= E_i - E_{Fp} \\ &= 2.75 - 0.068 \text{ eV} = 2.682 \text{ eV} \end{aligned}$$

$$V_{bi} = 2.682 \text{ V}$$

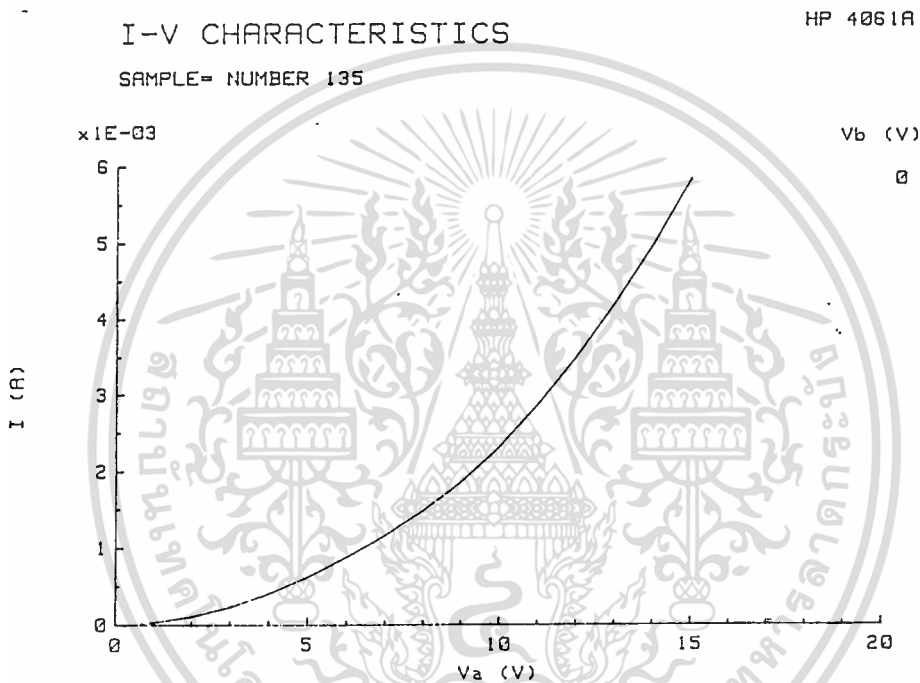
จากการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่ามีความเท่ากัน

5.5 การศึกษาคุณสมบัติของขอตัก์ไดโอด

ขอตัก์ไดโอดเป็นไดโอดอีกชนิดหนึ่งที่เกิดจากรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ เส้นใจของการเกิดเป็นผลจากความแตกต่างกันของค่าฟังก์ชันงาน เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาเชื่อมต่อกันจึงทำให้เกิดกำแพงศักย์ขึ้น โดยกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นมีผลต่อการเคลื่อนที่ของพาหะ ซึ่งในที่นี้พิจารณาพาหะส่วนใหญ่เป็นโฮล เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีถ้าฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี รอยต่อจะมีคุณสมบัติในการเรกติไฟเออร์ได้เช่นเดียวกับรอยต่อพี-เอ็น

5.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

จากการศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อโลหะชนิดต่าง ๆ กับฟิล์มเพชรชนิดพี พบว่าโลหะอินเดียมและทองคำจะให้รอยต่อแบบโอห์มมิก ในขณะที่โลหะอลูมิเนียมจะให้รอยต่อแบบชอตต์กี จากคุณสมบัติดังกล่าวของอลูมิเนียม จึงนำอลูมิเนียมมาสร้างเป็นรอยต่อเพื่อสร้างเป็นชอตต์กีไดโอด โดยมีกระบวนการสร้างดังที่กล่าวไว้ในตอนที่ 4.6 หลังจากทำการสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำชิ้นงานมาศึกษาคุณสมบัติไฟฟ้าด้วยเครื่อง Hewlett packard รุ่น 4061A Semiconductor/Component Test System ผลการทดลองจากการไบแอสไปหน้าให้กับชิ้นงาน คุณลักษณะของกระแส-แรงดันที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 5-30



รูปที่ 5-30 แสดงคุณลักษณะของกระแส-แรงดันในทิศทางไบแอสไปหน้าของรอยต่ออลูมิเนียม-ฟิล์มเพชร

พิจารณาจากสมการ

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (5-11)$$

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bp}}{kT}\right) \quad (5-12)$$

โดยที่ I_s = กระแสอิ่มตัว หาได้จากการประมาณจากกราฟของกระแส-แรงดันที่เขียนในรูปล็อก-เชิงเส้น โดยพิจารณาบริเวณที่ $V = 0$ แสดงได้ดังรูปที่ 5-31

n = ideality factor กรณีที่มีการโคปอะตอมสารเจือจำนวนมาก หรือทำงานที่อุณหภูมิต่ำ ค่า n จะมีค่าเป็นหนึ่ง

เอกสารนี้เป็น **A = พื้นที่** สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k = ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

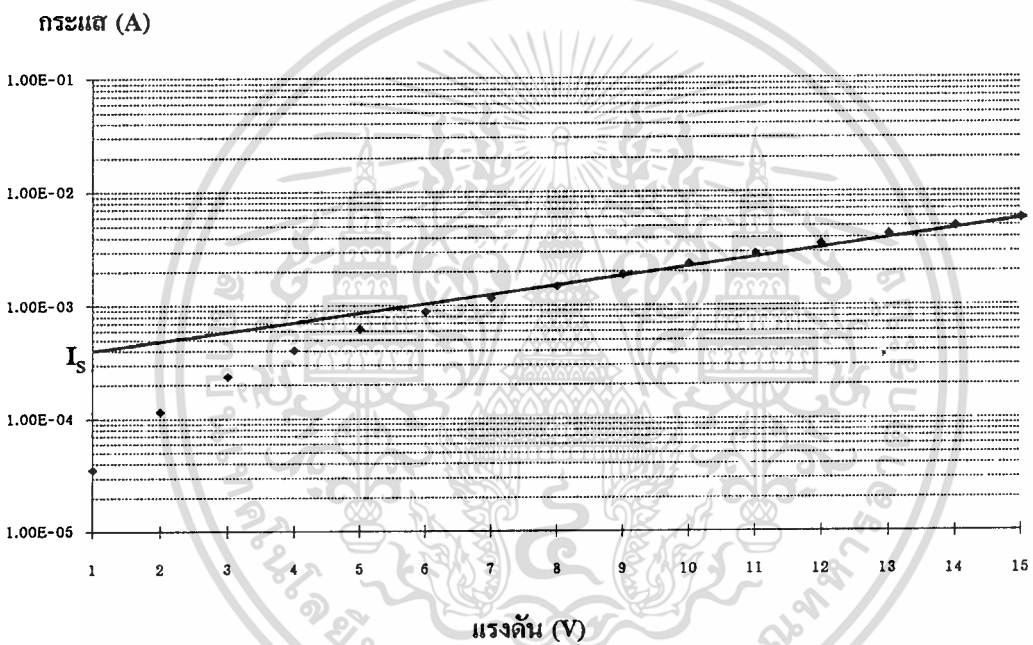
T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

ϕ_{Bp} = ความสูงของกำแพงศักย์

$$A^* = \text{effective Richardson constant} = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$$

ดังนั้นจากสมการ(5-12) จะได้ว่า

$$\phi_{Bp} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_s}\right) \quad (5-13)$$



รูปที่ 5-31 แสดงการหาค่ากระแสอิ่มตัวโดยการประมาณ

ก่อนอื่นต้องทำการหาค่า effective Richardson constant จาก

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

กรณีของเพชร $m^* = 0.25 m_0$ หรือ $m^* = 2.277357 \times 10^{-31} \text{ kg}$

สำหรับพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าดังนี้คือ

$$q = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s} \quad h = 6.62617 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \quad k = 1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$\text{แทนค่าในสมการจะได้} \quad A^* = 3 \times 10^5 \text{ A/m}^2\cdot\text{K}^2$$

พิจารณาจากกราฟรูปที่(5-31) ค่า $I_s = 4 \times 10^{-4} \text{ A}$ ทำการวัดที่อุณหภูมิ $T = 293 \text{ K}$ พื้นที่

ที่ขอรอยต่อ 1 mm^2 เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ(5-13) ค่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

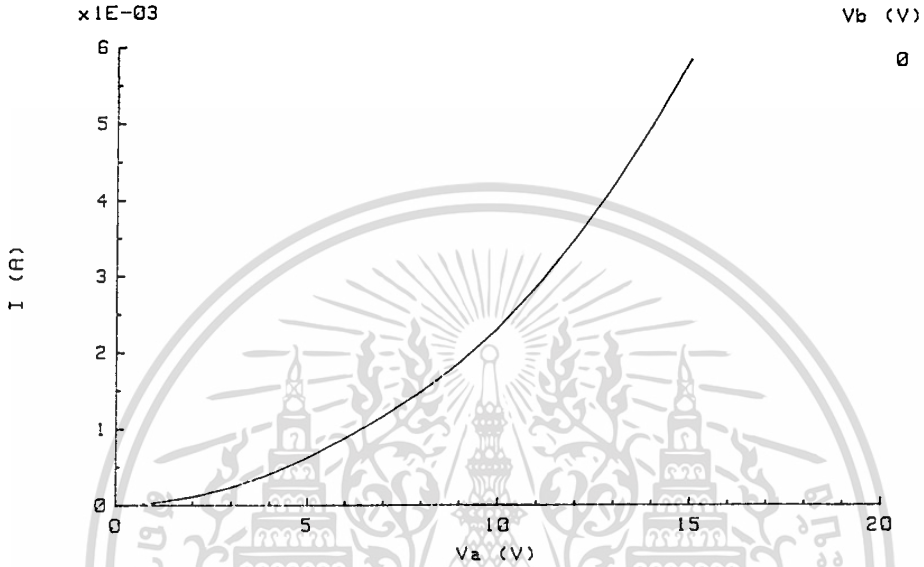
$$\phi_{Bp} = 0.57 \text{ V}$$

เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับที่อ่านได้จากกราฟในรูปที่ 5-30 พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน
 ดังนั้นเราจึงได้ขอตักที่ไดโอดที่มีค่าแรงดันภายในเป็น 0.57 V ที่สามารถนำไปใช้งานต่อไป

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= NUMBER 135

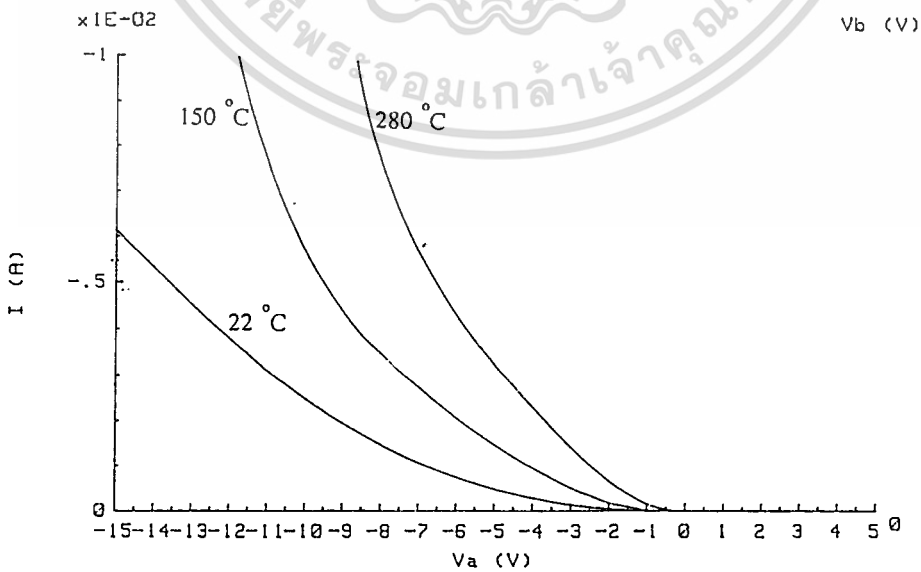


รูปที่ 5-32 แสดงคุณลักษณะของกระแส-แรงดันในทิศทางไบแอสไปหน้า
 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของรอยต่ออลูมิเนียม-ฟิล์มเพชรชนิดพี

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= NUMBER 135



รูปที่ 5-33 แสดงคุณลักษณะของกระแส-แรงดันในทิศทางไบแอสย้อนกลับที่

อุณหภูมิต่าง ๆ ของรอยต่ออลูมิเนียม-ฟิล์มเพชรชนิดพี
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออุปกรณ์

เมื่อพิจารณาถึงค่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามของเพชร ที่มีค่า 5.5 eV ซึ่งการที่จะกระตุ้นพาหะให้เกิดพาหะอิสระในแถบความนำจึงต้องใช้พลังงานสูง ดังนั้นการทำงานของอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเพชรจะสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่อุปกรณ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ยกตัวอย่างเช่น ซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่มีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามแคบ คือมีค่า 1.12 eV และ 1.45 eV ตามลำดับ จะไม่สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง หรือที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ ไม่สามารถทำงานได้เลย เนื่องจากไม่สามารถควบคุมปริมาณพาหะได้อย่างเหมาะสม เพื่อศึกษาการทำงานของขอตักกีโคโอดที่เกิดจากรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพีถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ว่ามีลักษณะอย่างไร จึงทำการศึกษาคคุณลักษณะของกระแส-แรงดันที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยแสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดันได้ดังรูปที่ 5-32 และรูปที่ 5-33

จากคุณลักษณะของกระแส-แรงดันในรูปที่ 5-32 เป็นกรณีการไบแอสไปหน้า พบว่าที่แรงดันคงที่ค่าหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น(จนมีค่า 280 องศาเซลเซียส) กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อยังคงมีค่าคงที่ ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่า ในการไบแอสไปหน้านั้นกระแสที่ไหลเป็นผลจากพาหะส่วนใหญ่ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพาหะที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับพาหะส่วนใหญ่ จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของปริมาณกระแสเกิดขึ้น ส่วนการไบแอสย้อนกลับในรูปที่ 5-33 สังเกตเห็นว่าที่แรงดันคงที่ค่าหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น กระแสสามารถไหลผ่านรอยต่อได้มากขึ้น โดยจะสังเกตเห็นจากกราฟ ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลจากพลังงานความร้อนที่จ่ายให้กับอุปกรณ์จะไปกระตุ้นพาหะให้เกิดพาหะอิสระได้ง่ายขึ้น เนื่องจากกรณีการไบแอสย้อนกลับกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อเป็นของพาหะส่วนน้อย ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสอย่างชัดเจน นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส คุณลักษณะของโคโอดยังคงอยู่ซึ่งสังเกตได้จากกราฟยังคงมีแรงดันตกคร่อมรอยต่อ แต่แรงดันของการเบรคดาวน์มีค่าลดลงกว่าขณะทำงานที่อุณหภูมิห้อง(22 องศาเซลเซียส) ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าขอตักกีโคโอดที่มีโครงสร้างเป็นเพชร สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นข้อดีของสารกึ่งตัวนำเพชรที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ต้องการการทำงานที่อุณหภูมิสูง

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์

ผลงานวิจัยฉบับนี้ การวิจัยเริ่มจากการสร้างระบบ CVD อย่างง่ายของ CVD แบบความร้อนที่สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ที่มีความดันบรรยากาศ โดยมีแหล่งจ่ายเป็นไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ในก๊าซไฮโดรเจน และใช้หลอดทั้งสแตนเป็นตัวให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาเคมี หลังจากที่ทำการสร้างชุดเครื่องมือของระบบ CVD เสร็จแล้ว ได้ทำการทดลองสร้างฟิล์มเพชร ในการนำฟิล์มไปใช้งานนั้นฟิล์มต้องมีคุณภาพดี ดังนั้นจึงต้องทำการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม จากการศึกษาพบว่า พารามิเตอร์หลักที่มีผลอย่างมากต่อเงื่อนไขการสร้าง คือ อุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซที่เป็นแหล่งจ่าย ผลการทดลองที่ได้จากการแปรค่าอุณหภูมิของไส้หลอด(หรือของฐานรอง) และอัตราการไหลของก๊าซที่เป็นแหล่งจ่าย พบว่า ที่อุณหภูมิสูงค่าหนึ่ง (ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส) ระบายของผลึกเพชรที่ได้เป็นระนาบ(111) และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงได้ระนาบเป็น(100) ในการสร้างฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำลักษณะผลึกเป็นพวกผลึกไม่เป็นรูปขนาดใหญ่ และขนาดเล็กคล้าย cauliflower ส่วนผลการศึกษาอัตราการไหลของก๊าซพบว่า ถ้ามีปริมาณมากทำให้คาร์บอนมากเกินไป ลักษณะของฟิล์มเป็นแบบ ball shape และถ้ามีปริมาณน้อยฟิล์มมีลักษณะเป็นจุดเล็ก ๆ หรืออาจไม่เกิดฟิล์มเลย ก่อนการนำฐานรองซิลิกอนไปสร้างฟิล์มนั้นต้องทำการเตรียมฐานรองเบื้องต้น ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ การขัดด้วยครีมเพชรและการชุบด้วยสารละลายของผงเพชรในเอทิลแอลกอฮอล์ จากการทดลองสร้างฟิล์มจากฐานรองที่เตรียมจากทั้งสองวิธีพบว่าให้ฟิล์มเพชรในลักษณะเดียวกัน แต่ฐานรองที่ชุบด้วยสารละลายของผงเพชรในเอทิลแอลกอฮอล์จะให้อัตราการเคลือบฟิล์มสูงกว่า สรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์มเพชรได้ว่า อุณหภูมิของไส้หลอด และฐานรองมีค่า 2060 องศาเซลเซียส และ 950 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อัตราการไหลของแหล่งจ่ายเป็น 10 มิลลิลิตร/นาที และอัตราส่วนของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อก๊าซไฮโดรเจนเป็น 14 % โดยปริมาตร มีระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองเป็น 1.4 มิลลิเมตร กระทำที่ความดันบรรยากาศ

หลังจากความสำเร็จในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก ที่ใช้แหล่งจ่ายเป็นไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ และได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม ต่อมาจึงได้ทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี โดยการเติมอะตอมสารเจือปน มีแหล่งจ่ายเป็นสารละลายของโบรอนไตรออกไซด์ในเอทิลแอลกอฮอล์ ทำการศึกษาที่ค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน(B/C) ต่าง ๆ กัน คือ 0.1 ppm, 1ppm, 10ppm, 100ppm, 1000ppm และ 10000ppm ในการสร้างใช้เงื่อนไขการสร้างเดียวกับการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก ซึ่งสามารถสร้างฟิล์มให้มีคุณภาพดีเช่นเดียวกับการสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากฟิล์มเพชรที่ได้ นำฟิล์มไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ สิ่งแรกที่ทำการศึกษาคือ การดูลักษณะของฟิล์มจาก SEM ทำให้สามารถบอกระนาบของฟิล์มได้ โดยพิจารณาจากรูปร่างของระนาบที่มี Miller indices ที่ h,k,l มีค่าต่าง ๆ กัน จากการศึกษาพบว่าฟิล์มที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมมีระนาบเป็น(111) และฟิล์มที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมีระนาบเป็น(100) นอกจากนั้นจาก SEM ยังสามารถหาอัตราการเคลือบของฟิล์มลงบนฐานรองซิลิกอนมีค่าเป็น 8-10 ไมครอน/ชั่วโมง จากการนำฟิล์มไปวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแลตทิซได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยอาศัย Bragg's law และการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของเพชรจากตาราง ASTM(6-675) ผลการคำนวณค่า interplanar spacing ของฟิล์มเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าฟิล์มที่ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชร กรณีของฟิล์มเพชรชนิดที่พบว่ามีคุณสมบัติเป็นเพชรที่ทุกค่าของอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอน นอกจากนี้การวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ยังสามารถบอกความแตกต่างระหว่างฟิล์มเพชรที่มีระนาบ(111) และระนาบ(100) ได้ โดยพิจารณาจากระนาบของผลึกที่ได้จากการเปรียบเทียบค่า interplanar spacing ของฟิล์มกับค่ามาตรฐาน เมื่อพิจารณาที่ระนาบ(400) ซึ่งเป็นระนาบที่ขนานกับระนาบ(100) พบว่าของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมไม่พบระนาบดังกล่าวเกิดขึ้น ซึ่งจาก SEM ฟิล์มเพชรที่มีลักษณะสามเหลี่ยมมีระนาบ(111) ดังนั้นจากข้อมูลของ SEM และ XRD จึงเป็นข้อมูลสนับสนุนถึงการบอกระนาบของฟิล์มที่ได้ เพื่อเป็นข้อมูลยืนยันคุณสมบัติความเป็นเพชรของฟิล์มที่ได้ Raman spectroscopy เป็นเครื่องมืออีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสาร โดยเฉพาะฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการ CVD เนื่องจากมีความไวต่อพันธะคาร์บอน สามารถวิเคราะห์ได้จาก Raman spectrum พบว่าสำหรับเพชรที่มีระนาบ(111) มียอดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1333 cm^{-1} และระนาบ(100) มียอดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1335 cm^{-1} เปรียบเทียบกับของเพชรในธรรมชาติที่มียอดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1332 cm^{-1} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน การที่ตำแหน่งยอดมีการเลื่อนไปนี้เป็นผลจากมีพันธะ sp^2 หรือ พันธะของกราฟไฟท์เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาระหว่างตำแหน่งเลขคลื่นของระนาบ(111) และ(100) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเพชรที่มีระนาบ(111) มีคุณภาพดีกว่าของระนาบ(100) เนื่องจากมีเลขคลื่นใกล้เคียงกับเพชรในธรรมชาติมากกว่า จากข้อมูลของวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟิล์มสรุปได้ว่าฟิล์มที่สร้างได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรจริง

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม โดยการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีประโยชน์อย่างมากต่อการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งาน หลังสร้างฟิล์มแล้วนำฟิล์มไปทดสอบชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มโดยอาศัยหลักการซีเบก พบว่าฟิล์มแสดงความนำไฟฟ้าชนิดพี จึงกล่าวได้ว่าฟิล์มเพชรที่สร้างจากการเจืออะตอมสารเจือ โบรอน โดยมีแหล่งจ่ายเป็นไอระเหยสารละลายโบรอน ไตรออกไซด์ในเอทิลแอลกอฮอล์มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เทคนิคโพร์พอยท์โพรบ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม โดยเมื่อเจืออะตอมสารเจือเพิ่มขึ้น

เอเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นใบเซอร์เชียนดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง ดังนั้นจะได้ว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน จากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับอุณหภูมิสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้ โดยค่าพลังงานกระตุ้นจะแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน สำหรับค่าความเข้มข้นของพาหะ, สภาพนำ และค่าความคล่องตัวของโฮลเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถหาค่าได้จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ จากการศึกษาพบว่าค่าความเข้มข้นของพาหะและสภาพนำแปรผันตรงกับค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน ส่วนค่าความคล่องตัวของโฮลมีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรนั้นสามารถกระทำได้โดยการแปรค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนเป็นค่าต่าง ๆ กัน

ในการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งานต้องทำการสร้างขั้วสัมผัส การสร้างขั้วนั้นรอยต่อที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ รอยต่อแบบโอห์มมิก และรอยต่อที่มีคุณสมบัติของการเรกติไฟเออร์ จากการศึกษารอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร พบว่ารอยต่อระหว่างทองคำหรืออินเดียมกับฟิล์มเพชรให้รอยต่อแบบโอห์มมิก ในขณะที่รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรรอยต่อมีคุณสมบัติในการเรกติไฟเออร์ และจากคุณสมบัติการเรกติไฟเออร์ของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรนี้เอง จึงได้นำคุณสมบัติดังกล่าวไปสร้างเป็นขอตักกิโอโดด ซึ่งจากการศึกษาคุณลักษณะกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่สร้าง พบว่าค่าแรงดันภายในที่คำนวณได้กับที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเพชรสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง จึงทำการศึกษาคคุณลักษณะกระแส-แรงดันที่อุณหภูมิต่าง พบว่าที่อุณหภูมิสูง(280 องศาเซลเซียส) อุปกรณ์ยังคงสามารถทำงานได้แต่จะมีค่าแรงดันแบรกดาวน์ลดลง ดังนั้นสรุปได้ว่าเพชรเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำมาสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง

การศึกษาการสร้างรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก และฟิล์มเพชรชนิดพี หรือรอยต่อ p-i คุณลักษณะของกระแส-แรงดันที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีคุณสมบัติการเรกติไฟเออร์เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ ผลการคำนวณค่าแรงดันภายในเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากกราฟจะมีค่าใกล้เคียงกัน รอยต่อ p-i จึงมีคุณสมบัติการเรกติไฟเออร์ได้เช่นเดียวกับรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้งานต่อไป

แนวทางการพัฒนาการสร้างฟิล์มเพชร คือ การพัฒนาระบบ CVD โดยสร้างเป็น Chamber ที่มีระบบสูบล้ออากาศออก เพื่อให้บรรยากาศภายในสะอาดขึ้น และช่วยลดรอยตำหนิที่เกิดขึ้นจากอะตอมชนิดอื่น เนื่องจากการทำงานของระบบ CVD ที่ใช้เป็นการส่งผ่านความร้อนจากไส้หลอดไปยังฐานรอง ดังนั้นระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองจึงมีค่าวิกฤติ เพื่อลดปัญหาดังกล่าวควรพัฒนาอุปกรณ์โดยมีการให้ความร้อนที่ฐานรองด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- 1) นริศ จันทร์แดง,เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, ผศ. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ, "การสังเคราะห์ฟิล์มบางของเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อนที่พระจอมเกล้าฯ," ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16, พ.ศ. 2536
- 2) นริศ จันทร์แดง,เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, ผศ. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ, "ผลของอุณหภูมิฐานรองต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเพชร," ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, พ.ศ. 2537
- 3) นริศ จันทร์แดง,เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, ผศ. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ, "การสังเคราะห์และคุณลักษณะฟิล์มเพชรที่เจืออะตอมสารเจือโบรอน," ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, พ.ศ. 2537
- 4) นริศ จันทร์แดง,เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, ผศ. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ, "คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชรที่เจืออะตอมสารเจือโบรอน," ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, พ.ศ. 2537
- 5) ไพรัช รัชชพงษ์ และสมเกียรติ สุขเกษ, "อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ", (กรุงเทพฯ:คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2521)
- 6) C. Kittel, "Introduction to Solid State Physics," John Wiley & Sons, New York, Sixth Edition, chap 1.
- 7) E.H. Rhoderick, "Metal-semiconductor contacts," Clarendon Press, Oxford, 1978.
- 8) G. SH. Gildenblat, S.A. Grot and A. Badzian, "The Electrical Properties and Device Applications of Homoepitaxial and Polycrystalline Diamond Films," Proceeding of the IEEE, Vol. 79, May 1991, No.5, p. 649.
- 9) J. E. Field, "The Properties of Diamond," Academic Press, London, 1979.
- 10) K. Okano, H. Naruki, Y. Akiba, T. Kurosu, M. Iida, Y. Hirose and T. Nakamura , "Characterization of Boron-doped Diamond Film," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 28, No. 6, June, 1989, pp.1066-1071.
- 11) K. Okano, H. Naruki, Y. Akiba, T. Kurosu, M. Iida and Y. Hirose, "Synthesis of diamond Thin Films Having Semiconductive Properties," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 27, No. 2, February, 1988, p. L173-L175.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12) M. Iida, H. Maekawa, H. Kimura, Y. Akiba, Y. Hirose, T. Kurosu and Y. Matasumae, "Electrical Conduction Mechanism in Polycrystalline p-Type Diamond Films," Tokai University, Japan, 1993.

13) R. F. Davis, "Diamond Films and Coatings," Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A., 1993.

14) S. W. Sze, "Physics of Semiconductors Devices," John Wiley&Sons, New York, Second Edition.

15) W. Zhu, B. R. Stoner, B. E. Williams and J. T. Glass, "Growth and Characterization of Diamond Films on Nondiamond Substrates for Electronic Applications," Proceeding of the IEEE, Vol. 79, May 1991, No.5, p. 621.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางแสง

| Material | Refractive Index |
|------------------|-----------------------|
| Germanium | 4.00-4.10 |
| Silicon | 3.42-3.50 |
| GaAs | 3.34-2.12 |
| Diamond | 2.41-2.44(656-486 nm) |
| Sapphire | 1.58-1.83 |
| Fused silica | 1.40-1.48 |
| Crystal quartz | 1.52-1.69 |
| Water | 1.33-1.34 |
| Calcium fluoride | 1.31-1.51 |
| Lithium fluoride | 1.11-1.45 |
| Magnesium oxide | 1.62-1.77 |

ตารางที่ ก-2 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของวัสดุ

| Material | Density(gm/cm ³) |
|-----------------|------------------------------|
| Osmium | 22.8 |
| Platinum | 21.5 |
| Tungsten | 19.3 |
| Uranium | 18.7 |
| Copper | 8.9 |
| Germanium | 5.4 |
| Diamond | 3.52 |
| Beryllium Oxide | 2.86 |
| Aluminium | 2.7 |
| Quartz | 2.65 |
| Boron | 2.54 |
| Silicon | 2.42 |
| Graphite | 2.25 |

ตารางที่ ก-4 แสดงการเปรียบเทียบค่า Young's Modulus

| Material | Value(x 10 ¹¹ dynes/cm ²) |
|-----------|--|
| Diamond | 105.0 |
| Tungsten | 34.0 |
| Steel | 17.2-20.5 |
| Ferrite | 15.0 |
| Platinum | 14.7 |
| Copper | 12.8 |
| Silicon | 11.3 |
| Quartz | 7.9-10.7 |
| Gold | 7.4-8.0 |
| Silver | 7.1-7.8 |
| Aluminium | 6.9 |
| Tin | 4.1-4.5 |
| Lead | 1.4 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

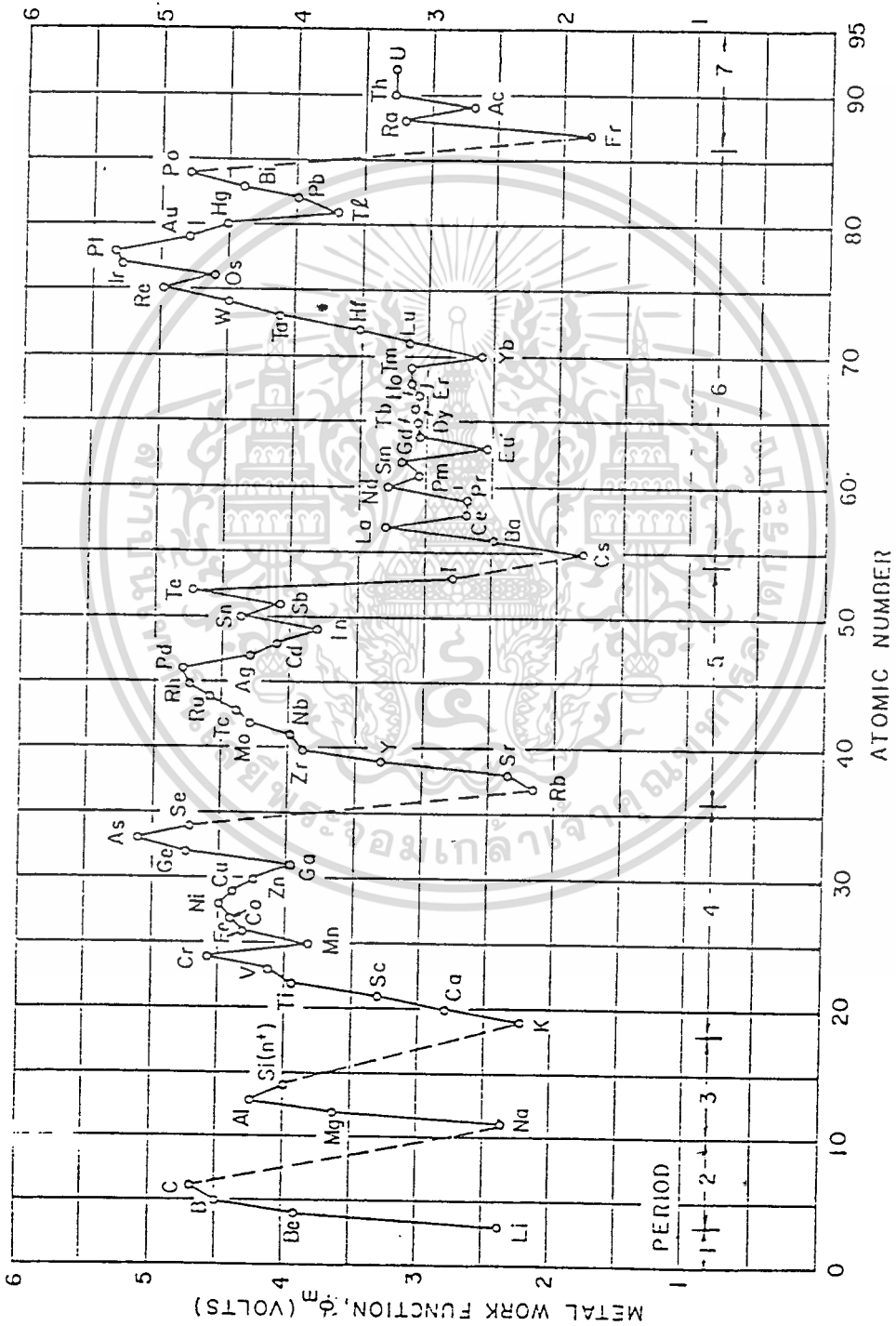
ตารางที่ ก-5 แสดงการเปรียบเทียบความนำความร้อน

| Material | Conductivity(watts/cm-°C) |
|-------------------|---------------------------|
| Diamond(Type II) | 20.00 |
| Boron nitride | 13.00 |
| Beryllium oxide | 3.70-5.90 |
| Water | 5.61 |
| Silicon carbide | 4.90 |
| Silver | 4.18 |
| Copper | 3.80 |
| Aluminium nitride | 3.70 |
| Gold | 3.11 |
| Aluminium | 2.38 |
| Tungsten | 1.70 |
| Silicon | 1.50 |
| Graphite | 0.80-2.50 |
| Tin | 0.65 |
| Gallium Arsenide | 0.46 |
| Germanium | 0.28 |
| Titanium | 0.20 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

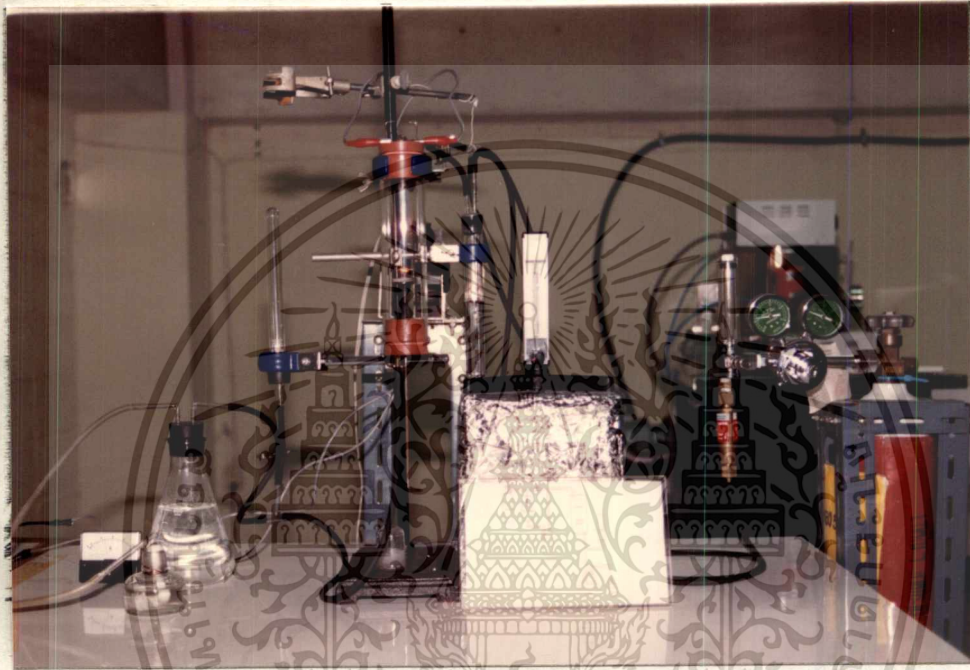
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันงานของโลหะในสูญญากาศ สำหรับโลหะที่มี
การทำความสะดวกผิวแล้ว กับค่าเลขอะตอม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน สำหรับเทคนิคที่ใช้เป็นเทคนิคของวิธีการ CVD แบบความร้อน ซึ่งวิธีการนี้จะมีข้อดีตรงอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูก สามารถสร้างขึ้นได้เอง โดยระบบที่สร้างขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ ก-1

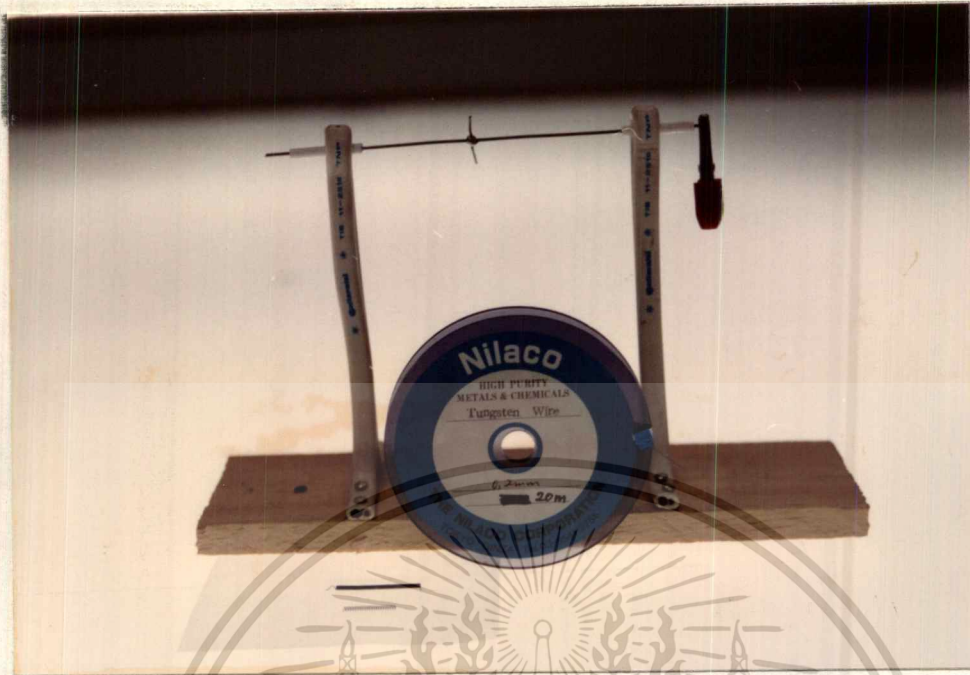


รูปที่ ก-1 แสดงระบบ CVD แบบความร้อนที่สร้างขึ้น

พิจารณาจากรูปอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรประกอบด้วย

- 1) ถังก๊าซไฮโดรเจนขนาด 0.5 ลิตร
- 2) เรกกูเรเตอร์ของก๊าซไฮโดรเจน
- 3) Flow meter ขนาด 20 ml/min และ ขนาด 200 ml/min
- 4) หลอดทดลองสำหรับใส่แหล่งจ่าย
- 5) ท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ยาว 21 cm พร้อมจุกยางสำหรับทำ chamber
- 6) ลวดทังสเตนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm (สำหรับทำแกนใส่หลอดในการนำไฟฟ้า) และขนาด 0.2 mm (สำหรับพันเป็นไส้หลอด) [แสดงได้ดังรูปที่ ก-2]
- 7) แผ่นโมลิบดินัมสำหรับวางฐานรอง
- 8) ขวดรูปชมพู
- 9) ตะเกียงแอลกอฮอล์

เอกสารนี้(10) แกนเหล็กพร้อมขดลวดทองแดงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

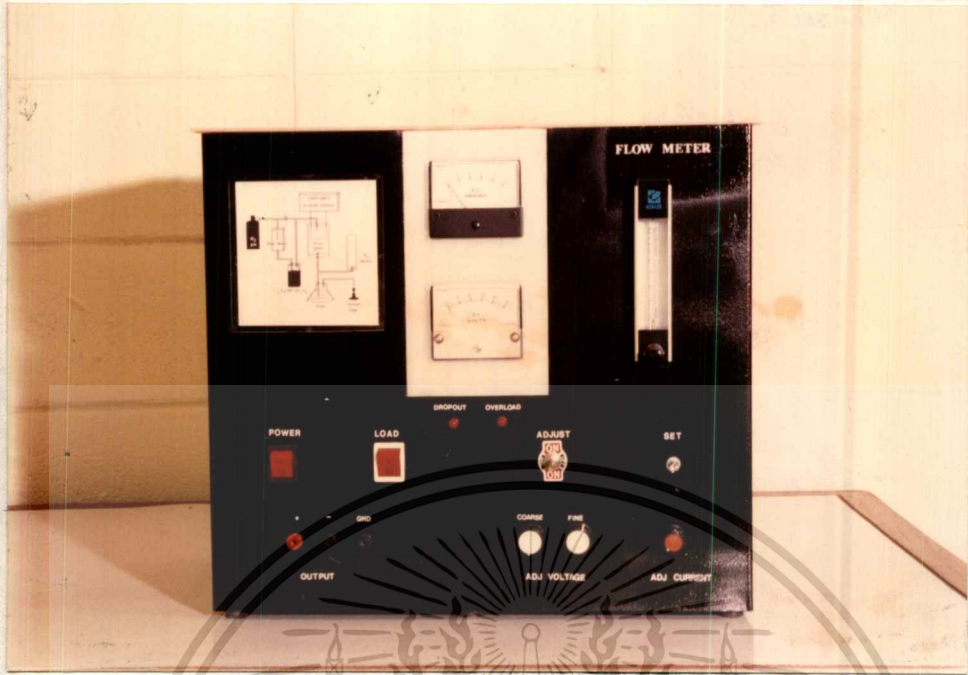


รูปที่ ก-2 แสดงลวดทั้งสแตนเลสและอุปกรณ์ที่ใช้พันไส้หลอด

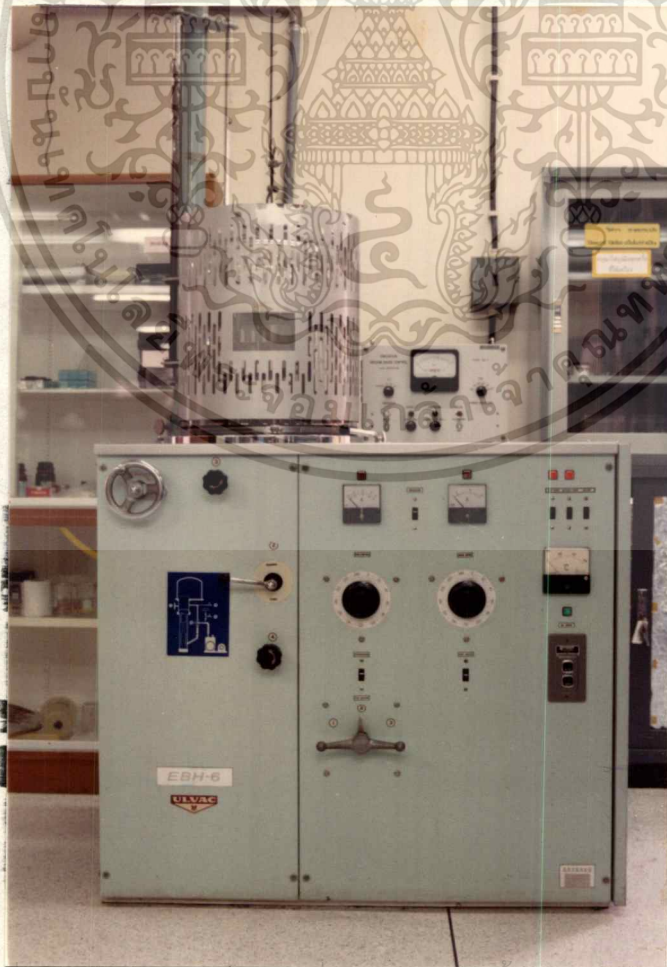
- 11) หัดลมระบายความร้อน
- 12) ท่ออแก๊ว
- 13) สายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 cm
- 14) ที่หนีบสายยางแบบปรับได้
- 15) แหล่งจ่ายไฟให้กับไส้หลอด

จากการทดลองและหาเงื่อนไขการสร้าง พบว่าการสร้างฟิล์มเพชรแต่ละครั้งกระแสที่จ่ายให้กับไส้หลอดมีค่าประมาณ 7-8 แอมแปร์ เริ่มแรกนั้นแหล่งจ่ายไฟเป็นไฟ AC (220 V/ 50 Hz) เพื่อให้สามารถปรับการจ่ายแรงดันให้กับไส้หลอดได้ละเอียดขึ้น จึงทำการแปลงจาก 220 V ให้เหลือ 40 V และทำการปรับละเอียดด้วยแวลริเอค (variac) เนื่องจากเป็นแหล่งจ่ายไฟ AC โดยตรงเมื่อความต้านทานของโหลดเปลี่ยนจะทำให้แรงดันเปลี่ยนแปลง เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้ทำการสร้างแหล่งจ่ายไฟใหม่เป็นแบบสวิชชิง (switching power supply) อุปกรณ์สวิชชิงที่ใช้เป็น IGBT ทำหน้าที่ปิด/เปิดวงจรด้วยความถี่ 20 kHz การควบคุม IGBT จะใช้วงจรควบคุมด้วยการเชื่อมโยงทางแสง ซึ่งแหล่งจ่ายไฟแบบสวิชชิงมีข้อดีตรงให้เสถียรภาพของการจ่ายแรงดันคงที่และมีประสิทธิภาพสูง จากการที่แหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับไส้หลอดทำงานที่ความถี่สูงเป็นผลให้ความร้อนจากไส้หลอดมีค่าคงที่ ซึ่งก็คือสามารถควบคุมอุณหภูมิของการสร้างฟิล์มเพชรได้คงที่มากขึ้น สำหรับชุดอุปกรณ์มีลักษณะดังรูปที่ ก-3

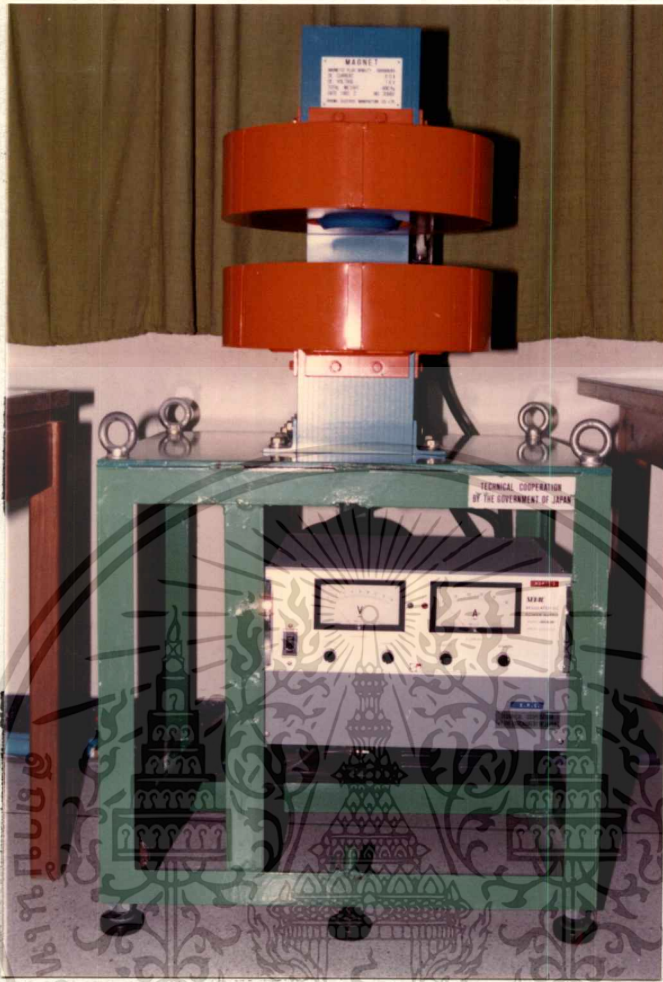
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-3 แสดงชุดอุปกรณ์ในการสร้างฟิล์มเพชรที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟแบบสวิทซ์ซิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ค-4 แสดงเครื่อง vacuum evaporator
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมเหตดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-5 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายนริศ จันทร์แดง เกิดเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2512 ที่จังหวัดเพชรบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2534 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535 มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการยอมรับนอกเหนือจากวิทยานิพนธ์ จำนวน 4 เรื่อง ได้แก่ 1. การสังเคราะห์ฟิล์มบางของเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อนที่พระจอมเกล้า ฯ 2. ผลของอุณหภูมิฐานรองต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเพชร 3. การสังเคราะห์และคุณลักษณะฟิล์มเพชรที่เจืออะตอมสารเจือโบรอน และ 4. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชรที่เจืออะตอมสารเจือโบรอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้