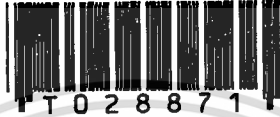


การศึกษาและพัฒนาไดโอดฟิล์มเพชร แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน
THE STUDY AND DEVELOPMENT OF DIAMOND THIN FILM
HETEROJUNCTION DIODE



นายบัญชา กิตติรังสี
MR. BUNCHA KITTIRUNGSI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

เลขที่..... สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขทะเบียน..... 28871
วัน, เดือน, ปี..... 110 พ.ย. 2540

พ.ศ. 2540
ISBN 947-621-998-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์ทางเว็บไซต์และข้อมูลอื่นๆของเอกสารฉบับนี้สงวนไว้

**THE STUDY AND DEVELOPMENT OF DIAMOND FILM
HETEROJUNCTION DIODE**



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

1997

ISBN 947-621-998-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและพัฒนาไดโอดฟิล์มเพชร แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน
นักศึกษา	นายบัญชา กิตติรังสี
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2540

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้นำเสนอ การศึกษาและพัฒนาการสร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน โดยเริ่มจากการศึกษาการสร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี ด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน ที่ความดันต่ำ ซึ่งวิธีนี้เป็นที่สนใจอย่างมาก ทั้งทางด้านทฤษฎีและการค้า เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างมีราคาถูกที่สุด ต้นทุนการปฏิบัติงานต่ำ มีความปลอดภัยสูง และเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์ ยิ่งกว่านั้น ยังสามารถสร้างเพชรในรูปของฟิล์มบางบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรในลักษณะที่สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างประหยัดและเปิดโอกาสมากขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่มีศักยภาพ จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะฟิล์มจากกล้องจุลทรรศน์และภาพถ่าย SEM สำหรับลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มจะทำการศึกษาจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ Raman spectroscopy ตามลำดับ ทำการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มด้วยวิธี เข้มร้อน อีกทั้งยังทำการศึกษาผลของก๊าซในอากาศที่มีต่อการเกิดชั้นพื้นผิวหน้าไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ท้ายสุดเป็นการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับงานทางอิเล็กทรอนิกส์โดยสร้างเป็นขอตติ์ไดโอด และพัฒนาเป็นไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ระหว่างฟิล์มเพชร ชนิดพี กับ ซิลิกอน ชนิดเอ็น ที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง โดยทำการศึกษาคงสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานที่สร้างขึ้น ซึ่งผลการทดลองของไดโอดที่สร้างได้ยังสามารถวิเคราะห์และอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงานที่นำเสนอ

THESIS TITLE THE STUDY AND DEVELOPMENT OF DIAMOND THIN
FILM HETEROJUNCTION DIODE

STUDENT MR.BUNCHA KITTIRUNGSI

THESIS ADVISOR ASST.PROF.DR.WISUT TITIROONGRUANG

LEVEL OF STUDY MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT ELECTRONICS KINGMONGKUT'S INSTITUTE OF
TECHNOLOGY LADKRABANG

YEAR 1997

ABSTRACT

This thesis presents the study and development on P-type diamond film to heterojunction semiconductor diode device. The study on P-type diamond film synthesis was initiated by low pressure thermal CVD method, which is very fascinating both in research and in commerce not only the most inexpensive fabrication apparatus, low operation cost, high level of safety, and also pure synthesized diamond. Furthermore, diamond thin films, however, are fabricated on nondiamond substrates in the manner of cost-saving utilization and make more opportunities for potential applications in comparison with conventional synthesis using high pressure and high temperature bulk diamond process, which can unlikely make use of diamond efficiently. In addition, the thesis also presents and study on film morphologies from SEM. For structures and properties of film, it was studied respectively from patterns of X-ray diffraction and Raman spectroscopy, determination of conductivity type of film by Hot-point probe, study on the atmosphere component gas effect on the conductive diamond thin film formation, finally, the applications of diamond film for electronics by the fabrication to Schottky diode device, the development of heterojunction diode between p-type diamond film and n-type silicon which can be operated at high temperature, and study on the electrical property of prepared devices. The experimental results of the fabricated diode analyzed and explained by the aid of the proposed energy band model.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ผู้ให้คำปรึกษา วางแนวทาง ตลอดจนชี้แนะให้ งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จ และทำให้ผู้วิจัยรู้ว่าเพชรสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าการนำ มาเป็นเครื่องประดับ ขอขอบคุณคณาจารย์ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านและคุณนริศ จันทร์แดง ที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนทางด้านเครื่องมือและความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ขอขอบคุณ Prof. Yoichi Hirose และ Prof. Masamori Iida แห่ง Tokai University ที่ให้คำแนะนำในการสร้างและ พัฒนาปรับปรุงเทคนิคการสร้างฟิล์มเพชร ขอขอบคุณ ผศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช แห่งภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวัด SEM ขอขอบคุณมูลนิธิเพื่อการศึกษา คอมพิวเตอร์และการสื่อสารที่ให้เงินทุนสนับสนุนการทำวิจัย และขอขอบคุณทันตแพทย์หญิง ลัดดาวรรณ ชมชื่น ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ ผู้ปกครอง ผู้ให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด

บัญชา กิตติรังสิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
สัญลักษณ์.....	XIV
ศัพท์เทคนิค.....	XVI
คำนำ.....	XX
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 การสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง.....	2
1.3 เทคโนโลยีต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำในปัจจุบัน.....	6
1.3.1 การสร้างด้วยวิธี Hot Filament Activation.....	7
1.3.2 การสร้างด้วยวิธี Plasma Activation.....	8
1.3.3 การสร้างด้วยวิธี Electron Cyclotron resonance (ECR).....	9
1.3.4 การสร้างด้วยวิธี Plasma Torch.....	10
1.3.5 การสร้างด้วยวิธี Combustion Activation.....	12
1.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	13
2 ทฤษฎี.....	16
2.1 เพชรธรรมชาติ.....	16
2.2 สมดุลยภาพของคาร์บอน.....	16
2.3 คุณสมบัติต่างๆของเพชรเทียบกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ.....	21
2.4 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	23

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.5 ระดับพลังงาน.....	25
2.6 สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และ พี.....	27
2.6.1 สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น.....	27
2.6.2 สารกึ่งตัวนำ ชนิดพี.....	28
2.7 รอยต่อระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ.....	29
2.7.1 รอยต่อระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี.....	29
2.7.2 รอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกัน.....	34
2.8 สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำไดโอด.....	36
2.8.1 ไดโอดในอุดมคติ.....	36
2.8.2 ไดโอดในทางปฏิบัติ.....	37
2.8.3 ขอตกไดโอด.....	38
2.8.4 แบคเทอริดไดโอด.....	39
3 กระบวนการสร้าง.....	42
3.1 กระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง.....	42
3.2 กระบวนการสร้าง.....	43
3.2.1 การสร้างฟิล์มเพชร ชนิด อินทรีนซิค.....	43
3.2.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ชนิด พี.....	46
3.2.3 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ชนิด เอ็น.....	47
3.3 กระบวนการเตรียมชุดทดลอง ที่ใช้ในการศึกษาผลของก๊าซในอากาศ ที่มีต่อการเกิดชั้นพื้นผิวหน้าไฟฟ้าของฟิล์มชนิด พี.....	47
3.4 วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM).....	49
3.4.1 การเปิดเครื่องถ่ายภาพ SEM.....	49
3.4.2 การเคลือบทองคำ.....	49

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4.3การใช้เครื่อง SEM.....	50
3.5 กระบวนการสร้างไดโอด โครงสร้างโลหะ กับฟิล์มเพชร.....	51
3.6 กระบวนการสร้างไดโอด แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันระหว่างฟิล์มเพชร ชนิดพี กับซิลิกอน ชนิดเอ็น.....	54
4 การทดลองและผลการทดลอง.....	55
4.1 การศึกษา ฟิล์มเพชร.....	55
4.1.1การพัฒนาการสร้างฟิล์มเพชร.....	55
4.1.2การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มเพชรจากกล้องจุลทรรศน์.....	57
4.1.3การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มเพชรจากภาพถ่าย SEM (Scanning Electron Microscopy).....	59
4.1.4การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มเพชรด้วยวิธีการเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์.....	66
4.1.5การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy	68
4.1.6การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ด้วยวิธีซีเอ็มอาร์... 4.1.6.1การตรวจฟิล์มเพชร ชนิด พี.....	71
4.1.6.2การตรวจฟิล์มเพชร ชนิด เอ็น.....	72
4.2 การศึกษา ผลของก๊าซในอากาศ ที่มีต่อการเกิด ชั้นพื้นผิวหน้าไฟฟ้าของ ฟิล์มเพชร.....	72
4.2.1การทดสอบผลของก๊าซที่มีต่อการเกิดฟิล์มเพชร.....	72
4.2.2การทดสอบก๊าซที่เป็นองค์ประกอบหลักในอากาศปกติ ต่อการ เกิดฟิล์มเพชร.....	74
4.2.3การทดสอบไอรกและไอด่างต่อการเกิดฟิล์มเพชร.....	78
4.2.3.1การทดสอบผลของไอรกต่อฟิล์มเพชร.....	78
4.2.3.2การทดสอบผลของไอน้ำที่มีสภาพเป็นด่างต่อฟิล์มเพชร..	80
4.2.4การทดสอบสนับสนุน ผลของกรดต่อฟิล์มเพชร.....	81

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2.5การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	82
4.2.6สรุป.....	84
4.3 การศึกษาคุณสมบัติของไดโอด โครงสร้างโลหะกับฟิล์มเพชร.....	85
4.3.1คุณลักษณะของกระแส และแรงดัน.....	85
4.3.2ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอดที่สร้างขึ้น.....	86
4.3.3การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	89
4.4 การศึกษาคุณสมบัติของไดโอด แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ระหว่าง ฟิล์มเพชร ชนิดพี กับซิลิกอนชนิดเอ็น.....	92
4.4.1การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	92
4.4.2ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอดที่สร้างขึ้น.....	97
4.4.3การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	101
5 สรุป และวิจารณ์.....	105
เอกสารอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก ก ตารางธาตุ.....	109
ภาคผนวก ข การคำนวณหาค่าไบรอนต่อคาร์บอน.....	110
ภาคผนวก ค เทคนิคการวัดวิธีเข็มร้อน.....	112
ภาคผนวก ง เทคนิคการวัดวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	113
ภาคผนวก จ เทคนิค Raman spectroscopy.....	115
ภาคผนวก ฉ เทคนิค Scanning Electron Microscopy.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงตัวอย่างการนำคุณสมบัติของเพชร ไปประยุกต์ใช้งานด้านในปัจจุบัน.....	14
2 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของเพชร เปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน.....	21
3 แสดงผลของอุณหภูมิของฐานรองต่อการเกิดลักษณะฟิล์มเพชร.....	55
4 แสดงเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม.....	56
5 แสดงค่าระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม มาตรฐานของเพชร(ASTM 6-675)	68
6 แสดงน้ำหนักโบรอนไดรอกไซด์ ที่ค่า B/C ต่างๆที่เตรียมเอทิลแอลกอฮอล์ จำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร.....	111
7 แสดงผลการทดลองการวัดแบบเข็มร้อนที่ได้หลังจากให้ความร้อนกับเซมิ A	112
8 แสดงยอดหลักของ Raman จากเพชร.....	116

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1 แสดงเครื่องมือความดันสูง ที่ใช้ในการสร้าง (a) เกร็ดเพชร (b) เม็ดเพชรเดี่ยว.....	3
2 แสดงผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้ที่ความดันสูง.....	4
3 แสดงลักษณะของเพชรโดยทั่วไปที่สร้างที่ความดันสูง.....	4
4 แสดงเครื่องสังเคราะห์เพชรแบบอุณหภูมิและความดันสูง โดยตรงของ National Institute for Research Materials (NIRIM).....	5
5 แสดงไดอะแกรมของระบบที่ใช้วิธี Hot Filament Activation.....	7
6 แสดงไดอะแกรมของระบบ Microwave Plasma Activation.....	8
7 แสดงไดอะแกรมของระบบ ERC.....	10
8 แสดงไดอะแกรมการสร้างวิธี DC Arc Jet.....	11
9 แสดงไดอะแกรมบริเวณที่เกิดฟิล์มเพชร จากเปลวไฟของระบบ Combustion Activated CVD.....	12
10 แสดงไดอะแกรมฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion Activation.....	13
11 แสดงการประยุกต์นำฟิล์มเพชรไปใช้งาน เช่น เคลือบเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ เพื่อป้องกันการสึกกร่อน.....	15
12 แสดงการนำฟิล์มเพชรไปใช้งาน โดยการเคลือบ กับไบเมตสำหรับตัดวัสดุที่มีความแข็ง.....	15
13 แสดงโครงสร้างของเพชร.....	17
14 แสดงโครงสร้างของกราไฟท์.....	17
15 เปรียบเทียบโครงสร้างของเพชร (111) และกราไฟท์ (0001).....	18
16 แสดงแผนภาพสมดุลภาคของคาร์บอน.....	20
17 แสดงระบบ CVD แบบความร้อน.....	24
18 แสดงวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ละชั้นและแถบพลังงาน.....	25
19 แสดงแถบพลังงานของ a) จำนวน b) สารกึ่งตัวนำ c) ตัวนำ.....	26
20 แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมเจือชนิดเอ็น และอะตอมสารกึ่งตัวนำ....	27
21 แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมเจือชนิดพี และอะตอมสารกึ่งตัวนำ.....	28
22 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีในสภาวะก่อนสัมผัส.....	30

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
23 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีในสภาวะ ในกรณีที่ $\phi_m < \phi_s$	30
24 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดพีในขณะ ก่อนสัมผัส.....	33
25 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดพี ภายหลัง สัมผัสกันในกรณีที่ $\phi_m > \phi_s$	33
26 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่แยกกันอยู่.....	34
27 แสดงแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน แบบชนิดเอ็น และชนิดพี ที่ สภาวะสมดุลย์.....	35
28 แสดงไดโอดในอุดมคติ.....	36
29 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันของไดโอดในทางปฏิบัติ.....	37
30 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของขอตักไดโอด.....	38
31 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของแบบเจอร์ดไดโอด ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ.....	39
32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแบบเจอร์ดไดโอด ชนิดที่ไม่มี ความต้านทานเชิงลบ.....	40
33 แสดงปรากฏการณ์ทะลุผ่านของไดโอด ขณะ ก)ไม่มีแรงดันไบแอส ข)ได้รับแรงดัน ไบแอสย้อนกลับ.....	41
34 แสดงผงเพชรของ De Beers ที่ใช้ในการสร้าง.....	42
35 แสดงลักษณะพื้นผิวที่ได้จากการชุบสารละลายผงเพชร.....	43
36 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร.....	43
37 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร.....	45
38 แสดงไบรอนโตรออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี.....	46
39 แสดงฟอสฟอรัสเพนตรออกไซด์ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรชนิด เอ็น.....	47
40 แสดงชุดท่อแก้ว CVD และวิธีการวัดความต้านทานโดยวิธีแบบสองขั้ว.....	48
41 แสดงเครื่อง SEM รุ่น JSM - 5200 ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	50

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
42 แสดงเครื่องที่ใช้สำหรับเคลือบทองคำ.....	51
43 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร ชนิดพี.....	52
44 แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร ชนิดพี.....	52
45 แสดงภาคตัดขวางของไดโอดโครงสร้างโลหะกับฟิล์มบางเพชร.....	53
46 แสดงภาคตัดขวางไดโอดโครงสร้าง ฟิล์มเพชรลักษณะชนิดพี กับ ซิลิกอนชนิด เอ็นที่สร้างขึ้น.....	54
47 แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรจากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 200 เท่า.....	57
48 แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรจากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 400 เท่า.....	58
49 แสดงลักษณะของผลึกเพชรจากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 200 เท่า.....	58
50 แสดงลักษณะของผลึกเพชรจากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 400 เท่า.....	59
51 แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบด้วย SEM.....	60
52 แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่อุณหภูมิฐานรอง 850 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบด้วย SEM.....	60
53 แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่อุณหภูมิฐานรอง 890 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบด้วย SEM.....	61
54 แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรระนาบ (100) ที่อุณหภูมิฐานรอง 950 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบด้วย SEM.....	61
55 แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มเพชร จากการตรวจสอบด้วย SEM.....	62
56 แสดงลักษณะของผลึกเพชร ที่มองจากส่วนยอดของผลึกจาก การตรวจสอบ ด้วยSEM.....	62
57 แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรระนาบรวม จากการตรวจสอบด้วย SEM.....	63
58 แสดงลักษณะของผลึกเพชร ที่มองจากด้านข้างของผลึก จากการตรวจสอบ ด้วยSEM.....	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
59 แสดงลักษณะของผลึกเพชร ขนาด 50 ไมครอน จากการตรวจสอบด้วยSEM.....	64
60 แสดงการเกิดเพชรครั้งที่สอง บนฟิล์มเพชรเดิม.....	65
61 แสดงการเกิดผลึกเพชรครั้งที่สอง บนผลึกเพชรเดิม.....	65
62 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	67
63 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ของตัวอย่างฟิล์ม หมายเลข 1..	69
64 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ของตัวอย่างฟิล์ม หมายเลข 5..	70
65 แสดงอุปกรณ์การหาชนิดของพาหะในการนำกระแสของฟิล์มเพชร.....	71
66 แสดงผลของอากาศที่มีต่อความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	73
67 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้า พื้นผิวฟิล์มเพชร กับก๊าซออกซิเจน (O ₂).....	74
68 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้า พื้นผิวฟิล์มเพชร กับก๊าซไนโตรเจน (N ₂).....	75
69 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้า พื้นผิวฟิล์มเพชร กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂).....	76
70 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้า พื้นผิวฟิล์มเพชร กับก๊าซไฮโดรเจน (H ₂).....	77
71 แสดงผลความต้านทานไฟฟ้าของไอกรด ต่อชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้าฟิล์มเพชร.....	79
72 แสดงผลความต้านทานไฟฟ้าของไอที่มีสภาพเป็นด่าง ต่อฟิล์มเพชร.....	80
73 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานของฟิล์มเพชร ในบรรยากาศที่ปกคลุมด้วยไอกรด และที่เวลา 20 นาทีบรรยากาศได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นไอแอมโมเนีย(NH ₃).....	81
74 แสดงกระบวนการที่จะอธิบายการก่อตัวของชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้า ชนิดที่.....	83
75 แสดงกระบวนการที่จะอธิบายการก่อตัวของชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้า ชนิดที่ และการเกิดโฮลในฟิล์มเพชร.....	84
76 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันของขอตติกีไดโอด ที่สร้างขึ้น.....	85
77 แสดงคุณลักษณะของกระแส กับแรงดันของขอตติกีไดโอด.....	86
78 แสดงคุณลักษณะของกระแส กับแรงดันของขอตติกีไดโอด ที่อุณหภูมิห้อง.....	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
79 แสดงคุณลักษณะของกระแส กับแรงดันของขอตติ๊กไดโอด ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	88
80 แสดงคุณลักษณะของกระแส กับแรงดันของขอตติ๊กไดโอด ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	88
81 แสดงคุณลักษณะของกระแส กับแรงดันของขอตติ๊กไดโอด ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	88
82 แสดงแถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำ ที่แยกกันอยู่.....	89
83 แสดงแถบพลังงานของอลูมิเนียมและฟิล์มเพชรชนิดพี ที่นำมาเชื่อมต่อกัน.....	90
84 แสดงคุณลักษณะของกระแส กับแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ในฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้น 10 ppm.....	93
85 แสดงคุณลักษณะของกระแส กับแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ในฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้น 100 ppm.....	94
86 แสดงคุณลักษณะของกระแส กับแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ในฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้น 1000 ppm.....	95
87 แสดงคุณลักษณะของกระแส กับแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน... ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ในฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้น 10000 ppm...	96
88 แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ที่อุณหภูมิห้อง.....	97
89 แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	98
90 แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	99
91 แสดงลักษณะโครงสร้างของไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันระหว่างฟิล์มเพชรกับ ซิลิกอน จากภาพถ่าย SEM.....	100
92 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นที่แยกกันอยู่.....	101
93 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดพี กับซิลิกอนชนิดเอ็น ที่สภาวะ สมดุลย์.....	102
94 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก.....	113
95 แสดงระบบการวัดการเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์ด้วย Diffractometer เครื่องเล็ก TELTRON ขนาด 30 KV	114
96 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM-5200.....	115

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
B/C	อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน	ppm
$^{\circ}\text{C}$	อุณหภูมิ	เซลเซียส
d	ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม	อังสตรอม
E_F	ระดับพลังงานเฟอร์มิ	eV
E_C	แถบความนำ	eV
E_V	แถบวาเลนซ์	eV
E_{fm}	ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ	eV
E_{fs}	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ	eV
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน	eV
E_a	พลังงานกระตุ้น	eV
h	ค่าคงที่ของพลังค์	J-S
I	กระแส	A
I_s	กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ	A
$J_{M \rightarrow S}$	ความหนาแน่นของกระแสโฮลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ	A/cm^2
$J_{S \rightarrow M}$	ความหนาแน่นของกระแสโฮลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ	A/cm^2
K	ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์	$\text{eV}/^{\circ}\text{K}$
N_V	จำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์	
P_p	จำนวนอะตอมสารเจือผู้รับ	
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	C
R	ความต้านทาน	โอห์ม
t	เวลา	นาที่
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์	K
V	แรงดัน	V
V_B	กัมพางค์กัณฑ์ที่รอยต่อขณะสมดุลย์	V

สัญลักษณ์ (ต่อ)

V_{bi}	แรงดันภายใน	V
V_T	แรงดันในการเปิด	V
V_Z	แรงดันพังทลายซีเนอร์	V
θ	มุม	rad
ϕ_m	ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ	V
ϕ_s	ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ	V
ϕ_c	ค่าฟังก์ชันงานของเพชร	V
ϵ	สนามไฟฟ้า	V/cm
χ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี	eV
λ	ความยาวคลื่น	อัมมสตรอง
μ_n	ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน	cm ² /V-S
μ_p	ค่าความคล่องตัวของโฮล	cm ² /V-S

ศัพท์เทคนิค

กราไฟท์	graphite
การเลี้ยวเบน	diffraction
การขัด	abrasive
การเคลือบ	coating
การสังเคราะห์แบบช็อกเวฟ	shockwave synthesis
การเติมอะตอม	doping
แกลเลียม	gallium
กระแสรั่วไหล	leakage current
กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ	reverse saturation current
ของเหลว	liquid
เข็มร้อน	hot point probe
คาร์บอน	carbon
คาร์บอนที่เหมือนเพชร	diamond like carbon
ความดันสูง	high pressure
คลื่นไมโครเวฟ	microwave
คาร์บอนไดออกไซด์	carbondioxide
ค่าคงที่แลตทิส	lattice constant
ค่าศักย์อิเล็กโตรสตาติก	electrostatic potential
ฉนวน	insulator
ขอตติกไดโอด	schottky diode
ชนิดพี	p-type
ชนิดเอ็น	n-type
ช่องว่างแถบพลังงาน	energy gap
ซินเตอร์	sinter
ฐานรอง	substrate

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

แถบความนำ	conduction band
แถบวาเลนซ์	valence band
แถบพลังงาน	energy band
ไดโอด	diode
ไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน	heterojunction diode
ตัวนำ	conductor
เตาอิเล็กทรอนิกส์โครตรอน	electron cyclotron resonance
ทังสแตน	tungsten
แท่งกวนแม่เหล็ก	magnetic stirring
ทรานซิสเตอร์	transister
นิเกิล	nickle
ไนโตรเจน	nitrogen
แมคเวอร์ดไดโอด	backward diode
โบรอนไตรออกไซด์	borontrioxide
บรรยากาศ	atmosphere
แบตเตอรี่	battery
เปลวไฟ	combustion
เพชร	diamond
ผลึกเพชร	diamond crystal
พันธะ	bond
พลาสมา	plasma
พาหะส่วนน้อย	minority carrier
พาหะส่วนมาก	majority carrier
พลังงาน	energy
พลังงานกระตุ้น	activation energy
ฟอสฟอรัสเพนตระออกไซด์	phosphorus pentaoxide

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ฟังก์ชันงาน	work function
ฟิล์มเพชร	diamond film
มิเตอร์วัดการไหลของก๊าซ	flow meter
รูปทรงสี่เหลี่ยม	tetrahedron
รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์	cubic
รูปทรงหกเหลี่ยม	hexahedron
รูปทรงแปดเหลี่ยม	octahedron
รูปทรงสิบสองเหลี่ยม	dodecahedron
รูปทรงสี่เหลี่ยมขนมเบี่ยงป้อน	rhombohedral
ระนาบ	plane
รังสีเอ็กซ์	X - ray
รอยสัมผัสโอห์มมิก	ohmic contact
เรกติไฟร์	rectifier
รอยต่อชอตต์กี	schottky junction
แรงดันในการเปิด	turn on voltage
แรงดันพังทลาย	breakdown voltage
แรงดันพังทลายซีเนอร์	zener breakddown voltage
แรงดันพังทลายอะวาลานซ์	avalance breakdown voltage
ลัดวงจร	short circuit
วงจรเปิด	open circuit
ไส้หลอด	filament
สภาวะแน่นอน	metastable
สารเจือผู้รับ	acceptor
สารเจือผู้ให้	donor
เส้นผ่าศูนย์กลาง	diameter
สารเจือ	impurity

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

สวิตช์ที่ปิด	close switch
สองขั้ว	two point probe
หลอดทดลอง	chamber
อุณหภูมิสูง	high temperature
ออกซิเจน	oxygen
เอทิลแอลกอฮอล์	ethyl alcohol
อินทรินซิก	intrinsic
อิเล็กตรอน	electron
แอนติโมนี	antimony
อินเดียม	indium
อิเล็กตรอนชั้นนอก	valence electron
ศูนย์กักการแตรบปีง	trapping center
โฮล	hole
ไฮโดรเจน	hydrogen



คำนำ

การนำเพชรมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นสิ่งที่เพิ่งจะเริ่มมีการศึกษา อาจกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีของเพชร คือ เทคโนโลยีสำหรับอนาคต นั่นคือ ในอนาคตไม่ช้านี้สารกึ่งตัวนำเพชรจะต้องมีบทบาทถูกนำมาใช้แทนที่เทคโนโลยีเดิม คือ จำพวกซิลิกอนหรือสารประกอบแกเลียมอาร์เซไนต์อย่างแน่นอน ซึ่งมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติที่เด่นต่าง ๆ ของเพชร เช่น มีช่องว่างแถบพลังงานมาก (5.5 eV ที่อุณหภูมิห้อง) มีค่าความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลสูง เหล่านี้เป็นต้น สารกึ่งตัวนำเพชรจึงเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้งานสภาวะต่าง ๆ เช่น งานที่ต้องใช้ความเร็วสูง กำลังสูง และ อุณหภูมิสูง ซึ่งสภาวะเหล่านี้เทคโนโลยีเดิมไม่สามารถทำงานได้

หลังจากประสบความสำเร็จในการสร้างฟิล์มเพชร มาก่อนหน้านี้แล้ว จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาการสร้างฟิล์มบางเพชรต่อเพื่อปรับปรุงให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพ มีอัตราการผลิตฟิล์มเพชรที่ค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอ ตลอดจนนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเริ่มศึกษาพัฒนาเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำไดโอด เดิมที่ตั้งใจจะสร้างไดโอดที่มีโครงสร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี กับ ฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น แต่ภายหลังประสบปัญหาเกี่ยวกับฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น ซึ่งไม่สามารถวัดค่าความนำไฟฟ้า ชนิดเอ็นได้ (การศึกษาหาสาเหตุอยู่ในบทที่ 4 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้) จึงได้เกิดแนวความคิดใหม่ คือ ทำการสร้างไดโอดชนิดที่มีรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน โครงสร้าง ฟิล์มเพชร ชนิดพีกับซิลิกอน ชนิดเอ็น ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า ต่อมาพบว่า สามารถสร้างไดโอดโครงสร้างนี้ได้แต่คุณลักษณะทางไฟฟ้า จะแสดงคุณลักษณะเหมือนคุณลักษณะของแบบเวอร์ดไดโอด ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุได้ดังรายละเอียดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คำนำ (ต่อ)

สำหรับรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสรุปเป็นบท โดยกำหนดเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา การสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง รวมถึงเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างเพชรที่ความดันต่ำในปัจจุบัน สุดท้ายเป็นการกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งาน

บทที่ 2 บทนี้เกี่ยวข้องกับทฤษฎีที่ใช้ทั้งหมด เริ่มตั้งแต่ เพชรธรรมชาติ สมดุลยภาพของคาร์บอน คุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชรเทียบกับสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ หลักการสังเคราะห์ฟิล์ม เพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน กล่าวถึงระดับพลังงาน สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น และ พี รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ สุดท้ายกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำไดโอด

บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการสร้าง เริ่มตั้งแต่การเตรียมแผ่นฐานรอง การสร้างฟิล์มเพชรทั้งสามชนิด ได้แก่ การสร้างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ชนิดพีและชนิดเอ็น กระบวนการเตรียม ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาผลของก๊าซในอากาศที่มีต่อการเกิดชั้นพื้นผิวหน้าไฟฟ้าของ ฟิล์มเพชร ชนิดพี การวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Scanning Electron microscopy (SEM) ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการใช้เครื่อง SEM กล่าวถึงกระบวนการสร้าง สร้างไดโอดโครงสร้างโลหะกับฟิล์มเพชร และ กระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันโครงสร้าง ฟิล์มเพชร ชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น

บทที่ 4 เป็นบทที่กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองรวมถึงวิเคราะห์ผลการทดลอง - เริ่มจากกล่าวถึงการศึกษาฟิล์มเพชรวิธีต่าง ๆ การศึกษาผลของก๊าซในอากาศที่มีต่อการเกิด ชั้นพื้นผิวหน้าไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ซึ่งเป็นการหาเหตุผลของการที่ไม่สามารถวัดค่าความนำไฟฟ้า ชนิดเอ็นของฟิล์มเพชร สุดท้ายเป็น การศึกษาคุณสมบัติของไดโอด แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ระหว่างฟิล์มเพชร ชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งจะสรุปและวิจารณ์งานวิจัยทั้งหมดได้ในบทที่ 5

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

เป็นที่ทราบกันดีว่า เพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สุด และมีความยืดหยุ่นน้อยที่สุด เป็นตัวนำความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น และมีความโปร่งแสงที่สุดเมื่อเพชรปราศจากรอยตำหนิและสารเจือ จากตัวอย่างคุณสมบัติของเพชรเหล่านี้ บรรดานักวิจัยได้สนใจนำคุณสมบัติที่สุดยอดของเพชรพัฒนาเป็นเทคโนโลยีที่เป็นประโยชน์ ซึ่งเรื่องราวต่าง ๆ เกี่ยวกับการสร้างเพชรและการนำเพชรมาประยุกต์ใช้งาน สามารถลำดับเหตุการณ์โดยย่อ ดังนี้

ราวศตวรรษที่ 18 Antoine Laurent Lavoisier ได้ค้นพบเพชรเป็นรูปผลึกของคาร์บอน นักทดลองได้พยายามสังเคราะห์เพชรขึ้น ซึ่งผู้ประสบความสำเร็จเป็นคนแรก คือ William G. Eversole แห่ง Union Carbide

ในปี 1952 ได้มีการสร้างเมล็ดผลึกเพชร จาก คาร์บอนโมนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดันปานกลาง ความพยายามในตอนต้น ๆ ส่วนใหญ่ มุ่งประเด็นที่กระบวนการสร้างที่ความดันสูง

ในปี 1953 กลุ่มชาวสวีเดน ที่ Allmanna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) ได้สังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง แต่ไม่มีการบันทึกไว้ว่าพวกเขาค้นพบด้วยวิธีการอย่างไร

ในปี 1955 General Electric ได้ประกาศความสำเร็จในการสร้างเพชรที่ความดันสูง ซึ่งกระบวนการสร้างเพชรที่ความดันสูงต้องการเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีราคาแพงมากและมีใช้เฉพาะ ในด้านอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มาก ๆ เพชรที่สร้างได้มีผลผลิตประมาณ 100 ตันต่อปี ระหว่างเวลาที่เทคนิคการสร้างเพชรที่ความดันสูง ได้ถูกพัฒนา นักวิจัยหลายคน ได้สนใจการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำซึ่งเหมือนกับการเปลี่ยนธาตุตะกั่วไปเป็นทองคำ

ในปี 1956 Boris V. Spitsyn นักศึกษาที่สถาบันเคมี ฟิสิกส์ โนมอสโคว ได้สังเคราะห์เพชร โดยการสลายตัวของคาร์บอนเตตระไฮโดรไดด์บนเมล็ดผลึกเพชร แต่โครงการเหล่านี้ไม่มีการตีพิมพ์

ในปี 1965 Angus ได้เริ่มงานที่ Case Western Reserve University จุดประสงค์ของการวิจัยคือการสร้างเพชรที่ความดันต่ำให้ได้ Angus และเพื่อนร่วมงาน ได้ใช้อะตอมไฮโดรเจนในตอนแรก

พวกเขาได้สร้างเพชรและกราไฟท์ได้พ่นก๊าซไฮโดรเจนที่พื้นผิวเพื่อสกัดการเกิดกราไฟท์ และต่อมาได้สังเคราะห์ทั้งเพชรและกราไฟท์ โดยพวกเขาได้นำเสนอวิธีการ ในการประชุมที่ Kiev ในปี 1971 ว่าสามารถใช้ได้ตลอดทั้งสแตมเพื่อแยกโมเลกุลไฮโดรเจน

ระหว่างปี 1981 ถึง 1983 กลุ่มชาวญี่ปุ่นที่ National Institute for Research in Inorganic Materials (NIRIM) ใน Tsukuba-shi ได้เปิดเผยวิธีสำหรับการสร้างฟิล์มเพชรอย่างรวดเร็ว ที่ความดันต่ำ Nobuo Setaka , Yoichiro Sato , Seiichiro Matsumoto และ Mutsukazu Kamo และผู้ร่วมงานได้ใช้ได้ตลอดทั้งสแตมและ microwave discharges เพื่อกำเนิดอะตอมไฮโดรเจนที่ต้องการในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เทคนิคเหล่านี้ยังเป็นที่นิยม นอกจากนี้เทคนิคการใช้กระแสตรง และ discharge ก็ยังถูกนำมาใช้ Yoichi Hirose แห่ง Nippon Institute of technology ได้สร้างเพชรจากเปลวไฟ (Fuel-rich oxyacetylene torch) เปลวไฟทำให้เกิดทั้ง อะตอมไฮโดรเจน และ ไฮโดรคาร์บอน น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งรวมตัวกันเกิดเป็นเพชร

ภายหลังที่ญี่ปุ่นได้พัฒนาก้าวหน้าไปมาก ทางอเมริกาและยุโรป ก็ได้เริ่มกลับมาสนใจอย่างจริงจังอีกครั้ง โดยในปัจจุบันมีการศึกษาและวิจัยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ต่างๆทั่วโลก รวมถึงที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นอกจากนี้ความสามารถในการสร้างฟิล์มเพชรได้เปิดกว้างไปถึงการสร้างเพชรบนฐานรองสารกึ่งตัวนำ ได้มีจุดมุ่งหมายนำฟิล์มเพชรมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ไดโอด และ ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

1.2 การสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง

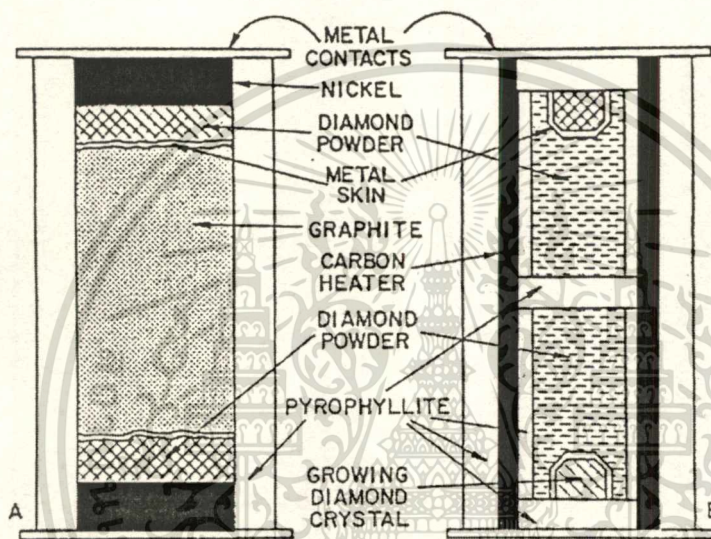
ความก้าวหน้าในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูง ได้เริ่มอย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1955 ที่ห้องวิจัยของ General Electric (GE) เมื่อ Bundy และผู้ร่วมทำการวิจัย ได้ประสบผลสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรที่สามารถผลิตเพชรซ้ำได้ (แต่เดิม การอ้างถึงการสังเคราะห์เพชรส่วนใหญ่จะไม่สามารถสังเคราะห์ซ้ำได้และถูกพิสูจน์ว่าไม่เป็นความจริงในเวลาต่อมา) ที่มันงานได้พัฒนาเครื่องมือความดันสูงและอธิบายกระบวนการที่ซึ่งคาร์บอนรูปแบบธรรมชาติ สามารถเปลี่ยนไปเป็นเพชร

วิธีการสร้างเริ่มจากสารละลายที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง คาร์บอน (ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกราไฟท์) กับ โลหะ เช่น นิเกิล เหล็ก โคบอลต์ แมงกานีส พาราเดียม และ แพลททินัม กราไฟท์จะถูกบรรจุในหลอด pyrophyllite มีโลหะปิดหัวท้าย ดังแสดงในรูป 1 ต่อมาทำการเพิ่มความดันประมาณ 1 ล้านปอนด์ต่อตารางนิ้ว ใช้กระแสไฟฟ้าผ่านจากลูกสูบของเครื่องกดอัด ไปยังโลหะที่ส่วนปลายและกราไฟท์ จนถึงลูกสูบอีกด้านหนึ่ง เมื่อกราไฟท์มีความต้านทานทางไฟฟ้าถึงจุดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุด ความร้อนจะสูงขึ้นในทางเดินกระแส กระแสจะถูกปรับจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ คือประมาณ 1800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะนี้โลหะ เช่น นิเกิล จะหลอมละลาย กราไฟท์เริ่มก่อตัวเป็นผลึกเพชร ฟิล์มโลหะแยกกราฟท์จากเพชร อาจจะมีขนาดหนาน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร และคาร์บอนจะถูกขจัดจากโลหะอย่างรวดเร็ว ในเวลาเพียง 2-3 วินาที กราไฟท์ทั้งที่จะเปลี่ยนเป็นเพชร ในขณะที่นิเกิลจะไหลจากปลายทั้งสองด้านของเครื่องมือไปยัง Hotter center

รูปที่ 1



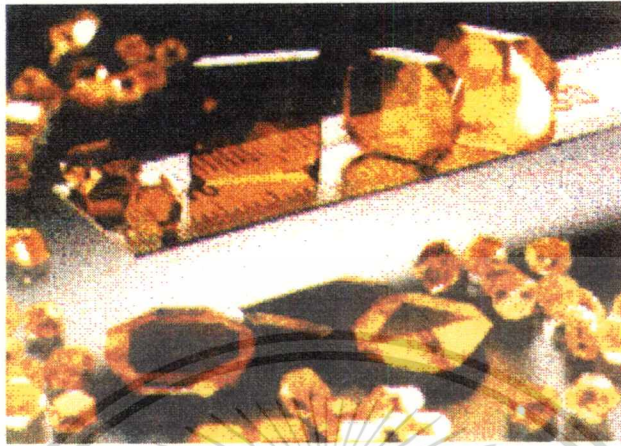
แสดงเครื่องมือความดันสูงที่ใช้ในการสร้าง (a) เกิดเพชร (b) ผลึกเพชรเดี่ยว

ถ้าความดันถูกปล่อยในเวลานี้ เพชรจะเปลี่ยนกลับไปเป็นกราฟท์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจะไม่ปล่อยความดันจนกว่าจะทำการปิดกระแสไฟฟ้าและขึ้นทดลอง (ผลึกเพชร) เย็นตัวลงเสียก่อน ขนาดของเพชรที่ได้จะขึ้นกับสภาวะในการทดลอง เช่น ชนิดของโลหะที่เลือกใช้ รูปแบบกราฟท์ อุณหภูมิ ความดัน และเวลา

ส่วนรูปร่างของผลึกขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งรายงานพบว่ารูปร่างจะเปลี่ยนจาก cubic (100) ที่ 1300 องศาเซลเซียส ไปเป็นรูปร่างผลสมระหว่าง cubic และ octahedral ที่ 1400 - 1500 องศาเซลเซียส เป็นรูปร่าง octahedral (111) ที่ 1600 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3

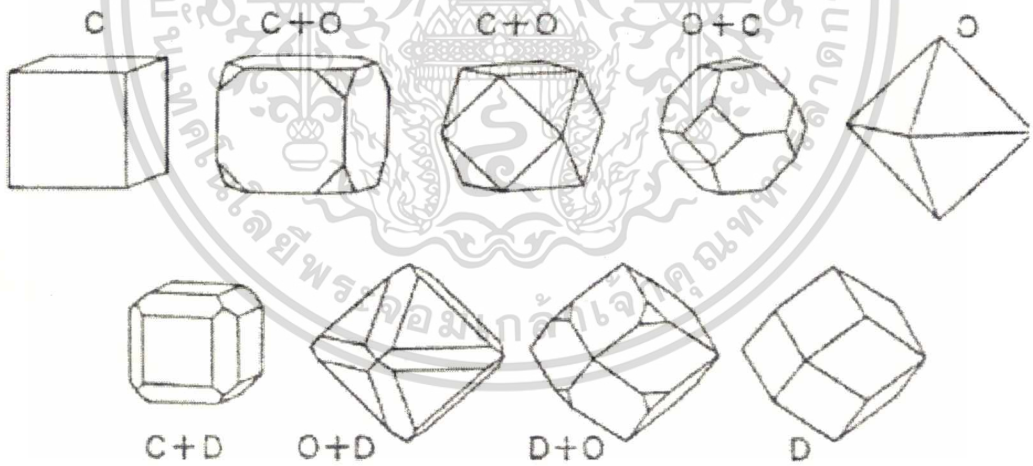
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2



แสดงผลึกเพชรที่สังเคราะห์ได้ที่มีความดันสูง

รูปที่ 3



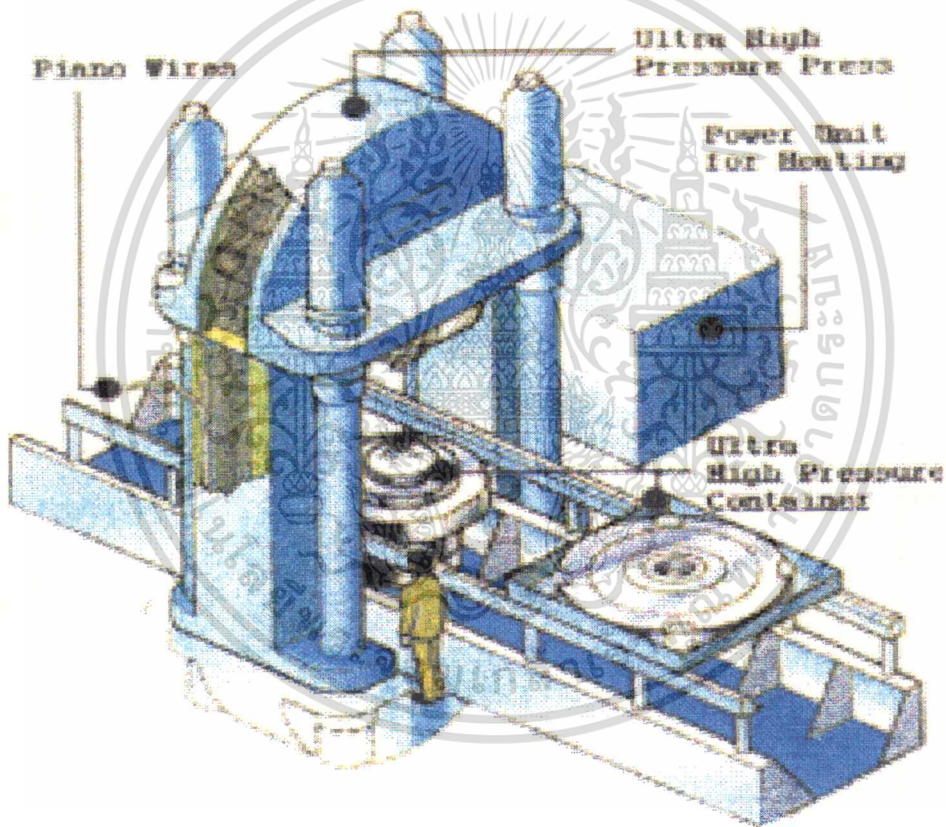
แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเพชรที่สร้างที่ความดันสูง

(C = cube , D = dodecahedron , O = octahedron)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอุณหภูมิที่เพิ่มจะอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดไว้ที่ 900,000 psi นอกจากนี้ยังอาจพบรูปร่าง rhombohedral (100) โดยจะพบที่สภาวะบริเวณแคบๆ ใกล้กับเส้นแบ่งเพชรและกราไฟท์ ในรูปที่ 15 นอกจากนี้วิธีการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูงโดยใช้วิธีโลหะทรานสิชันหลอมมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ในปัจจุบันยังมีการสังเคราะห์เพชรที่อุณหภูมิและความดันสูงโดยตรง โดยไม่ต้องใช้โลหะมาเป็นตัวช่วย ดังรูปที่ 4 และวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ความดันสูงแต่ใช้อุณหภูมิต่ำ ที่เรียกว่า shock wave technique

รูปที่ 4



แสดงเครื่องสังเคราะห์เพชรแบบอุณหภูมิและความดันสูง โดยตรง ของ National Institute for Research Materials (NIRIM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เทคโนโลยีต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ ในปัจจุบัน

ในปัจจุบันนี้ มีการสนใจฟิล์มเพชรที่สร้างจากระบบ CVD เป็นอย่างมากทั้งในการที่จะขยายขนาดและทำการค้า ไม่เพียงเพราะว่าอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูกกว่า ต้นทุนการปฏิบัติงานต่ำ และเพชรที่สังเคราะห์ได้ยังมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกรวมเข้าไว้ในเทคนิคการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ และที่สำคัญมากกว่านั้นเพราะว่า ความผสมผสานคุณสมบัติที่ไม่เหมือนใครของเพชรควบคู่ไปกับความสามารถใหม่ที่จะทำให้เกิดรูปแบบฟิล์มบางบนวัสดุที่หลากหลาย เป็นการประกาศศักราชใหม่ในเทคโนโลยีของเพชร และเปิดโอกาสมากขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่มีศักยภาพ โดยวิธีการแบบเดิมคือ วิธีความดันและอุณหภูมิสูง เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่จากคุณสมบัติของเพชร เช่นการเคลือบวัสดุอื่นๆ ที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน ด้วยฟิล์มเพชร เป็นต้น

ถึงแม้ว่า เพชรที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นรวมถึงเพชรธรรมชาติ โดยปกติจะจัดตัวภายใต้เงื่อนไขของความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งก็ไม่ได้หมายความว่า การเกิดผลึกเพชรไม่สามารถเกิดที่ ความดันและอุณหภูมิต่ำกว่า ในระยะแรก ได้มีข้อบ่งชี้ว่า เพชรสามารถที่จะก่อตัวภายใต้เงื่อนไขที่ซึ่งกราฟไฟท์และสิ่งที่ไม่ใช่เพชร เป็นสถานะคาร์บอนที่เสถียร ความเป็นไปได้ของการก่อตัว เป็นผลึกเพชรในข้อกำหนดของ ความดันและอุณหภูมิ ซึ่งเพชรที่ไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกเมื่อเทียบกับกราฟไฟท์ นั่นคือ ที่ความดันต่ำกว่าหนึ่งบรรยากาศ และอุณหภูมิต่ำกว่า 1373 เคลวิน สามารถเกิดเพชรได้เนื่องจาก การรวมกันของปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิก จลนศาสตร์ และทางเคมี การสร้างเพชรที่มีความสมดุลย์ทางความร้อน จะใช้วิธีการสังเคราะห์จากสถานะก๊าซ ซึ่งเป็นก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามอะตอมของไฮโดรเจนก็มีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์เพชร เพราะเป็นตัวแยกกราฟไฟท์ออกไป แต่ไม่แยกเพชรออก ดังนั้นอะตอมของไฮโดรเจนมีความสำคัญมากต่อการสร้างเพชรที่ความดันต่ำ

ความก้าวหน้าในการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำ โดยส่วนใหญ่เป็นผลงานของนักวิจัยชาวโซเวียต ในปลายทศวรรษที่ 1970 และต้นทศวรรษที่ 1980 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า เทคนิคการกระตุ้นในสถานะที่เป็นก๊าซสามารถที่จะเพิ่มอัตราการเกิดเพชรได้อย่างมาก ในขณะที่ยับยั้งการตกลงมาของกราฟไฟท์ ซึ่ง NIRIM ในญี่ปุ่น ได้ทำการวิจัยมาโดยตลอด การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำมีอยู่หลายวิธี วิธีที่เป็นที่นิยมในการนำมาสังเคราะห์ฟิล์ม มีอยู่ 5 วิธีด้วยกันคือ

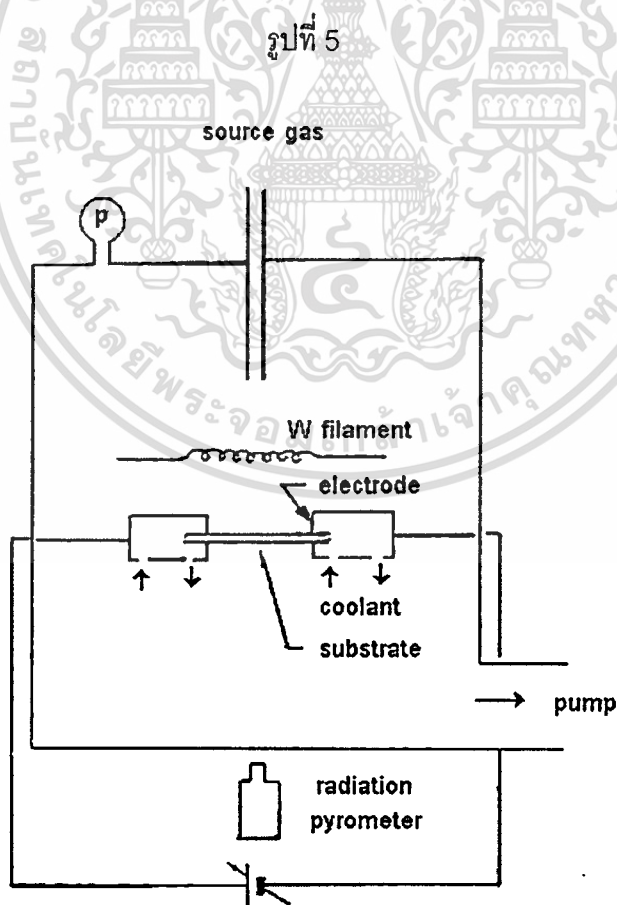
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การสร้างด้วยวิธีใช้ความร้อนจากไส้หลอด (Hot filament activation)
2. การสร้างด้วยวิธีใช้พลาสมา (Plasma activation)
3. การสร้างด้วยวิธี Electron cyclotron resonance
4. การสร้างด้วยวิธี Plasma torch
5. การสร้างด้วยวิธี เปลวไฟ (Combustion activation)

ซึ่งต่อไปนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดทั้งข้อดีและข้อเสียของวิธีการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

1.3.1 การสร้างด้วยวิธี Hot filament activation

วิธีนี้เป็นวิธีที่สร้างได้ง่าย ไม่แพง และสามารถสร้างฟิล์มให้มีพื้นที่ครอบคลุมฐานรองขนาดใหญ่ได้ ชุดเครื่องมือจะประกอบด้วยก๊าซจากแหล่งจ่ายไหลผ่านไส้หลอดที่ทำจากทังสเตน (หรือ อาจจะเป็นพวก แทนทาลัม โมลิบดีนัม เรเนียม) ไปยังฐานรองที่จะทำให้เกิดฟิล์มเพชรบนบริเวณนี้ ดังแสดงในรูปที่ 5



แสดงไดอะแกรมของระบบที่ใช้วิธี Hot filament activation

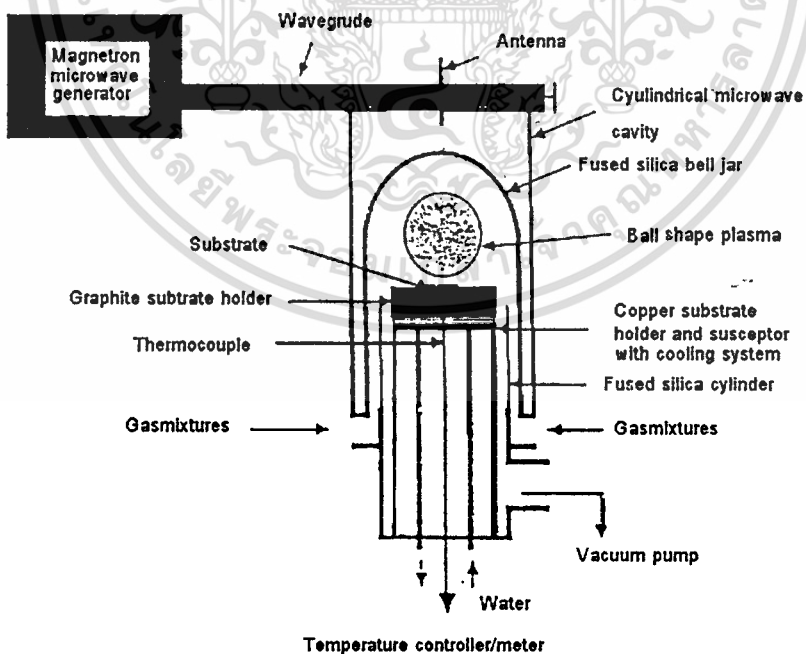
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไส้หลอดถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 2000 เซลเซียส เพื่อให้ไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนที่ผสมกันอยู่แตกตัวออกจากกัน ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรองมีค่าประมาณ 1 เซนติเมตร ฐานรองมีอุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 1000 เซลเซียส ผลจากการกระตุ้นด้วยความร้อนทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอน เกิดการแพร่และทำปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณผิวฐานรอง ส่วนความหนาของฟิล์มขึ้นกับเวลาที่ใช้ ข้อดีของระบบนี้ คือ สามารถสร้างฟิล์มเพชรให้มีขนาดพื้นที่ใหญ่ได้ และค่าใช้จ่ายมีค่าต่ำ การเกิดฟิล์มที่สม่ำเสมอเป็นพื้นที่ใหญ่ จะเป็นไปได้ เพราะว่า ก๊าซเฟสจะเกิดที่ไส้หลอด ซึ่งวิธีอื่นจะให้ความร้อนเป็นบริเวณจุด อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบนี้ จะอยู่ที่ไส้หลอดที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จะเกิดการเปราะและผิกรูปไป ซึ่งเป็นผลจากการก่อตัวของคาร์โบไชนบนไส้หลอด

1.3.2 การสร้างด้วยวิธี Plasma activation

วิธีการนี้จะใช้ความถี่ในการส่งเคราะห์เพชร ขนาด 2.45 GHz , 915 GHz และ 13.56 MHz ซึ่งไดอะแกรมของระบบที่ใช้ การสร้างเพชรด้วยวิธีนี้จะแสดงในรูป 6

รูปที่ 6



แสดงไดอะแกรมของระบบ microwave plasma activation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

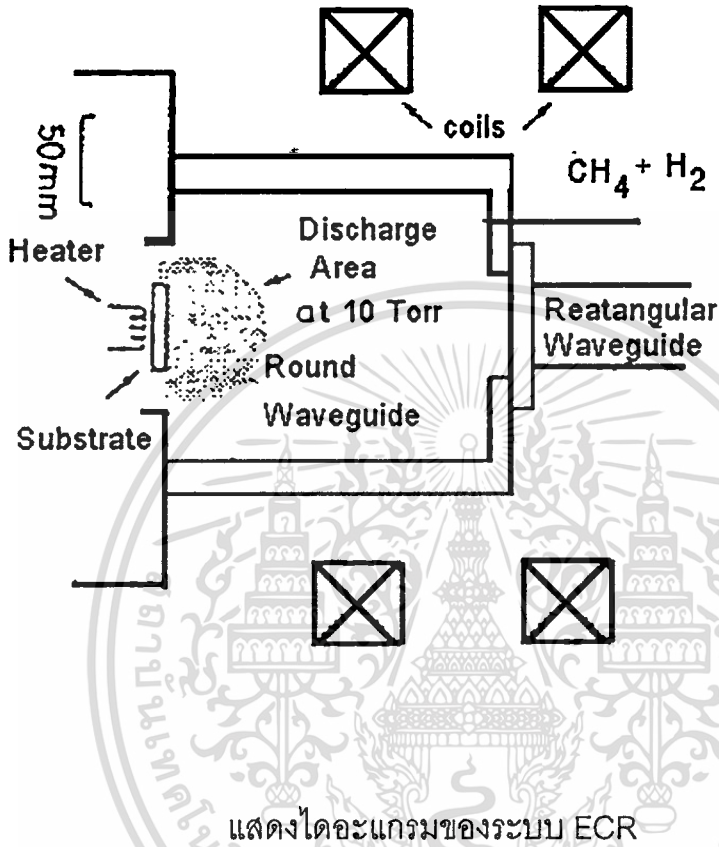
พลังงานไมโครเวฟจะถูกปล่อยไปยังท่อแก้วผ่านไปยังพื้นผิวของฐานรอง ซึ่งเพชรจะถูกเคลือบลงบนฐานรองที่เป็นขั้วไฟฟ้าละลายอยู่ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกับวิธี Hot filament คือที่ความดัน 40 - 100 ทอร์ อุณหภูมิฐานรอง 800 - 1000 เซลเซียส และความเข้มข้นของมีเทน 0.2 - 5 % ในบรรยากาศของไฮโดรเจน อัตราการเคลือบประมาณ 1-5 ไมครอน / ชั่วโมง ฐานรองถูกทำให้ร้อนโดยพลาสมาและการแผ่รังสี ข้อดีของระบบนี้ คือ การที่ไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรอง จึงทำให้สะดวก สร้างเพชรได้พื้นที่ใหญ่ และการเคลือบจะราบเรียบสม่ำเสมอ มีความสมดุลย์ของพลาสมา เนื่องจากไม่มีปฏิกิริยากับผนัง

สำหรับระบบ RF plasma เป็นวิธีหนึ่งที่น่าไปใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเช่นกัน ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะได้ขนาดผลึกที่ไม่ใหญ่เท่าวิธี microwave plasma ก็ตาม แต่ระบบทั้งสองใช้ความถี่อยู่ในช่วง 100 Hz และ 13.5 MHz โดยเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มเหมือนกับของ microwave plasma มีอัตราการเกิด 0.5 - 3.0 ไมครอน / ชั่วโมง

1.3.3 การสร้างด้วยวิธี Electron Cyclotron Resonance (ECR)

Kawarada ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ขึ้น ดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็น magneto microwave plasma โดย Helmholtz type coil จะวางอยู่รอบ cylindrical waveguide และใช้การกระจายของสนามแม่เหล็ก ในการครอบคลุมพื้นที่ของการเคลือบฟิล์ม โดยทำการจ่ายสนามแม่เหล็กขนาด 875 G ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อ Electron Resonance ความถี่ของ electron gyration มีค่าเท่ากับไมโครเวฟขนาด 2.45 GHz ข้อได้เปรียบของ ECR คือ ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีความสม่ำเสมอ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลาสมากับพื้นที่จะสูง และใช้อุณหภูมิในการสร้างต่ำ ประมาณ 500 เซลเซียส ที่ความดัน 0.1 ทอร์

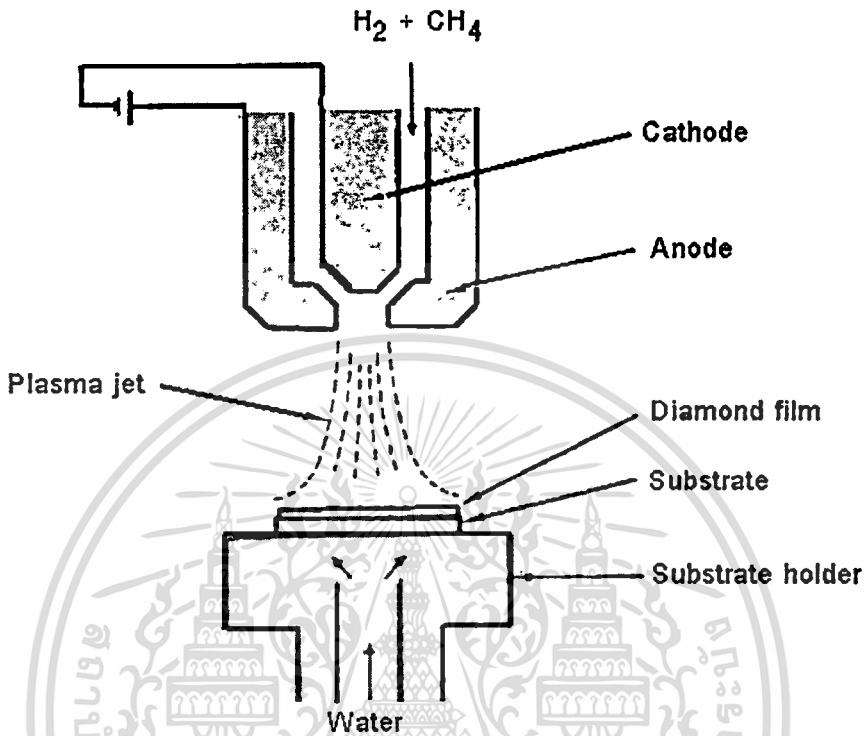
รูปที่ 7



1.3.4 การสร้างด้วยวิธี Plasma torch

Kurihara ได้แนะนำวิธีการของ dc plasma jet ที่มีลักษณะดังรูปที่ 8 เรียกว่า DIA-JET ลักษณะคล้ายวิธีการ RF plasma torch โดย thermal plasma จะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิของก๊าซ มีค่ามากกว่า 400 เซลเซียส ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากการ arc charge ระหว่างอิเล็กโทรดทรงกระบอกคู่หนึ่ง ทำให้เกิดการกระจายออกอย่างรวดเร็วไปยังฐานรอง ผ่านหัวฉีดที่มีความยาวประมาณ 5-10 เซนติเมตร ซึ่งขึ้นกับความดัน ฐานรองวางใน

รูปที่ 8

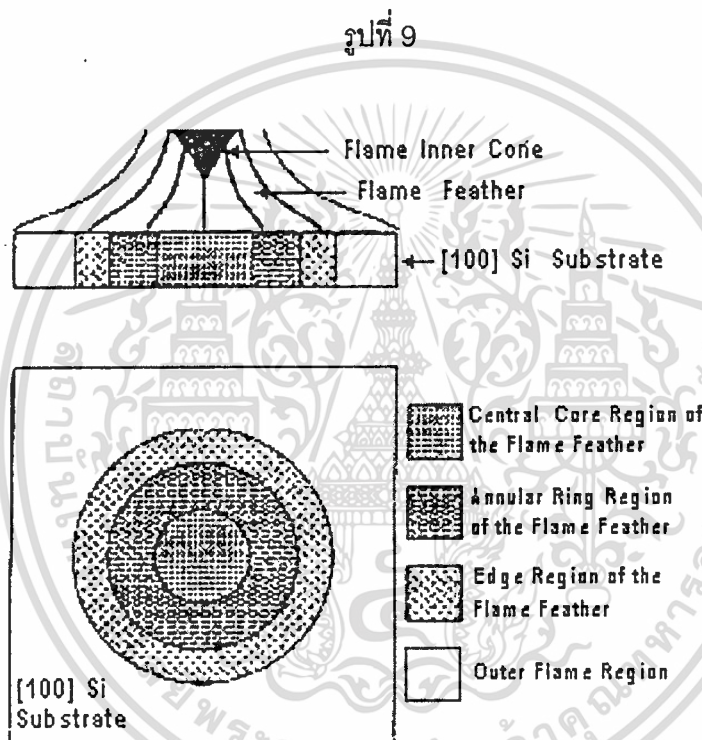


แสดงโตอะแกมการสร้างวิธี DC arc jet

หัวฉีดห่างจากอานอดประมาณ 1-2 เซนติเมตร และต้องหล่อเย็นเสมอ วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า RF plasma torch โดยจะได้ฟิล์มที่มีคุณภาพ และมีอัตราการเกิดสูงประมาณ 80 ไมครอน / ชั่วโมง ได้มีการรายงานว่าสามารถสร้างฟิล์มได้ถึง 930 ไมครอน / ชั่วโมง โดยใช้วิธี atmosphere dc arc discharge plasma jet ซึ่งสามารถสร้างฟิล์มให้มีความหนาถึง 10 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของวิธีการนี้ที่มีอัตราการเคลือบฟิล์มสูง แต่ก็มีปัญหาเกี่ยวกับความไม่สมบูรณ์ของฟิล์ม พื้นที่ในการสร้างน้อย (เส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 10 มิลลิเมตร) และเนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิสูง จึงมีปัญหาในการควบคุมอุณหภูมิ สำหรับการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการสร้างฟิล์มเพชรที่ได้พื้นที่น้อยสามารถปรับปรุงโดยการเลือกรูปร่างของพลาสมา jet

1.3.5 การสร้างด้วยวิธี combustion activation

วิธีการสร้างแบบนี้จะให้เพชรที่มีคุณภาพดีที่สุดและมีอัตราการเกิดสูง (มากกว่า 100 ไมโครเมตร / ชั่วโมง ขึ้นไป) ซึ่ง Prof. Hirose เป็นคนแรกที่ได้เสนอการสร้างด้วยวิธีนี้ การสร้างจะใช้ก๊าซเฟสทำปฏิกิริยา ระหว่าง อะเซทิลีน และ ออกซิเจน จุดเด่นของระบบนี้ คือสามารถสร้างเพชรได้โดยไม่ต้องกระทำการในแชมเบอร์ และสร้างเพชรลงบนฐานรองได้บริเวณที่ต้องการสร้างโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 9

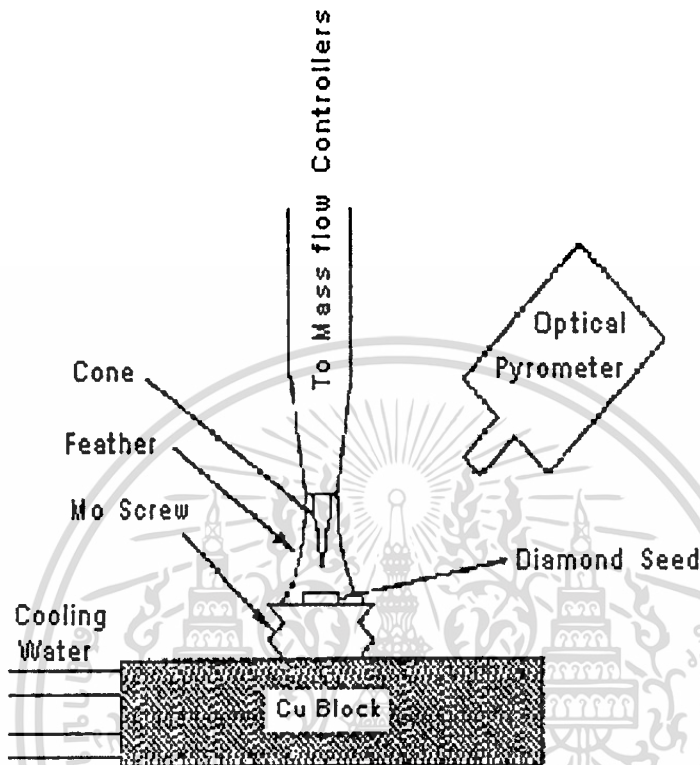


แสดงไดอะแกรมบริเวณที่เกิดฟิล์มเพชรจากเปลวไฟ

ของระบบ Combustion activated CVD

ข้อดีส่วนอื่นของระบบนี้ก็มิ เช่น เป็นระบบที่ใช้ค่าใช้จ่ายไม่แพงมากนัก ก๊าซที่ใช้หาง่าย ผลึกเพชรที่ได้จะมีขนาดใหญ่ เป็นต้น ส่วนข้อเสียของระบบนี้ คือ การเกิดฟิล์มเพชร จะเกิดในบริเวณที่แคบไม่กว้าง (ดังรูปที่ 9) เกิดเป็นเฉพาะจุด ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้วิธีนี้สร้างฟิล์มเพชรที่มีขนาดบริเวณกว้าง แต่จะเหมาะสำหรับสร้างผลึกเพชรมากกว่า

รูปที่ 10



แสดงไดอะแกรมการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion activation

สุดท้ายเราจะเห็นว่ามียุทธวิธีด้วยกันที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำ ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นกับจุดประสงค์ของการใช้งาน นั้นๆ เช่น ถ้าต้องการสร้างฟิล์มที่หนา วิธี plasma torch จะเหมาะสมที่สุด หรือถ้าต้องการสร้างฟิล์มบริเวณกว้าง วิธี Hot filament จะเป็นที่ยอมรับมากที่สุด

1.4 การประยุกต์ใช้งาน

สำหรับการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปใช้งาน นอกเหนือจากการสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชนิดต่างๆแล้ว ยังสามารถนำฟิล์มเพชรไปใช้งานด้านอื่น ๆ อีกหลายด้าน โดยจะพิจารณาถึงคุณสมบัติของเพชร เช่น รายละเอียดในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

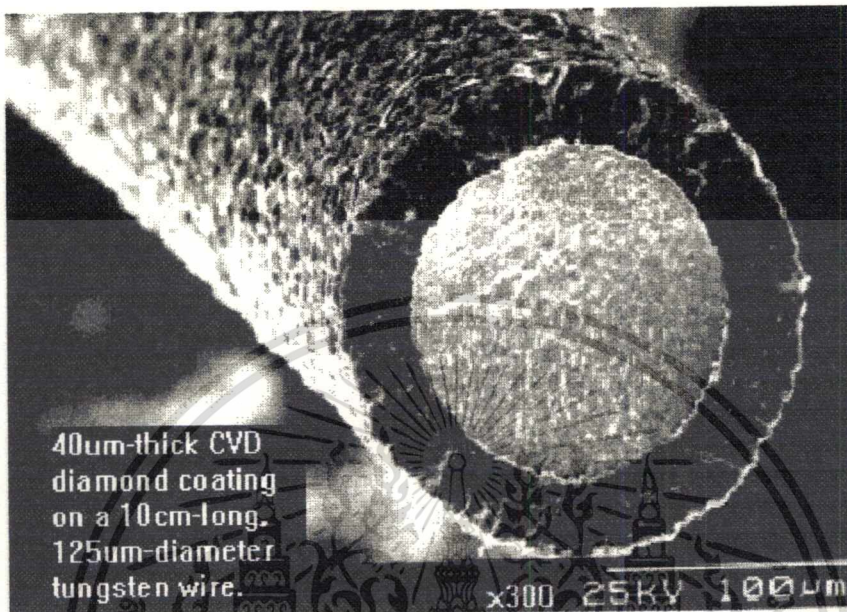
ตารางที่ 1

แสดงตัวอย่างการนำคุณสมบัติของเพชร ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ ในปัจจุบัน

การประยุกต์ใช้งาน	คุณสมบัติของเพชร
อุปกรณ์ที่ใช้ในการขัด (Abrasive) การเคลือบเครื่องมือและชั้นป้องกันการสึกกร่อน	ความแข็ง ความเหนียว ความต้านทานต่อสารเคมี
ไดอะแฟรมลำโพงคุณภาพสูง	โมดูลัสความยืดหยุ่นสูง การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
เกี่ยวกับร่างกายมนุษย์ เช่น ทางวัสดุข้อต่อ ฟัน และ ไบโอะเซนเซอร์	ความเข้ากันได้ทางชีวภาพของคาร์บอน
การเคลือบป้องกันการสึกกร่อน และ เตาปฏิกรณ์ปรมาณู	ความเฉื่อยต่อสารเคมี ความต้านทานต่อสารเคมี
วัสดุกระจายความร้อนในอุดมคติสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ภายในห้องเครื่องยนต์	สภาพนำความร้อนที่สูง
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังสูง เป็นผลให้มีขนาดการรวมของวงจรรวมที่สูง การบรรจุอุปกรณ์ที่แน่นขึ้นโดยปราศจากปัญหาที่เกิดจากความร้อน	ความคล่องตัวของโฮลที่สูง ช่องว่างแถบพลังงานมาก แรงดันพังทลายสูง
โทรทัศน์สีจอแบน	กำเนิดแสงสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นแม่สีทางแสง ที่ใช้ในการผลิตโทรทัศน์

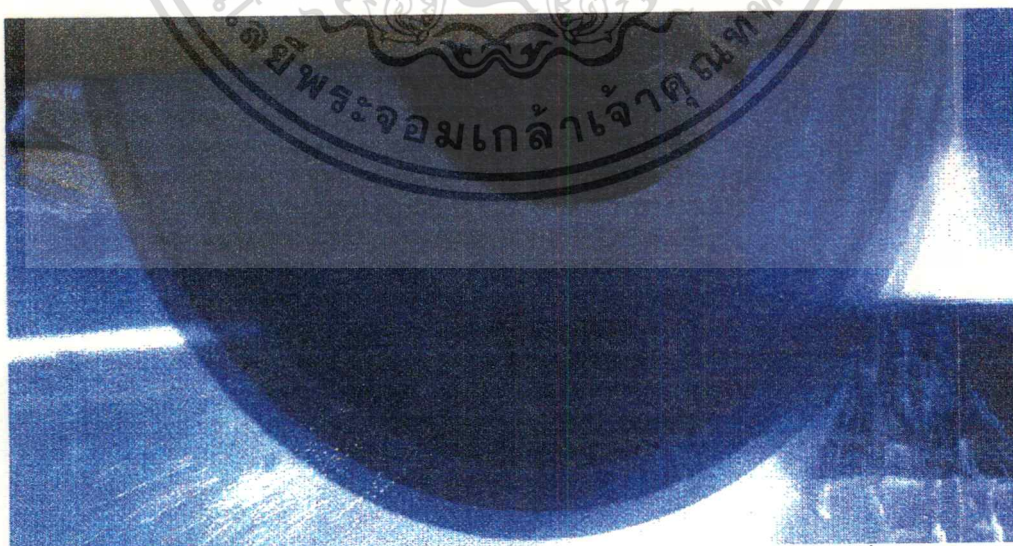
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 11



แสดงการประยุกต์นำฟิล์มเพชรไปใช้งาน เช่น เคลือบเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อป้องกันการสึกกร่อน

รูปที่ 12



แสดงการนำฟิล์มเพชรไปใช้งานโดยการเคลือบกับไบมีดสำหรับตัดวัสดุที่มีความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เพชรธรรมชาติ

ตามธรรมชาติแล้วเพชรจะแบ่งตามชนิดและระดับสารเจือที่พบในตัวมัน โดยสามารถแบ่งเพชรออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด I และ ชนิด II หลังจากนั้นมีการเพิ่มอักษร a หรือ b ต่อท้าย ซึ่งสามารถสรุปชนิดต่างๆ ของเพชรได้ดังนี้

เพชรชนิด Ia เพชรในธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นชนิดนี้ ประกอบด้วยไนโตรเจนมากกว่า 0.3 %

เพชรชนิด Ib จะพบเพชรชนิดนี้ยากมากในธรรมชาติ (ประมาณ 0.1 %) แต่เพชรที่สังเคราะห์ขึ้น(ในทางอุตสาหกรรม)จะเป็นเพชรชนิดนี้ ประกอบด้วยความเข้มข้นไนโตรเจนสูงถึง 500 ppm

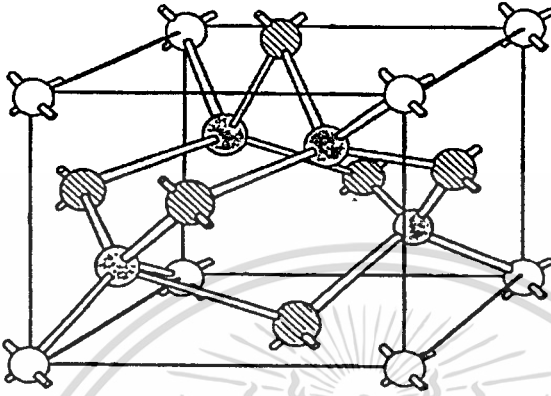
เพชรชนิด IIa หายากมากในธรรมชาติ เพชรชนิดนี้จะมีไนโตรเจนน้อยมากมีคุณสมบัติเป็นฉนวนและไม่พบโบรอน ซึ่งเพชรชนิดนี้จะไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีการวัด การดูดกลืนของแสงอินฟราเรดหรืออุลตราไวโอเล็ต

เพชรชนิด IIb หายากที่สุดในธรรมชาติ มีความเข้มข้นของไนโตรเจนน้อยมาก(น้อยกว่า ชนิด IIa) จะมีจำนวนโบรอนมากกว่าไนโตรเจนและเป็นเพชรชนิดที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

2.2 สมดุลยภาพของคาร์บอน

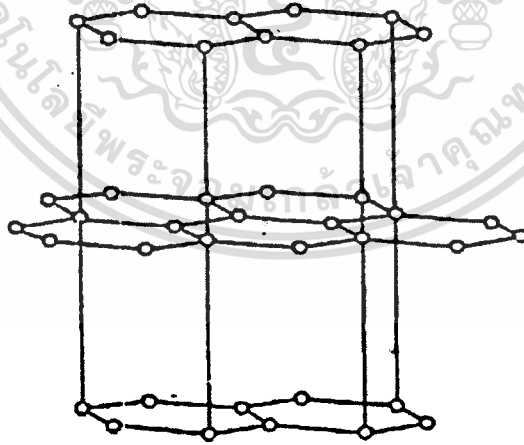
เพชรและกราไฟท์ต่างเป็นโครงสร้างหนึ่งของธาตุคาร์บอน ซึ่งความแตกต่างในโครงสร้างระหว่างกราไฟท์และเพชร สามารถแสดงได้ในรูปที่ 13 และรูปที่ 14

รูปที่ 13



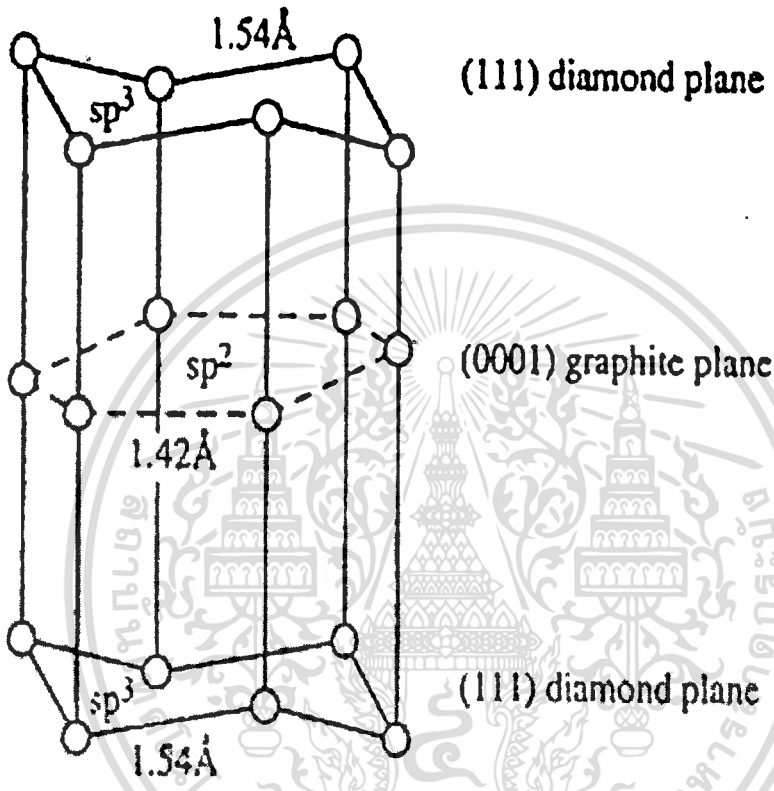
แสดงโครงสร้างของเพชร

รูปที่ 14



แสดงโครงสร้างของกราไฟท์

รูปที่ 15



เปรียบเทียบโครงสร้างของเพชร (111) และกราไฟท์ (0001)

เพชร โครงสร้างจะเป็นโครงสร้างสี่เหลี่ยมอะตอม โดยแต่ละอะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวกับอะตอมคาร์บอนรูป เตตราฮีดรอน (Tetrahedron) อีกสี่รูปที่อยู่รอบ ๆ ดังรูปที่ 13 ในระหว่างอะตอมจะมีความเล่นช่อมบิเนชันที่บริสุทธิ์ เหนียวแน่น ซึ่งทำให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีมาก เช่น มีจุดหลอมเหลวสูง ทนทานต่อสารเคมีได้สูง และมีความแข็งมาก เป็นต้น

กราไฟท์ ตกผลึกในรูปชั้นโครงสร้างหกเหลี่ยม (Hexagonal) ดังรูปที่ 14 ภายในระนาบพื้นอะตอมคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันดี ส่วนระหว่างชั้นต่าง ๆ กลับมีการยึดเหนี่ยวไม่ดี เนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

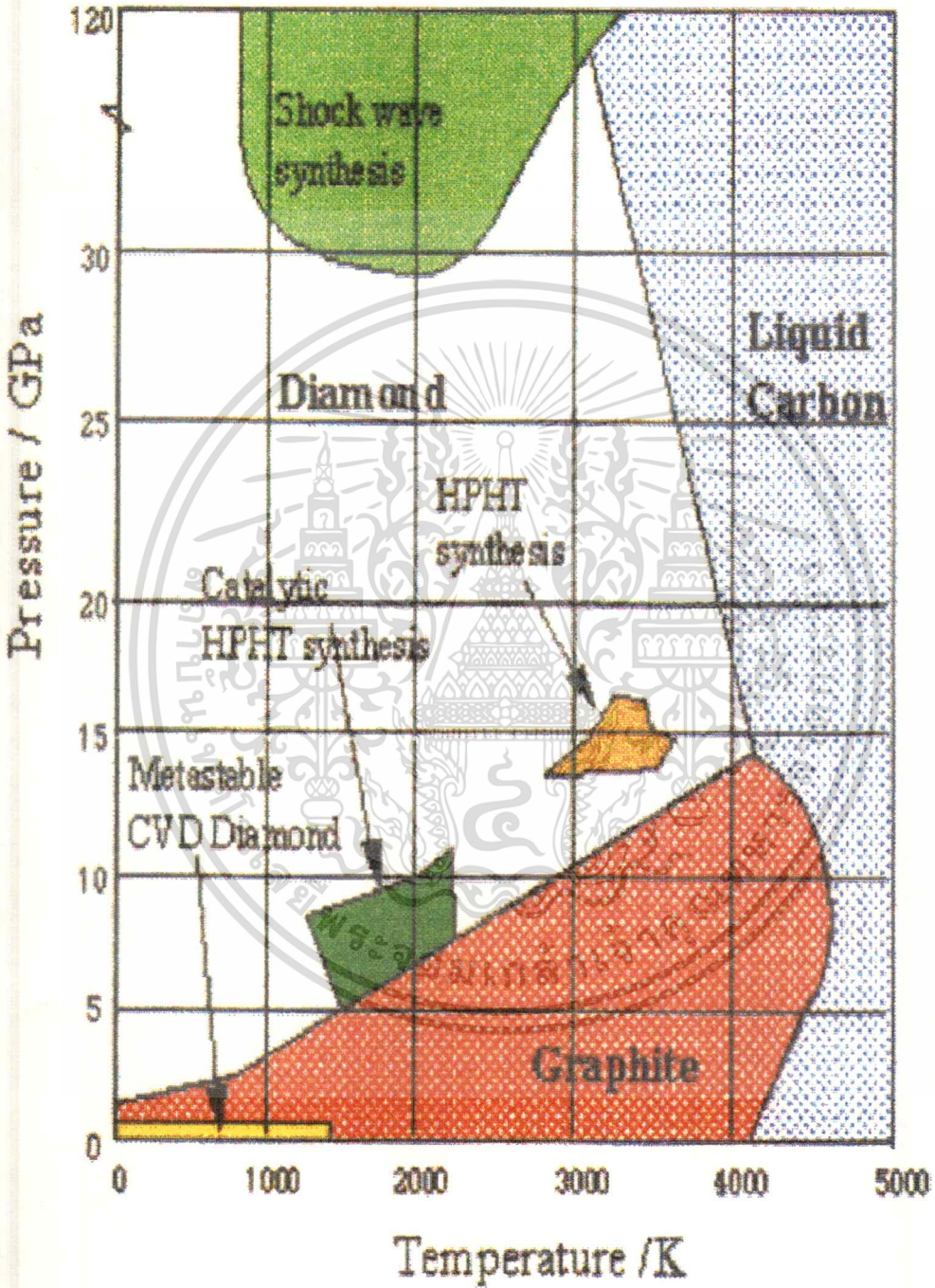
จาก แนววาเลนซีและแนวการนำไฟฟ้าเอียงกันเล็กน้อย จึงทำให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ (เป็น วัสดุสารกึ่งตัวนำ) ในชั้นโครงสร้างจะมีลักษณะเป็น แอนไอโซทรอปิก กราไฟท์จึงเป็นผลึกเดี่ยว ตัวอย่างเช่น

- มีความสามารถนำกระแสไฟฟ้าขนานกับชั้นโครงสร้างอะตอม โดยมีค่าแฟกเตอร์ประมาณ 5×10^3 มากกว่าในแนวตั้ง
- มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามความร้อนขนานกับแนวชั้นโครงสร้างอะตอม เป็นลบ (มีการหดตัวน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น)

ส่วนในแนวตั้งฉากกับชั้นโครงสร้างอะตอมของแกรไฟท์ จะมีอะตอมคาร์บอนไม่หนาแน่นเหมือนกับเพชร ค่าความเค้น ความแข็ง โมดูลัสความยืดหยุ่นก็น้อยกว่าเพชรมาก การยึดเหนี่ยวของโครงสร้างอะตอมแกรไฟท์จะมีชั้นที่อุณหภูมิประมาณ 4000 องศาเซลเซียส และภาคของเหลวจะเกิดขึ้นที่ ความดันสูง (มากกว่า 10^2 bar ขึ้นไป) รูปที่ 16 ที่ความดันต่ำกราฟิท์แยกตัวออกจากกันหรือเกิดเป็นเขม่า ชั้นโครงสร้างอะตอมของกราฟิท์ สามารถเลื่อนไหลในขณะรับภาระเฉือนได้ง่าย แกรไฟท์จึงเป็นสารหล่อลื่นแข็ง ในการสัมผัสกันคู่ของวัสดุได้ดี และเนื่องจากทนความร้อนและสารเคมีได้ดี จึงมีการนำกราฟิท์มาทำพื้นเข้าหาลอมโลหะ

พิจารณารูปที่ 16 ที่ความดันปกติ จนถึงแนวเส้นโค้งของบริเวณ Liquid carbon (melt) ใกล้กับ 4000 องศาเซลเซียส คาร์บอนจะอยู่ในรูปของกราฟิท์ (บริเวณสีแดง) และสาเหตุที่เพชรสามารถพบที่พื้นผิวโลก เพราะว่าอุณหภูมิดำเนินไปที่จะทำให้ละลายพันธะ และเปลี่ยนรูปเป็นกราฟิท์ถึงอย่างไรก็ตามถ้าเพชรถูกทำให้ร้อนเกิน 1500 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศในสภาวะที่เพชรจะเปลี่ยนเป็นกราฟิท์ ในส่วนบริเวณสีขาวคาร์บอนจะอยู่ในรูปของเพชร ทั้งนี้สามารถพบกราฟิท์ที่บริเวณสีขาวได้เช่นเดียวกัน ถ้าหากว่าสภาวะไม่เหมาะสมที่จะทำให้กราฟิท์เปลี่ยนไปเป็นเพชร ในบริเวณสีเขียว แสดงสภาวะที่เกิดเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นโดย กระบวนการของ General Electric ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้โลหะหลอมละลาย เช่น นิเกิล มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกการสังเคราะห์เพชรชนิดนี้ว่า Catalytic HPHT synthesis

รูปที่ 16



แสดงแผนภาพสมดุลงภาคของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่บริเวณอุณหภูมิและความดันสูง เช่น บริเวณสี่สั้ม เพชรสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีที่ปราศจาก โลหะหลอม เป็นวิธีที่เสนอโดย นายBundy เรียกวิธีนี้ว่า HPHT synthesis โดยตรง ในส่วนสี่เหลี่ยมอ่อนเป็นวิธีที่ใช้ความดันสูงแต่ใช้อุณหภูมิต่ำ ที่รู้จักกันวิธีการสังเคราะห์เพชรที่ชื่อ Shock wave technique ส่วนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในห้องวิจัย ที่ใช้ความดันต่ำหรือวิธี CVD จะอยู่ในบริเวณสี่เหลี่ยม ด้านล่างสุดของไดอะแกรม

2.3 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชรเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

จากโครงสร้างของเพชรที่ประกอบด้วย พันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรง เป็นผลให้เพชรมีคุณสมบัติทางกล และทางไฟฟ้าที่พิเศษหลายอย่าง โดยเพชรจะมีความแข็ง , molar density และการนำความร้อน สูงกว่าวัสดุชนิดอื่น ในขณะที่เดียวกันเพชรก็มีความยืดหยุ่นและค่า bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น อีกทั้งยังมีสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนที่ต่ำมาก ๆ ซึ่งสามารถพิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญของเพชรเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่ใช้ในปัจจุบัน ได้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2

แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของเพชร เปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น
ที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน^[17]

คุณสมบัติ	เพชร	ซิลิกอน	GaAs	SiC
Thermal conductivity (W / cm-k)	20	1.41	0.455	4
Specific heat (J / g-k)	0.52	0.7	0.35	0.65
Optical phonon energy(meV)	163	63	35	100
Longitudinal phonon velocity (cm / s)	1.8×10^6	9×10^5	5.2×10^5	1.3×10^6
Coefficient of thermal expansion	0.8×10^{-6}	2.5×10^{-6}	5.9×10^{-6}	2.9×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Electron saturated velocity(cm/s)	1.5×10^7 1.05×10^7	1×10^7 9×10^6	1.2×10^7 1×10^7	2×10^7 1×10^7
Hole saturated velocity (cm/s)				
Electron mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	2150 ± 200	1420	8800	600
Hole mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	1700 ± 280	470	400	650
Density of states effective mass				
Electron	0.57	1.1	0.068	0.45
Hole	1.2	0.8	0.5	1
Dielectric constant	5.7	11.9	12.5	10
Intrinsic resistivity (Ω - cm)	$>10^{15}$	10^5	10^8	$>10^{15}$
Conductivity effective mass				
Electron	0.48			
Hole	0.83			
Breakdown field (V / cm)	$1-20 \times 10^6$	3×10^5	3.5×10^5	$1-5 \times 10^6$
Bandgap (eV)	5.5	1.12	1.42	2.2
Effective density of states				
Conduction band (cm^{-3})	1×10^{19}	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}	7×10^{18}
Valence band (cm^{-3})	3×10^{19}	1.04×10^{19}	7×10^{18}	2.5×10^{19}
Debye temperature (K)	1860	645	344	1200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน^[5]

ในทางปฏิบัติ เส้นใยทั่วไปในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน จะประกอบด้วยหลักการที่สำคัญ 5 ประการ คือ

1) ในก๊าซเฟส ต้องประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน เช่น จำพวก ไฮโดรคาร์บอน หรือ แอลกอฮอล์ จากวิธี CVD ยังพบว่า สามารถที่ใช้แหล่งจ่ายก๊าซที่เป็นไฮโดรคาร์บอนได้ หลายชนิด สำหรับแหล่งจ่ายที่ได้รับความนิยมสำเร็จจากการนำมาทดลองสร้าง คือ มีเทน โพรเพน อีเทน รวมทั้งไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนประกอบอยู่ เช่น อะซิโตน และ เอทานอล การเจือ อะตอมสารเจือของ ฟิล์มเพชร ทำการสร้างโดยใช้ ไโดโบเรนและโบรอนคาร์โบไฮดรอกไซด์ เป็น แหล่งจ่าย

2) ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง หรือ กระตุ้นด้วยพลาสมา โดยบางครั้งอาจมีการใช้ ทั้งสองวิธีร่วมกัน ในวิธี Hot filament พบว่าการแยกอะตอมไฮโดรเจน (H^0) ออกจากก๊าซ ไฮโดรเจน (H_2) สามารถเกิดขึ้นได้ง่าย โดยการผ่านก๊าซไฮโดรเจน ไปยังไส้หลอด เช่น ทังสแตน ที่ ถูกจ่ายกระแสให้มีความร้อน ระหว่าง 1800 ถึง 2300 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดอะตอมไฮโดรเจนใน บรรยากาศของไฮโดรคาร์บอน พบว่า สามารถเคลือบเพชรลงบนฐานรองได้ ในขณะที่เดียวกัน การ ก่อตัวของกราฟไฟท์มีค่าลดลง

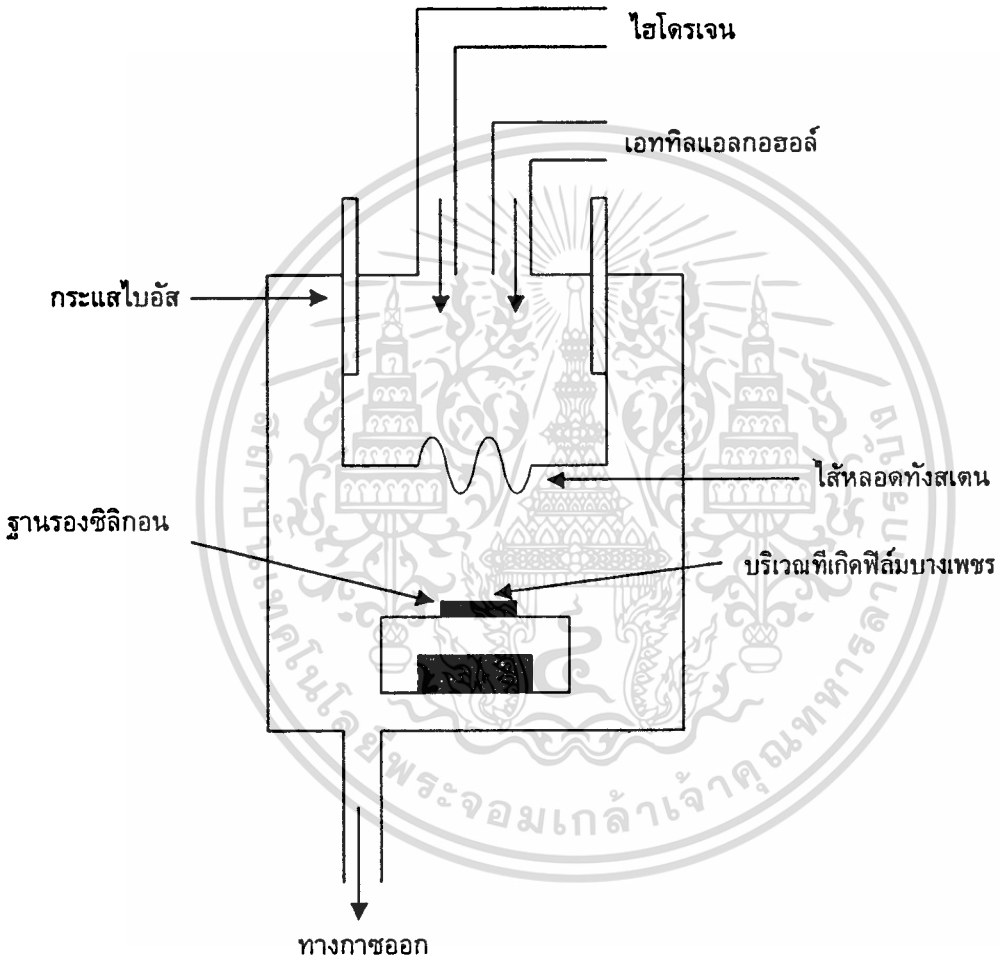
3) ในระบบที่ใช้การสังเคราะห์ ต้องมีความเข้มข้นของอะตอมที่เป็นตัวป้องกันการเกิดกราฟไฟท์มากเพียงพอ หรือ การลดความเข้มข้นของภาวะก๊าซที่ทำให้เกิดกราฟไฟท์ขึ้น ซึ่งปกติจะใช้ ไฮโดรเจน นอกจากนี้อะตอมที่เป็นตัวป้องกัน อาจได้จาก O_2 , F_2 หรือ OH

4) วัสดุที่นำมาใช้เป็นฐานรอง มีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของฟิล์ม ต้องทำการเตรียม พื้นผิวของฐานรอง เพื่อรองรับการเกิดนิวคลีเอชัน และการปลูกผลึกของเพชรจากไอเฟส ในทาง ปฏิบัติแล้วจะรวมถึงพื้นผิวที่ไม่มีตัวเร่งต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการก่อกำตัวของกราฟไฟท์ นอกจากนี้ พื้น ผิวของฐานรอง ต้องรองรับการก่อกำตัวของเพชรเฉพะจะบนพื้นผิว โดยฐานรองต้องมีข้อจำกัดของการ แพร่ของอะตอมคาร์บอน ลงไปในเนื้อวัสดุของฐานรอง

5) กระบวนการสร้าง ต้องมีแรงที่สามารถขับอะตอมคาร์บอนจากก๊าซเฟสไปยังบริเวณ พื้นผิวของฐานรอง ในกระบวนการสร้างด้วยวิธีการ CVD ส่วนใหญ่ แรงที่ใช้ขับอะตอมคาร์บอนจะ อาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ เนื่องจากบริเวณที่ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นจะมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิว ของฐานรอง อย่างไรก็ตามอาจใช้วิธีง่าย ๆ โดยการเป่าก๊าซเฟสไปยังพื้นผิวของฐานรอง

ซึ่งถ้าหลักการใดหลักการหนึ่ง ใน 5 ข้อนี้ขาดไป เป็นผลให้สิ่งที่เกิดขึ้นจะไม่ใช่เพชร อาจเป็นกราไฟท์ , diamond - like hydrocarbon หรือ diamond - like carbon

รูปที่ 17



แสดงระบบ CVD แบบความถี่ไมโครเวฟ

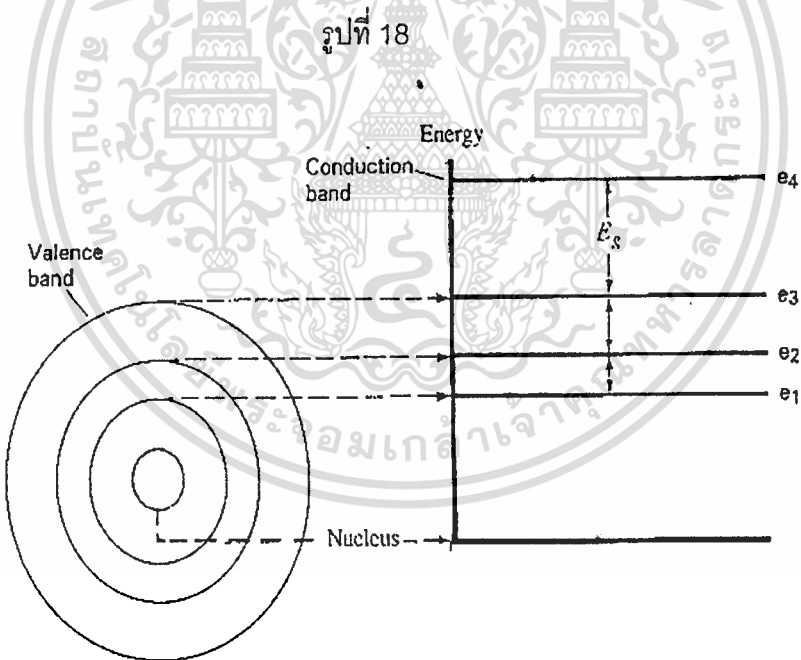
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ระดับพลังงาน

อิเล็กตรอนที่หมุนรอบนิวเคลียสในแต่ละชั้นของวงโคจร จะมีพลังงานแยกออกจากกันเป็นอิสระ อิเล็กตรอนยิ่งอยู่ห่างจากนิวเคลียสมากเท่าใด ระดับพลังงานก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น อิเล็กตรอนโคที่แยกออกจากอะตอมเดิมของมันจะมีระดับพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนที่ยังคงหมุนอยู่รอบนิวเคลียส

พลังงานของวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ใช้ในการยึดเกาะติดกันได้ระหว่างอะตอม เรียกว่า พลังงานวาเลนซ์ (Valence energy) ส่วนพลังงานที่จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนหลุดออกนอกวงโคจรได้ เรียกว่า พลังงานนำกระแส (Conduction energy) ดังนั้น ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานนำกระแส มากกว่าพลังงานวาเลนซ์ อิเล็กตรอนก็จะหลุดจากวงโคจร กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) และเกิดการไหลของอิเล็กตรอน

การพิจารณาระดับพลังงานของอิเล็กตรอนขณะเคลื่อนตัวอยู่ภายในอะตอมและการหลุดวงโคจรจากอะตอมจะง่ายมากขึ้น ถ้าพิจารณาในรูปของ แถบพลังงาน (energy band)



แสดงวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ละชั้น และ แถบพลังงาน

จากรูป 18 จะเห็นว่าวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ละชั้นมีระดับพลังงานแตกต่างกัน จึงแทนได้ด้วยแถบพลังงานที่แตกต่างกัน

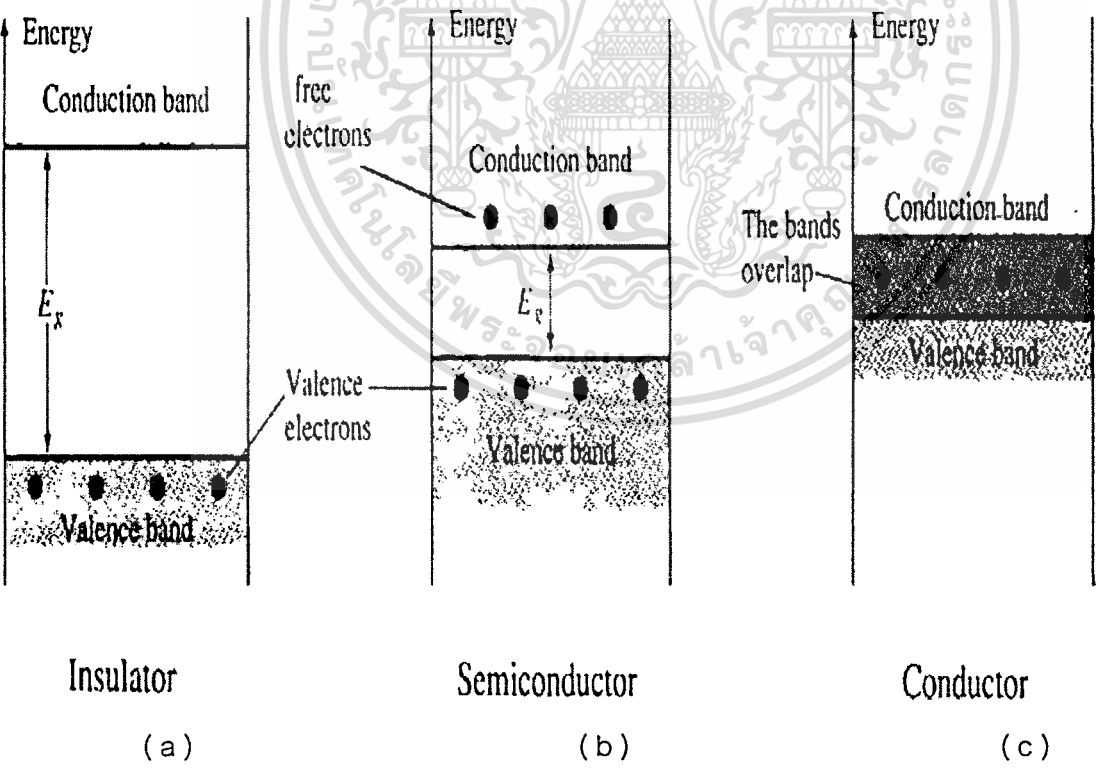
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาพปกติ วาเลนซ์อิเล็กตรอนยังหมุนรอบอะตอม ระดับพลังงานวาเลนซ์ ต้องอยู่ในแถบพลังงานที่เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band)

ฉนวนมีพลังงานในแถบวาเลนซ์ต่ำกว่าพลังงานใน แถบนำกระแส (conduction band) อย่างมากหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ฉนวนมีค่าพลังงานในแถบวาเลนซ์กับแถบนำกระแสแตกต่างกันมาก พลังงานที่แตกต่างกันระหว่างพลังงานในแถบวาเลนซ์กับแถบนำกระแส เรียกว่า พลังงานช่องว่าง (energy gap ; E_g) วัสดุที่เป็นฉนวน จึงมีค่าพลังงานช่องว่าง (E_g) สูงกว่า วัสดุ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งมีค่าพลังงานช่องว่าง (E_g) สูงกว่าวัสดุตัวนำ (conductor) ที่มีแถบวาเลนซ์และแถบนำกระแสเหลื่อมซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 19

ดังนั้น เมื่อจ่ายพลังงานจากภายนอกเพียงเล็กน้อยให้แก่วัสดุตัวนำก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลใน วัสดุ ส่วนวัสดุสารกึ่งตัวนำจะต้องจ่ายพลังงานจากภายนอกมากกว่าตัวนำจึงจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในวัสดุได้

รูปที่ 19



แสดงแถบพลังงานของ a) ฉนวน b) สารกึ่งตัวนำ c) ตัวนำ

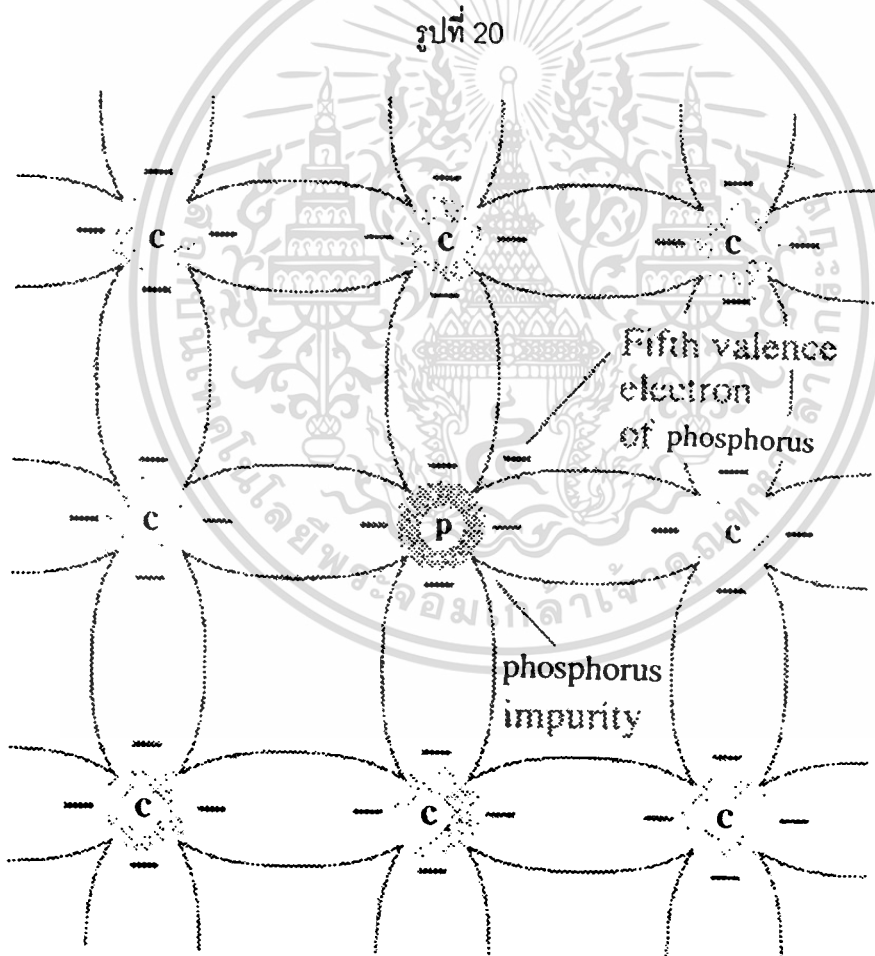
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และ พี

คุณลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการเติมอะตอมสารเจือปน (impurity atoms) เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กระบวนการเติมสารเจือปน (doping process) ถึงแม้ว่าจะเติมอะตอมสารเจือปนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำเพียงเล็กน้อย ก็สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของแถบพลังงานและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้

2.6.1 สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น เกิดจากการอะตอมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น ฟอสฟอรัส แอนติโมนี อาร์เซนิก เป็นต้น ลงใน ซิลิกอน หรือ เพชร บริสุทธิ์



แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่าง อะตอมสารเจือปนชนิด เอ็นและอะตอมสารกึ่งตัวนำ

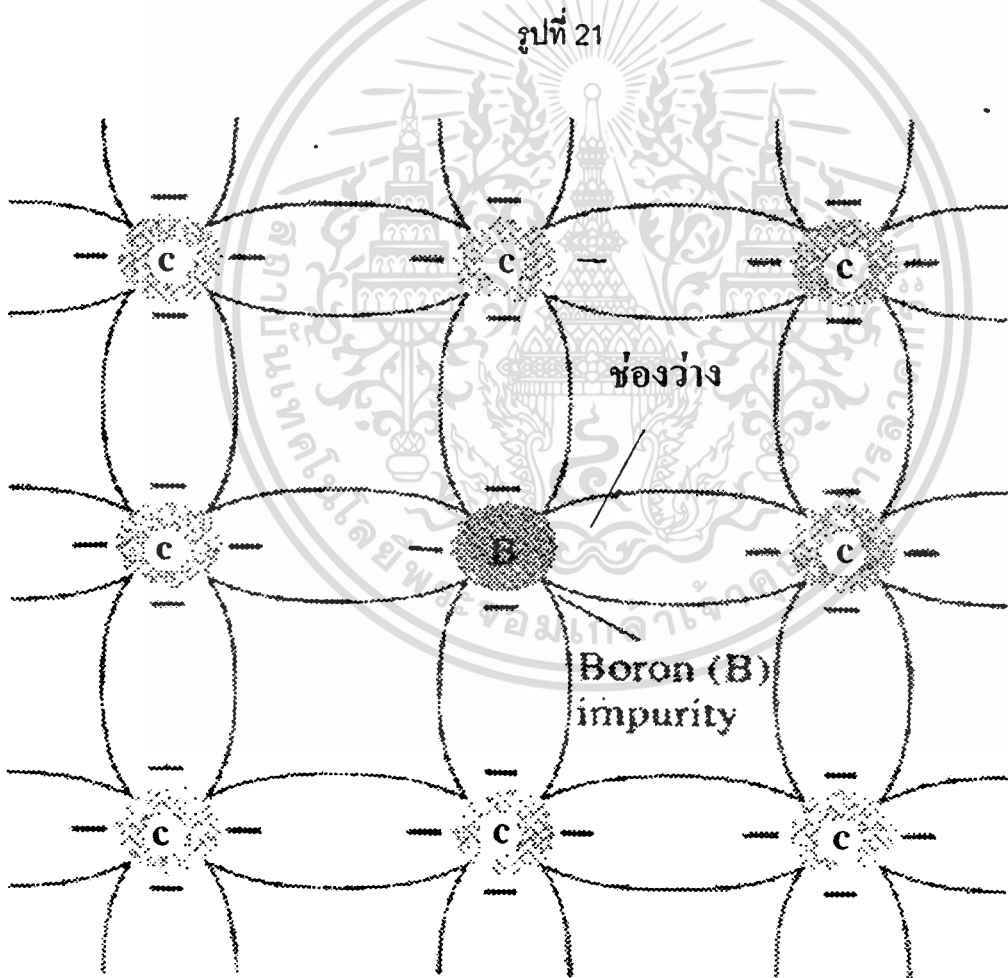
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สูงจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 20 แสดงตัวอย่างการเติมสารเจือปนฟอสฟอรัส (phosphorus impurity ; P) ลงในคาร์บอน วาเลนซ์อิเล็กตรอนของ P จะรวมตัวแบบโควาเลนซ์กับวาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 4 ตัวของ คาร์บอน ส่วนอิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของ P (fifth valence electron of phosphorus) จะไม่มีคู่ ดังนั้นถ้าจ่ายพลังงานเพียงเล็กน้อย อิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของ P จะหลุดออกจากอะตอม และกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ

2.6.2 สารกึ่งตัวนำชนิด พี

สารกึ่งตัวนำชนิด พี เกิดจากการเติมอะตอมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน (boron) แกลเลียม (gallium) และอินเดียม (indium) ลงใน ซิลิกอน หรือ เพอร์ที่บริสุทธิ์

รูปที่ 21



แสดงการเกาะเกี่ยวกันระหว่าง อะตอมสารเจือชนิด พี และอะตอมสารกึ่งตัวนำ

จากรูป 21 เป็นตัวอย่างการเติมอะตอมสารเจือปนโบรอน (boron impurity ; B) ลงใน คาร์บอนวาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 3 ตัวของ โบรอน จะรวมตัวแบบโควาเลนซ์กับวาเลนซ์อิเล็กตรอนของคาร์บอน การรวมตัวกันระหว่างวาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้งสอง ขาดไป 1 ตัว ทำให้เกิดที่ว่าง หรือ โฮล (hole) และสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก ที่บริเวณดังกล่าว จะเห็นได้ว่าโฮลจะแสดงอำนาจของไฟฟ้าเป็นประจุบวก

2.7 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ^[16]

จากรอยต่อของไดโอด จำเป็นที่จะต้องสร้างรอยสัมผัสขึ้น เพื่อสะดวกแก่การนำรอยต่อ พี-เอ็น ไปประกอบใช้งานร่วมกับสิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่น โดยที่ไม่ทำให้คุณสมบัติของรอยต่อ พี-เอ็น มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เลย ดังนั้นรอยสัมผัสนี้ จะต้องมีความนำสูง ซึ่งไม่มีผลหรือเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแสและรอยสัมผัส ซึ่งมีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ เรียกกันว่า รอยสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact) โดยปกติทั่วไปที่ปลายทั้งสองด้านของไดโอด จะถูกสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก เพื่อการต่อเส้นลวดความนำออกมา รอยสัมผัสโอห์มมิกนี้สร้างขึ้นได้โดยการสัมผัสกันระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำ และโลหะ เช่น อลูมิเนียม เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ อาจจะไม่ใช่รอยสัมผัสโอห์มมิกก็ได้ เช่นบางครั้งอาจแสดงคุณสมบัติในการ เรกติไฟร์ (rectifier) ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ที่สัมผัสกัน นอกจากนี้จะเห็นว่าไม่ว่า รอยสัมผัสหรือรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จะมีคุณสมบัติเป็น รอยสัมผัสโอห์มมิก หรือ รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ ก็ตาม ต่างก็ถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี ทั้งที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิด เอ็น และ ชนิด พี เนื่องจากสารกึ่งตัวนำเพชรที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นเป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติของรอยต่อที่สร้างขึ้น ระหว่าง โลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี

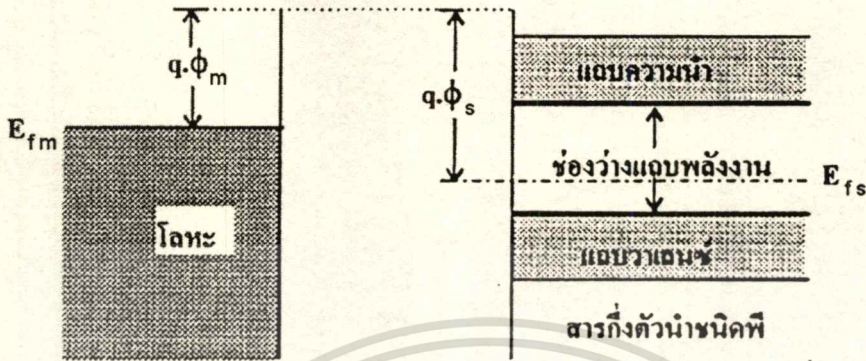
2.7.1 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี^[16]

ถ้าสมมุติให้ฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ คือ ϕ_m และมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี ϕ_s ดังนั้น ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี สามารถเขียนแยกกันได้ดังแสดง ในรูปที่ 22

และเมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี มาสัมผัสกัน เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของสารทั้งสองไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดมีการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองนี้ จนกระทั่งในที่สุดจะอยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งการถ่ายเทประจุพาหะจะหยุดลงในสภาวะนี้ ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของสารทั้งสองชนิด จะอยู่ที่ระดับเดียวกันผ่านตลอดรอยสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 23

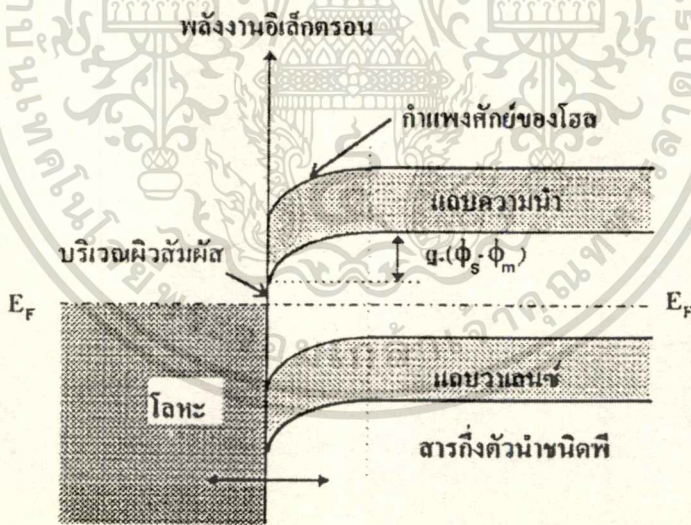
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 22



แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี
ในสถานะ ก่อนสัมผัส

รูปที่ 23



แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน ของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี
ในกรณีที่ $\phi_m < \phi_s$

ปรากฏการณ์ที่กล่าวมานี้ อธิบายได้ว่า เนื่องจากอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ไหลผ่านรอยต่อเข้าไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้เกิดมีไอออนลบของอะตอมสารเจือรับขึ้น ที่สารกึ่งตัวนำ และเกิดมีประจุบวกขึ้นทางด้านโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่บริเวณรอยต่อ สนามไฟฟ้างกล่าวจะมีทิศทางต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลได้ สนามไฟฟ้าที่ช่วยต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลนี้สามารถเขียนให้ชัดเจนโดยการงอโค้งลงของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อสัมผัสกับโลหะ ซึ่งมีความหมายว่าเกิดมีกำแพงศักย์เกิดขึ้นที่รอยต่อ โดยมีการสะสมของอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี โดยกำแพงศักย์มีความสูง เท่ากับ $q \cdot (\phi_s - \phi_m)$ ดังแสดงในรูปที่ 23 ดังนั้นในภาวะสมดุลความร้อนจึงไม่มีกระแสใด ๆ ไหลผ่านรอยต่อนี้

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบแอสโดยทางด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับทางด้านโลหะ จะทำให้ระดับพลังงานทุกระดับในสารกึ่งตัวนำ มีค่าลดลงจากภาวะเดิม ด้วยปริมาณ $q \cdot V$ อิเล็กตรอนโวลท์ (V คือ แรงดันไบแอสที่ให้แก่อรอยต่อ) ดังนั้น ความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างกว่าเดิม ในภาวะนี้ถือว่า รอยต่อได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ กระแสโฮลจากสารกึ่งตัวนำ ที่จะไหลไปยังโลหะจะถูกขัดขวางไว้ด้วยกำแพงศักย์ ที่มีขนาดความสูงมาก อย่างไรก็ตาม จะมีการเคลื่อนที่ของโฮลบางส่วนจากโลหะสามารถไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำได้ โดยที่ปริมาณของกระแสไม่เกี่ยวข้องกับแรงดันไบแอส แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่รอยต่อ ซึ่งอาจเรียกว่า เป็นกระแสรั่วของรอยต่อ

ส่วนในกรณีของการให้แรงดันไบแอสตรงแก่อรอยต่อ กล่าวคือ ทางด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับทางด้านโลหะ กรณีนี้จะทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อมีขนาดลดลง และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะก็จะมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดว่า รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี ซึ่ง $\phi_m < \phi_s$ จะมีคุณสมบัติในการ เรกติไฟร์ได้เช่นเดียวกับ รอยต่อ พี - เอ็น โดยทั่วไป คือ ยอมให้กระแสผ่านในกรณีที่เป็นไบแอสตรงเท่านั้น ในการวิเคราะห์รอยตอดังกล่าวนี้อาจทำได้ง่าย ๆ โดยพิจารณาว่า อิเล็กตรอนจากโลหะ ที่จะไหลไปยังสารกึ่งตัวนำได้จะต้องข้ามความสูงของกำแพงศักย์ $q \cdot V_B$ ดังนั้นที่อุณหภูมิ T ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แสดงได้โดย

$$J_{M \rightarrow S} \propto \exp(-q \cdot V_B / kT) \quad (2-1)$$

และนอกจากนี้โฮลจากสารกึ่งตัวนำที่จะไหลไปยังโลหะได้ จะต้องข้ามความสูงของกำแพงศักย์ $q \cdot (V_B \cdot V)$ ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า $q \cdot V_B$ ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของการไบแอส หรือก็

คือ เครื่องหมายของ V นั้นเอง ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไหลจากสารกึ่งตัวนำไหลไปยังโลหะได้โดย

$$J_{s \rightarrow M} \propto \exp[-q(V_B - V)/kT] \quad (2-2)$$

และไม่คิดถึงผลของการฉีดพาหะส่วนน้อยคือ อิเล็กตรอน ค่าของความหนาแน่นของกระแสรวมที่รอยต่อนี้คือ ผลต่างของกระแสไหลทั้งสองกระแส นั่นก็คือ

$$J_{รวม} \propto \exp(-qV_B/kT) \cdot [\exp(qV/kT) - 1] \quad (2-3)$$

โดยที่ $V_B =$ กำแพงศักย์ที่รอยต่อขณะสมดุล

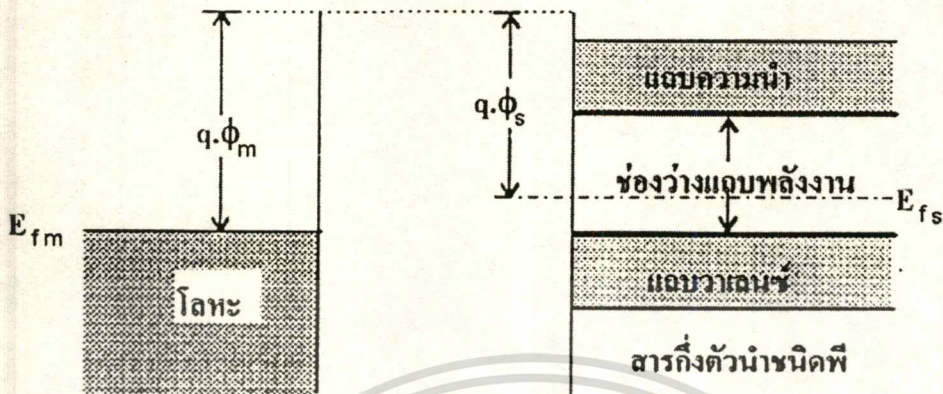
$V =$ แรงดันไบแอสภายนอกที่ให้แก่รอยต่อ

เมื่อพิจารณาสมการ (2-3) จะเห็นว่า มีลักษณะเหมือนกับสมการของไดโอด สำหรับรอยต่อ พี - เอ็น ดังนั้นลักษณะคุณสมบัติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อจึงมีลักษณะคล้ายกับไดโอดแบบรอยต่อ พี - เอ็น รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบนี้เรียกว่า รอยต่อชอตตี (Schottky junction) หรือ ชอตตีไดโอด (Schottky diodes)

ต่อไปถ้าเป็นกรณีซึ่ง $\phi_m > \phi_s$ ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำเมื่อก่อนและหลังที่ถูกนำมาสัมผัสกัน ถูกแสดงดังในรูปที่ 24 และ 25 ตามลำดับ กล่าวคือ เมื่อก่อนสัมผัสระดับเฟอร์มิของโลหะ E_{Fm} จะอยู่ที่ระดับต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ E_{Fs} และเมื่อนำมาสัมผัสกันแล้ว จะทำให้เกิดการถ่ายเทของประจุพาหะผ่านรอยต่อ โดยที่อิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี ทำให้เกิดไอออนลบขึ้นทางด้านโลหะ และเป็นสาเหตุให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่รอยต่อ การไหลของอิเล็กตรอนจะหยุดลงเมื่อสนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงพอที่จะทำให้สามารถต้านทานการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ และเป็นสภาวะสมดุล ซึ่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ที่ระดับเดียวกันผ่านตลอดรอยต่อ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสะสมของไหลทางด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 25 ซึ่งแสดงได้โดย การโค้งงอขึ้นของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัสกับโลหะ ดังนั้นในสภาวะสมดุลนี้ จะเห็นได้ว่ารอยต่อจะไม่มีกำแพงศักย์ที่จะป้องกันการเคลื่อนที่ของไหลจากสารกึ่งตัวนำไปทางด้านโลหะ กล่าวคือไหลสามารถที่จะข้ามรอยต่อนี้ได้ทั้งสองทิศทาง กล่าวคือ รอยต่อไม่มีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ รอยต่อแบบนี้เรียกว่า รอยต่อแบบโอห์มมิก หรือ รอยสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact)

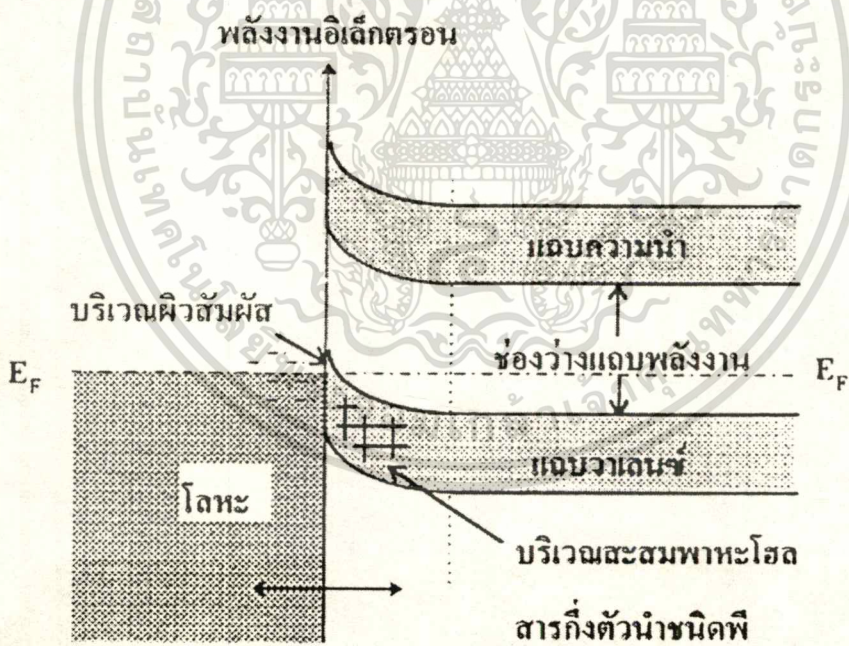
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 24



แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี
 ในขณะ ก่อนสัมผัส

รูปที่ 25



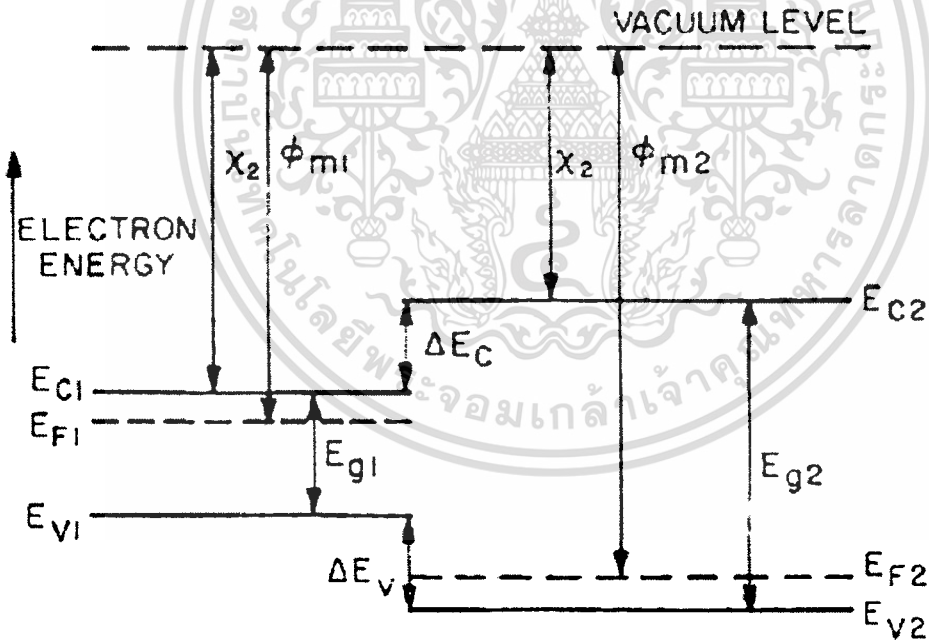
แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี
 ภายหลังสัมผัสกัน ในกรณีที่ $\phi_m > \phi_s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 รอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกัน ^[8]

รอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterojunction) เป็นรอยต่อ ระหว่างสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่มีระดับพลังงานแตกต่างกัน โดยมีความเข้ากันได้ดี ของ ค่าคงที่ของแลตทิซ (lattice constant) และ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน แต่อย่างไรก็ตาม อาจจะไม่เสมอไป และอาจจะมีจุดบกพร่อง เช่น เกิดสถานะ อินเตอร์เฟส ที่พื้นผิวของรอยต่อที่มีเนื้อสารต่างชนิดกัน สถานะนี้สามารถแสดงเป็น ศูนย์กักการแพร่ปิ่ง (trapping center) และ จำกัดศักยภาพของ อุปรกรณ์ แบบจำลองแถบพลังงานของรอยต่อที่มีเนื้อสารต่างชนิดกัน แบบอุดมคติ โดยปราศจาก สถานะอินเตอร์เฟส ถูกเสนอโดย Anderson โดนมี่พื้นฐานของ Shockley เราจะพิจารณาแบบ จำลองนี้ ดังแสดงในรูปที่ 26

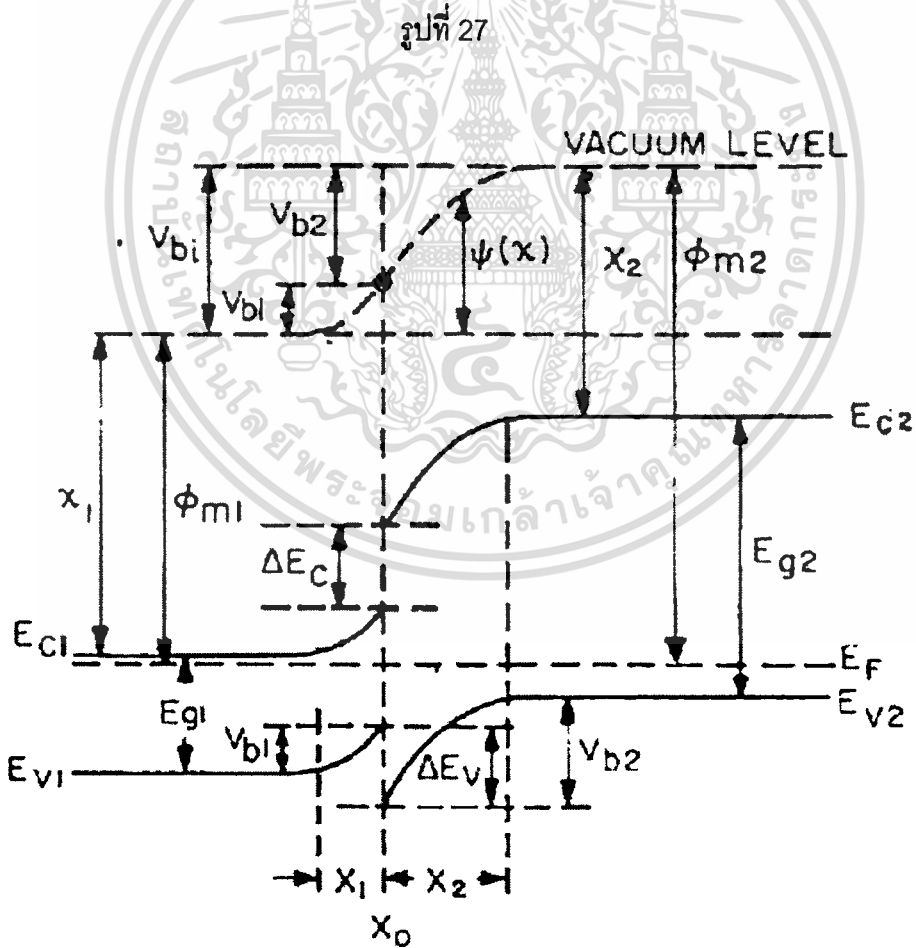
รูปที่ 26



แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่แยกกันอยู่

รูปที่ 26 แสดง ไดอะแกรมแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน สารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด สมมุติว่ามีแถบพลังงาน (E_g) ค่า permittivities (ϵ) ค่าฟังก์ชันงาน (ϕ) และค่าอิเล็กตรอน แอฟฟิไนตี (χ) ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าฟังก์ชันงานและค่าอิเล็กตรอนแอฟฟิไนตี นิยามได้ว่าเป็น พลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากระดับชั้น เฟอร์มิ (E_F) และหลุดจากด้านล่างของระดับชั้นนำ ไฟฟ้า (conduction band ; E_C) ไปยังตำแหน่งที่อยู่นอกเนื้อสาร (ระดับสุญญากาศ) ตามลำดับ ความแตกต่างของพลังงานที่ขอบชั้นคอนดักชัน ในสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด แสดงได้เป็น ΔE_C และใน ชั้น วาเลนซ์ แสดงได้เป็น ΔE_V

เมื่อรอยต่อที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำเหล่านี้ แถบพลังงานจะแสดงที่สภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 27 เรียกรอยต่อแบบนี้ว่า รอยต่อ ชนิดเอ็น และ ชนิดพี ที่มีเนื้อสารต่างชนิดกัน (N - P Heterojunction) เป็นรอยต่อที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น ที่มีช่องว่างแถบพลังงานแคบ กับ สารกึ่งตัวนำ ชนิดพี ที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง



แสดงแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน แบบชนิดเอ็น และ ชนิดพี ที่สภาวะสมดุลย์

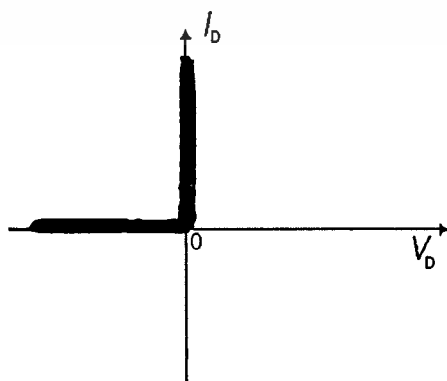
ต่อมา ชั้นระดับพลังงานเฟอร์มิต้องอยู่ในแนวเดียวกันทั้ง 2 ด้าน ในสภาวะสมดุล และ ระดับ
 ศักย์ไฟฟ้า จะขนานกับขอบของ แถบพลังงานไปตลอด ส่วนความไม่ต่อเนื่องกันในขอบชั้นคอน
 ดักชัน (ΔE_c) และ ขอบชั้นวาเลนซ์ (ΔE_v) เป็นค่าที่ขึ้นกับการเติมสารเจือในสารเหล่านี้ ที่ซึ่ง
 E_g และ χ ไม่เป็นฟังก์ชันของการเติมอะตอมสารเจือ ค่า built - in potential รวม (V_{b1}) จะเท่า
 กับการรวมของ partial built - in voltages ($V_{b1} + V_{b2}$) ที่ซึ่ง V_{b1} และ V_{b2} เป็น ค่าศักย์ อิเล็ก
 โตรสถาทิก (electrostatic potential) ที่สภาวะสมดุล โดยสารกึ่งตัวนำ ชนิด 1 และ 2 ตาม
 ลำดับ

2.8 สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำไดโอด

2.8.1 ไดโอดในอุดมคติ

ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี และ ชนิดเอ็น สามารถควบคุมให้กระแส
 ไฟฟ้าจากภายนอกไหลผ่านตัวมันได้ทิศทางเดียว ไดโอดในอุดมคติมีลักษณะเหมือนสวิตช์นำ
 กระแสไปได้ในทิศทางเดียว จากรูป 2-16 ถ้ากำหนดให้ V_D เป็นแรงดันตกคร่อมไดโอดและ I_D เป็น
 กระแสที่ไหลผ่านไดโอด ถ้าขั้วต่อแบตเตอรี่ให้เป็นแบบไบแอสตรง ไดโอดจะเปรียบเสมือน
 กับสวิตช์ที่ปิด (close switch) หรือไดโอดลัดวงจร (short circuit) I_D ไหลผ่านไดโอดได้ ในทาง
 ตรงกันข้าม ถ้าขั้วต่อแบตเตอรี่แบบไบแอสกลับ ไดโอดจะเปรียบเสมือนสวิตช์เปิด (open switch)
 หรือไดโอดเปิดวงจร (open circuit) ทำให้ I_D เท่ากับศูนย์ และถ้านำค่า V_D กับ I_D ขณะต่อแบบ
 ไบแอสตรงและไบแอสกลับ มาเขียนเป็นกราฟแสดงคุณลักษณะของไดโอด จะได้ดังรูปที่ 28

รูปที่ 28



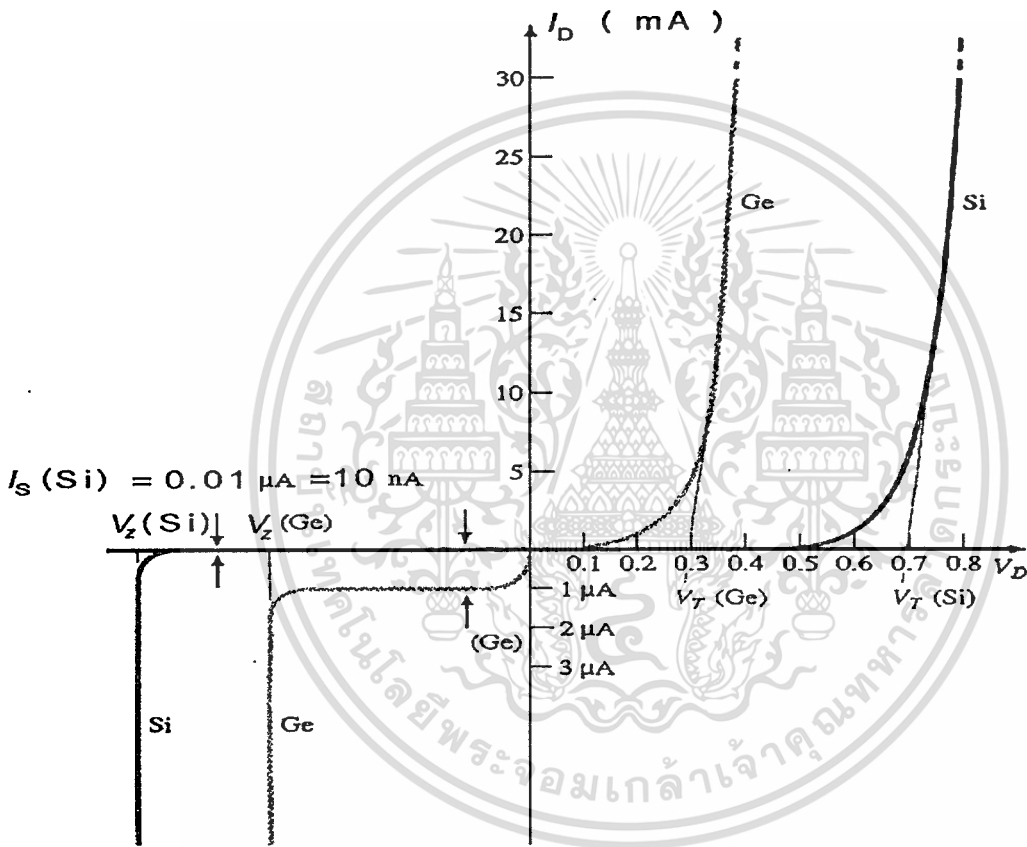
แสดงไดโอดในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 ไดโอดในทางปฏิบัติ

ไดโอดในทางปฏิบัติมีการแพร่กระจายของพาหะส่วนน้อยอยู่ที่บริเวณรอยต่อจำนวนหนึ่ง ดังนั้น ถ้าต่อไบแอสตรงให้กับไดโอดในทางปฏิบัติ ก็จะทำให้เกิด แรงดันเสมือน ที่คอยต้านแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเพื่อการไบแอสตรง ดังแสดงในรูปที่ 29

รูปที่ 29



แสดงลักษณะของกระแสและแรงดัน ของไดโอดในทางปฏิบัติ

กล่าวคือ ถ้าต้องการให้ไดโอดในทางปฏิบัติ นำกระแสได้ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งให้มีค่ามากกว่าแรงดันเสมือน หรือ ขนาดของแรงดันเสมือนเป็นตัวบ่งบอกจุดทำงานของไดโอดนั่นเอง ดังนั้น จึงเรียก แรงดันเสมือน อีกอย่างหนึ่งว่า แรงดันในการเปิด (turn on voltage ; V_T)

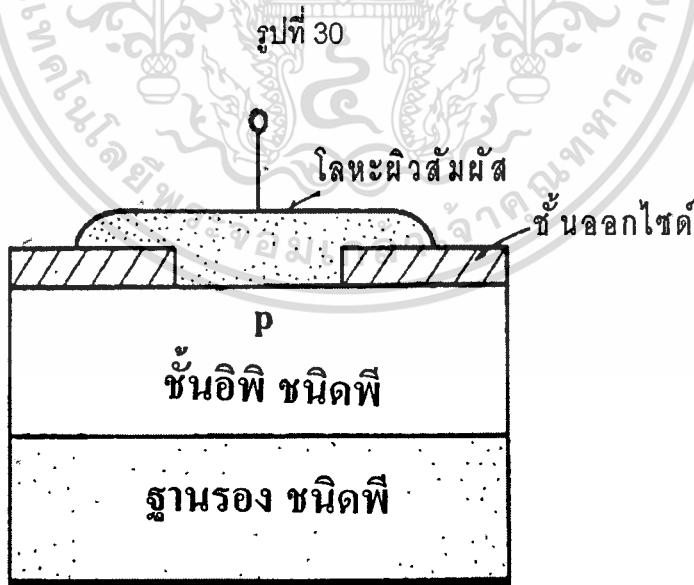
กรณีไบแอสกลับ บริเวณชั้นปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น แต่ยังมีข้างน้อยแพร่กระจายที่รอยต่ออยู่จำนวนหนึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้เล็กน้อย กระแสดังกล่าว เรียกว่า กระแสรั่ว

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหล (leakage current) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรื่อย ๆ กระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ไดโอดนำกระแสเพิ่มขึ้น อย่างมาก ระดับกระแสที่จุดนี้เรียกว่า กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse saturation current ; I_S) แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้ เรียกว่า แรงดันพังทลาย (breakdown voltage) และถ้าแรงดันไบแอสกลับสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ไดโอดทนได้ เรียกว่า แรงดันพังทลายซีเนอร์ (zener breakdown voltage ; V_Z) ถ้าแรงดันไบแอสกลับสูงกว่า V_Z จะเกิดความร้อนอย่างมากที่รอยต่อของไดโอด ส่งผลให้ไดโอดเสียหายหรือพังได้ แรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้ เรียกว่า แรงดันพังทลายอวาลานซ์ (avalanche breakdown voltage) ดังนั้นการนำไดโอดไปใช้งานจึงใช้กับไบแอสตรงเท่านั้น

2.8.3 ซอตต์กี ไดโอด

ไดโอดชนิดนี้แตกต่างจาก ไดโอดแบบโครงสร้างที่มีรอยต่อ พี - เอ็น ทัว ๆ ไป เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของไดโอดชนิดนี้ ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่าง โลหะและสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำอาจจะเป็นชนิด เอ็นหรือชนิด พี ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 30 กระแสซึ่งไหลผ่านไดโอดนี้จะเป็นกระแสของพาหะส่วนมากเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากไดโอดโดยทั่ว ๆ ไป และจากสาเหตุดังกล่าว ทำให้ไดโอดชนิดนี้มีความรวดเร็วในการทำงานสูงมาก เช่นมีค่าน้อยกว่า 1×10^{-10} วินาที เป็นต้น



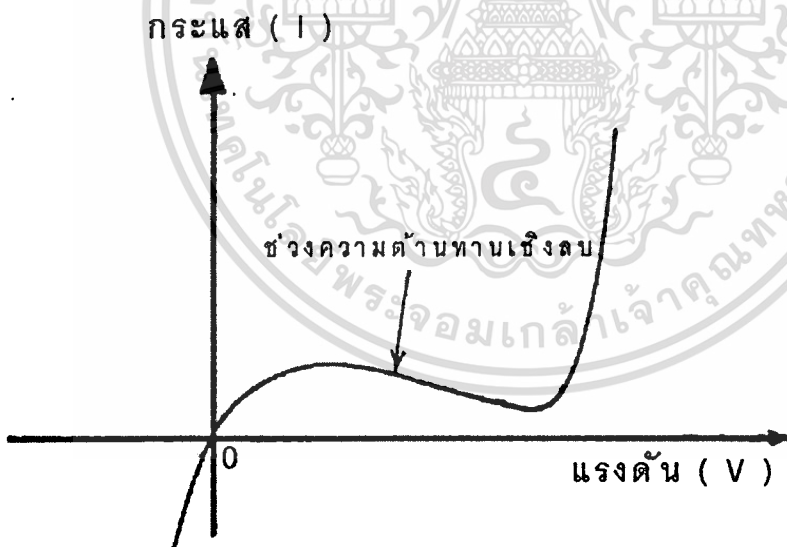
ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของซอตต์กีไดโอด

ดังนั้นจึงทำให้ไดโอดชนิดนี้ เหมาะที่จะนำไปใช้กับ งานย่านความถี่สูง ๆ เช่นในวงจรการผสมสัญญาณไมโครเวฟ หรือ ในวงจรรับสัญญาณไมโครเวฟได้ดี นอกจากนี้ไดโอดชนิดนี้ยังนำไปใช้ในวงจร ตรวจจับ TTL โดยการต่อคร่อมระหว่างขั้วของเบส และ ขั้วของคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์นั้นมีความรวดเร็วในการทำงานเพิ่มขึ้นมาก จึงนับได้ว่าไดโอดชนิดนี้เป็น switching diode แบบพิเศษชนิดหนึ่ง

2.8.4 แบทเวอร์ดไดโอด^[16]

แบทเวอร์ดไดโอดเป็นไดโอดซึ่งทั้งสองด้านของรอยต่อ พี - เอ็น มีปริมาณความหนาแน่นของสารเจือสูงกว่าซีเนอร์ไดโอด คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส และ แรงดันของไดโอด ชนิดนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 31 และรูปที่ 32 ตามลำดับ

รูปที่ 31

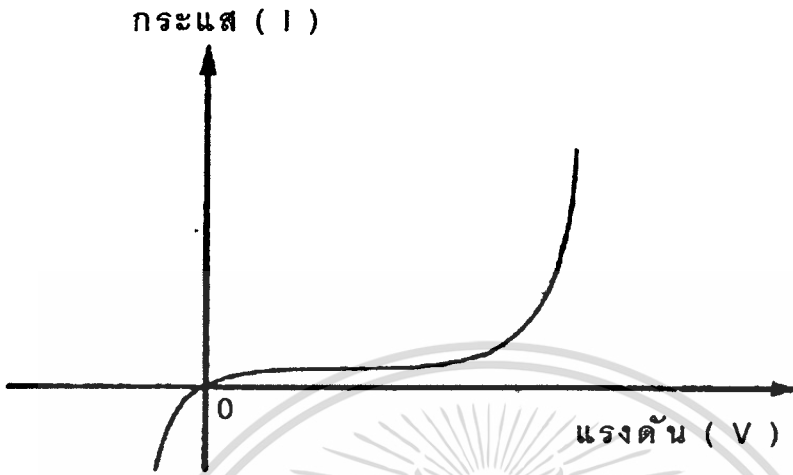


แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ แบทเวอร์ดไดโอด

ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 32

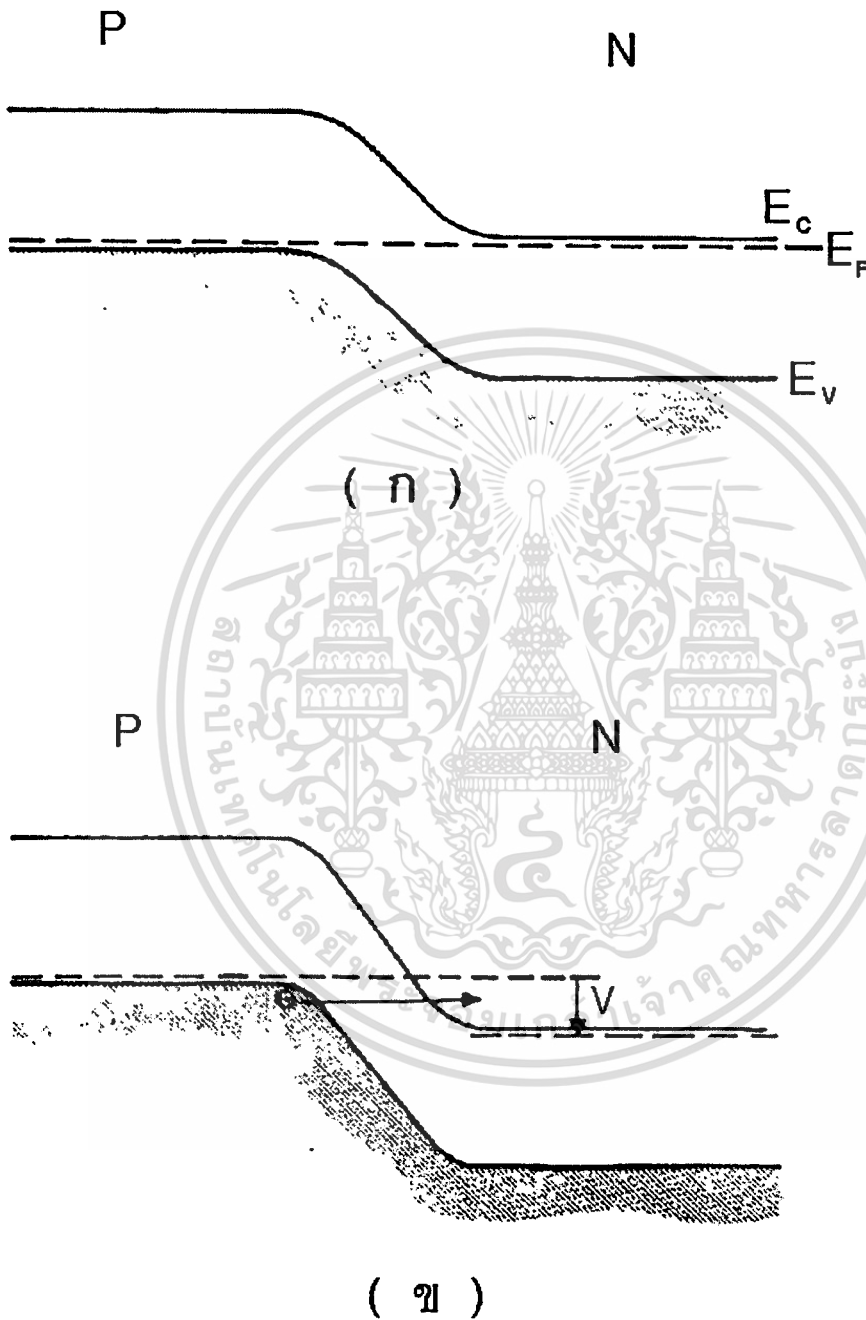


แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของ แบริดไดโอดชนิดที่ไม่มีควมต้านทานเชิงลบ

กล่าวคือ ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับแม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม จะมีกระแสไหลผ่านเป็นจำนวนมาก ซึ่งอธิบายได้ด้วยโครงสร้างแถบพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 33

โดยกล่าวสรุปว่าประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณปลอดพาหะ ที่แคบ ๆ ของรอยต่อ พี - เอ็น ได้ โดยไม่มีการชนกัน และขณะที่ได้รับไบแอสกระแสตรงจะมีค่าน้อย ดังนั้นจึงมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันตรงกันข้ามกับไดโอดทั่ว ๆ ไป จึงเรียกไดโอดชนิดนี้ว่า แบริดไดโอด แต่อย่างไรก็ดี ถ้าหากความหนาแน่นสารเจือมีค่าสูง ๆ อาจปรากฏคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบทางด้านแรงดันไบแอสตรงได้ ดังแสดงในรูปที่ 33 ไดโอดชนิดนี้สามารถที่จะใช้ในการ ตรวจจับสัญญาณได้ โดยเฉพาะในย่านความถี่สูง เช่น ไมโครเวฟ แต่คุณสมบัติ กระแส - แรงดัน ของไดโอดชนิดนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับอุณหภูมิซึ่งเปลี่ยนแปลงไป

รูปที่ 33



แสดงปรากฏการณ์การทะลุผ่านของไดโอด ขณะ ก) ไม่มีแรงดันไบแอส

ข) ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้าง

3.1 กระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง

ก่อนที่จะนำฐานรองไปใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร ต้องมีการเตรียมฐานรองก่อน โดยวัสดุที่เลือกมาทำเป็นฐานรองในการสร้างฟิล์มเพชร จะเป็นซิลิกอน (Si) และนำฐานรองซิลิกอนที่เตรียม ชุบด้วย สารละลายของผงเพชรผสมเอทิลแอลกอฮอล์ มีรายละเอียดการเตรียมดังนี้ คือ ผงเพชรที่ใช้มีขนาดประมาณ 0.05 ไมครอน ดังรูปที่ 34 กระทำโดยการผสมผงเพชรลงในเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไป super sonic เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ผงเพชรกระจายออก นำฐานรองซิลิกอน ที่เตรียมได้มาชุบในสารละลาย แล้วเป่าแห้งด้วย ก๊าซไนโตรเจน ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบลักษณะของผงเพชรที่กระจายอยู่ทั่วไปบนฐานรองซิลิกอน ดังรูปที่ 35

รูปที่ 34



แสดงผงเพชรของ De Beers ที่ใช้ในการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 35



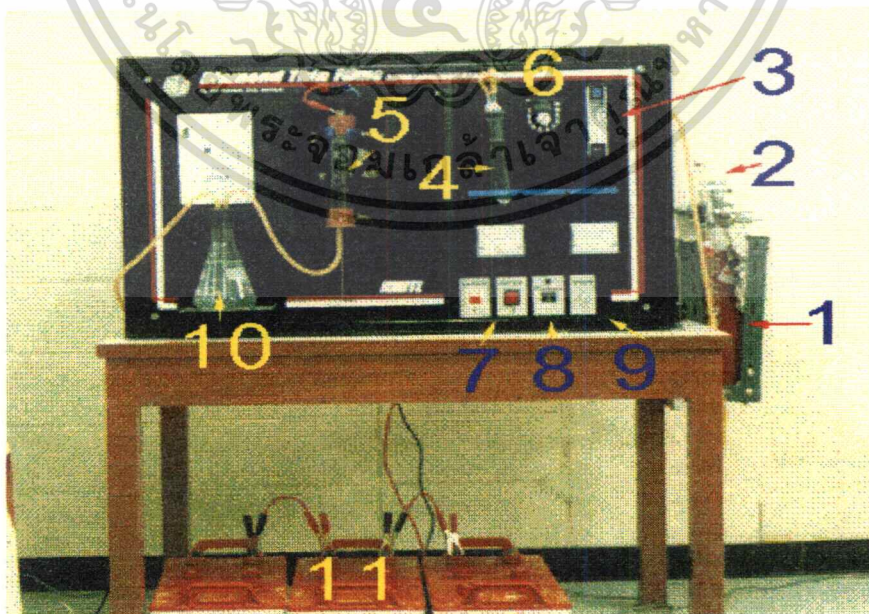
แสดงลักษณะพื้นผิวที่ได้จากการชุบสารละลายผงเพชร

3.2 กระบวนการสร้าง

3.2.1 การสร้างฟิล์มเพชร ชนิด อินทรีนซิค

สร้างโดยใช้วิธีการ CVD แบบความร้อน (Hot Filament Chemical Vapour Deposition) จากชุดทดลองที่ประกอบขึ้นเอง ดังรูปที่ 36

รูปที่ 36



แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากรูปชุดทดลองประกอบด้วย

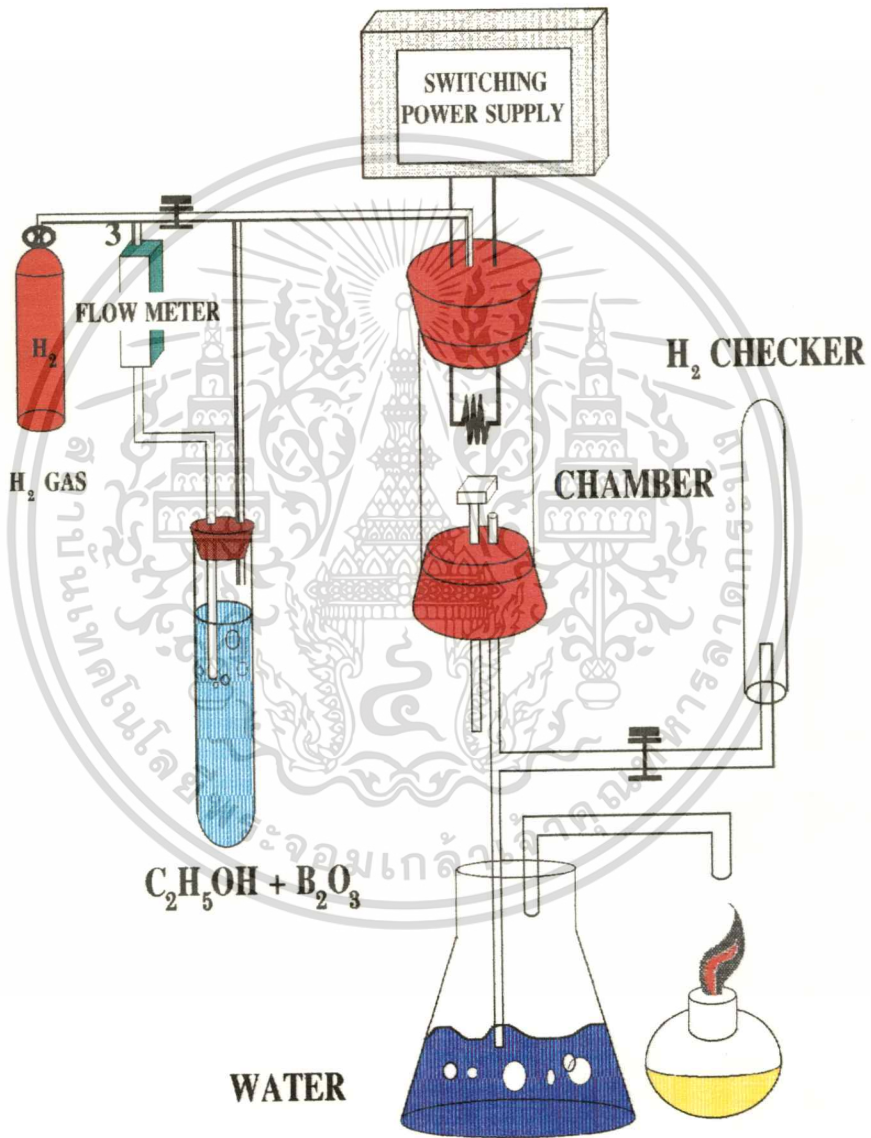
- 1) ถังก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์
- 2) เวกูเรเตอร์ของก๊าซไฮโดรเจน
- 3) FLOW METER ขนาด 20 ml/min และ ขนาด 200 ml/min
- 4) แหล่งจ่าย เช่น เททิลแอลกอฮอล์
- 5) ท่อแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 21 เซนติเมตร
- 6) นาฬิกาจับเวลา
- 7) สวิตช์ พัดลมระบายความร้อน
- 8) ปุ่ม Power
- 9) ปุ่มปรับกระแส
- 10) ขวดบรรจุน้ำสำหรับขจัดก๊าซที่ออกจากชุดทดลองท่อแก้ว
- 11) แบตเตอรี่ ขนาด 24 โวลท์ จำนวน 3 ชุด

โดยกระบวนการสร้างพิจารณา จากรูปที่ 3-3 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตรวจสอบวาล์ว 2 และ 3 ให้อยู่ในตำแหน่งที่เปิดออก
- 2) เปิดวาล์ว 1 ของถังก๊าซไฮโดรเจน ปรับวาล์ว 1 ให้ได้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 200 ml/min
- 3) ปรับวาล์ว 2 เพื่อแบ่งก๊าซ ไฮโดรเจนบางส่วนให้ไหลผ่าน ไปยังแหล่งจ่ายเททิลแอลกอฮอล์จนกระทั่ง อ่านสเกลของ Flow meter ได้อัตราการไหล 10 ml/min
- 4) ลดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน เหลือ 70 ml/min พร้อมทั้งปรับ วาล์ว 3 ให้ได้อัตราการไหล 10 ml/min จับเวลา 15 นาที
- 5) ตรวจสอบระบบว่าเป็นก๊าซไฮโดรเจน โดยเปิดวาล์ว 4 พร้อมจุดไฟเผาก๊าซในหลอด
- 6) เปิดปุ่ม POWER
- 7) เปิดพัดลมระบายความร้อนจากสวิตช์หมายเลข 1 และ 2
- 8) ปรับกระแสจากปุ่มปรับกระแส เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนให้หลอดสามารถวัดอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ
- 9) ใช้เวลาในการสร้าง 2 ชั่วโมง
- 10) ปิดแหล่งจ่ายกระแส พร้อมทั้งปิดวาล์ว 1
- 11) รอจนกระทั่งก๊าซที่ค้างอยู่ในท่อแก้วออกหมด โดยสังเกตจากฟองในน้ำในขวดรูป ชมพู
- 12) ปิดวาล์ว 2 รอจนกระทั่งระบบเย็น จึงนำชิ้นงานออกมาทดสอบคุณสมบัติ ต่าง ๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 37



แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี

การสร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี มีขั้นตอนการสร้างเช่นเดียวกับ กระบวนการสร้าง ฟิล์มเพชร ชนิดอินทรีนซิค แตกต่างกันตรงแหล่งจ่ายที่ใช้จะเป็น โบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) ดังรูปที่ 38 สำหรับวิธีการเตรียมสารละลายของโบรอนไตรออกไซด์ ในเอทิลแอลกอฮอล์ต้องมีการคำนวณ ปริมาณโบรอนไตรออกไซด์ และ เอทิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในรูปของอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ที่มีหน่วยเป็น ppm (part per million) ซึ่งแสดงการคำนวณหาปริมาณโบรอนไตรออกไซด์ ที่ค่า B/C ต่าง ๆ ในภาคผนวก ข ผสมโบรอนไตรออกไซด์ใน เอทิลแอลกอฮอล์ ตามอัตราส่วนที่ คำนวณได้ เช่น ต้องการความเข้มข้น B/C 10 ppm ต้องใช้โบรอนไตรออกไซด์ น้ำหนัก 0.0010 กรัม ผสมลงในเอทิลแอลกอฮอล์ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นต้น จากนั้นกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic stirring) จนกระทั่ง โบรอนไตรออกไซด์ ละลายหมด กระทำที่อุณหภูมิห้อง



แสดงโบรอนไตรออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น

การสร้างฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น แหล่งจ่ายที่ใช้จะเป็นการเติม อะตอมสารเจือ ฟอสฟอรัส โดยใช้ ฟอสฟอรัสเพนตรออกไซด์ (P_2O_5) โดยมีวิธีการเตรียมสารละลาย เช่นเดียวกับหัวข้อ

3.2.2

รูปที่ 39



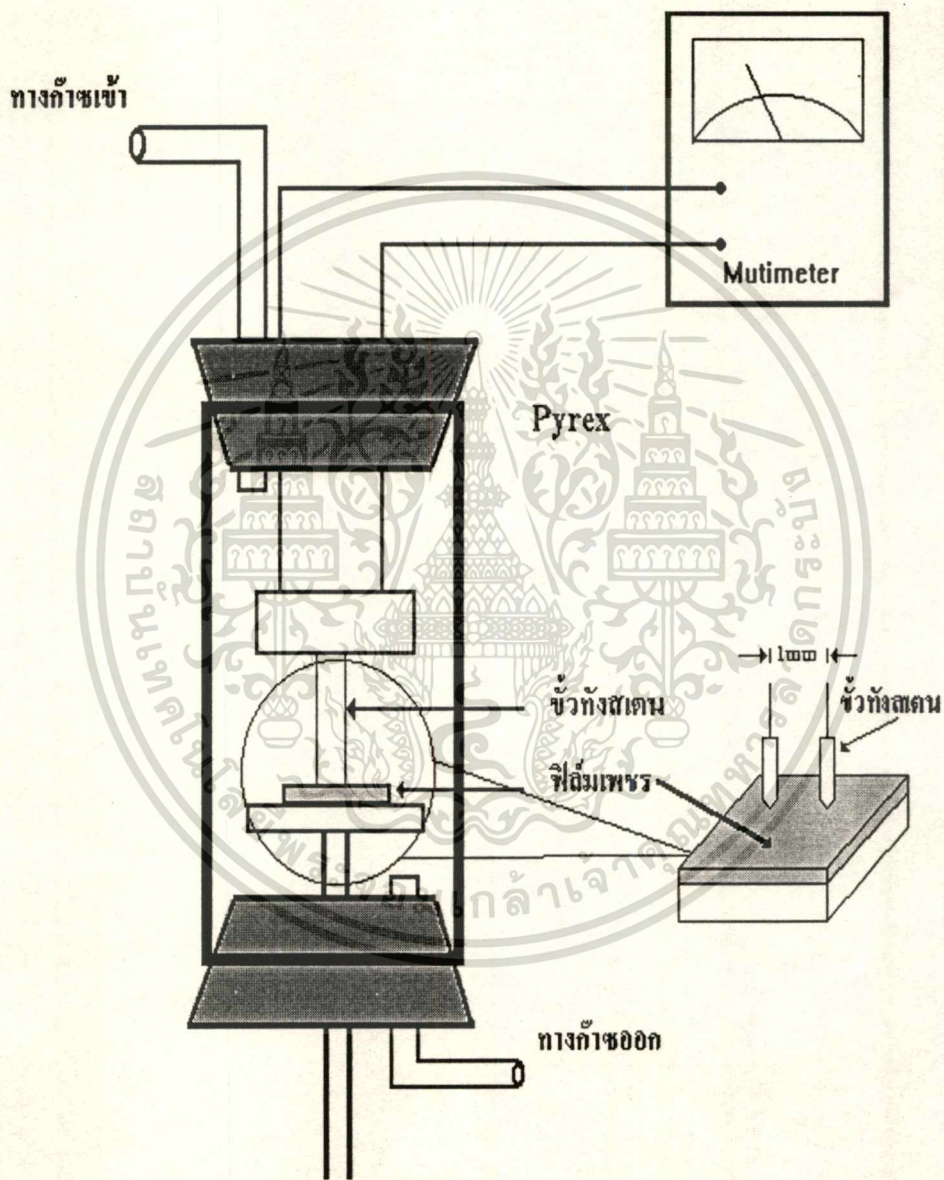
แสดงฟอสฟอรัสเพนตรออกไซด์ ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น

3.3 กระบวนการเตรียมชุดทดลอง ที่ใช้ในการศึกษาผลของก๊าซ ในอากาศ ที่มีต่อการเกิด ชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ชนิด พี

การศึกษามผลของก๊าซชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในอากาศรอบตัวเรา ต่อการเกิดพื้นผิวนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ชนิดพี ใช้หลักการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ด้วยวิธี สองขั้ว (Two point probe) โดยใช้ขั้วทั้งสองเสียบบนพื้นผิวฟิล์ม โดยระยะห่างระหว่างขั้ว เท่ากับ 1 มิลลิเมตร วัดผ่านโหม้มมิเตอร์ ซึ่งทั้งหมดกระทำในท่อแก้วที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 40



แสดงชุดท่อแก้ว CVD และวิธีการวัดความต้านทานโดยวิธีแบบสองขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิจารณา ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ง สำหรับเครื่อง Scanning Electron Microscopy ที่ใช้เป็นของ JEOL รุ่น JSM 5200 และเครื่องเคลือบทอง รุ่น JFC - 1100 E ซึ่งวิธีการใช้เครื่อง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 การเปิดเครื่องถ่าย SEM

ก่อนการใช้เครื่องทุกครั้ง เครื่อง SEM จะไม่สามารถทำงานได้ทันที ต้องมีการเปิดเครื่องไว้ก่อน ซึ่งมีวิธีการ ดังนี้คือ

1. เปิดเครื่องปรับ อากาศ เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในห้องให้คงที่
2. เปิดปุ่ม สวิตช์ ควบคุมไฟ ไปที่ตำแหน่ง ON
3. เปิดปุ่ม สวิตช์ บีมดูดอากาศ ไปที่ตำแหน่ง ON
4. หมุนปุ่ม สวิตช์ ที่มีลักษณะเป็นกุญแจ ของเครื่อง SEM ไปที่ตำแหน่ง START รอประมาณ 5 นาที
5. หมุนปุ่มกลับมาที่ตำแหน่ง ON โดยสังเกตที่จอหน้าเครื่อง มีอักษรขึ้นคำว่า DP - WAIT
6. กดปุ่ม EVAC รอจนกว่าจอหน้าเครื่อง จะเปลี่ยนเป็น คำว่า HT - READY

3.4.2 การเคลือบทองคำ

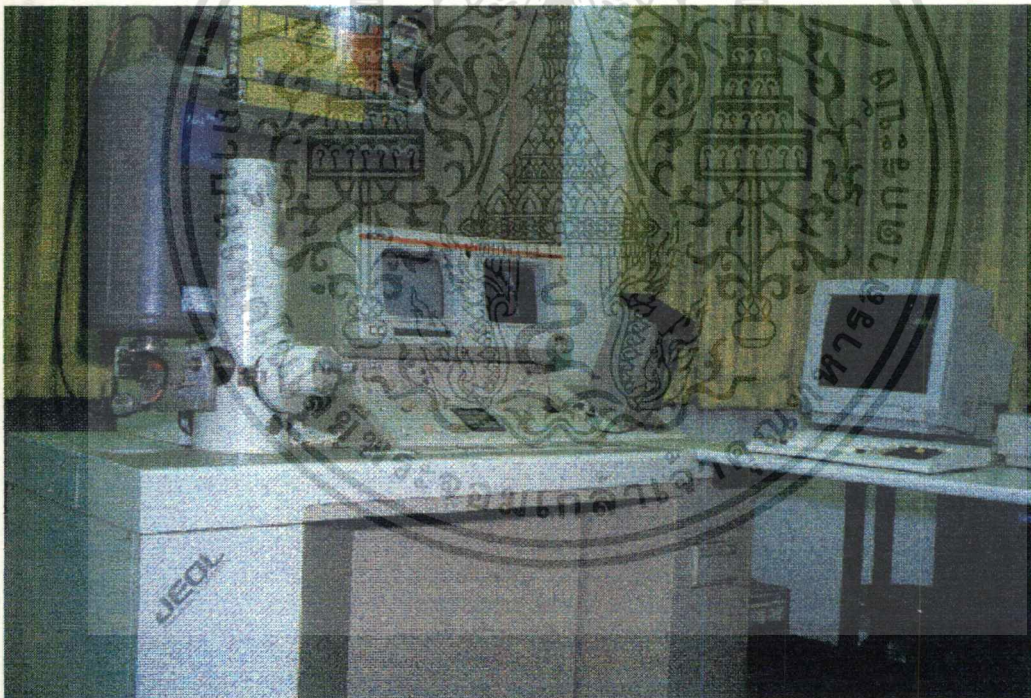
สำหรับชิ้นงานที่ไม่มีความนำ ต้องทำการเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำก่อน เช่น ทองคำ หรือ คาร์บอน ซึ่งมีวิธีการดังนี้ คือ

1. ติดชิ้นงานที่ต้องการถ่าย SEM บนแท่นทองเหลือง ด้วยเทปคาร์บอน ในเครื่องที่ใช้สำหรับเคลือบทองคำ ดังแสดงในรูปที่ 42
2. เปิดแชมเบอร์ คว้าแท่นทองเหลือง หันด้านที่มีชิ้นงานลงข้างล่าง เสร็จแล้วทำการเปิดแชมเบอร์
3. เปิดบีมดูดอากาศของเครื่องเคลือบทองคำ
4. ตั้งเวลาในการเคลือบนาน 4 นาที โดยหมุนปุ่ม HT อยู่ที่ หมายเลข 4
5. ปรับฟังก์ชันการทำงานเป็น IOAT
6. เปิดเครื่องเคลือบ รอประมาณ 4-5 นาที ไฟสัญญาณลักษณะ READY จะสว่างขึ้น
7. เปิดแชมเบอร์ นำชิ้นงานออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การใช้เครื่อง SEM

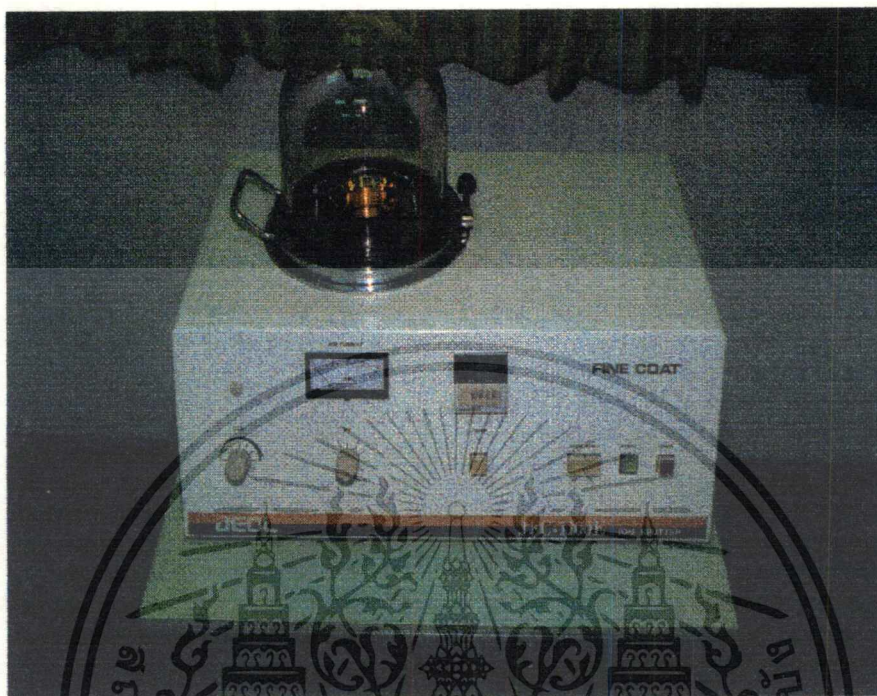
1. หลังจากเปิดเครื่องถ่าย SEM ในตอนที่ 3.4.1 แล้ว ปุ่มไฟสัญญาณลักษณะ HT - READY จะปรากฏอยู่ ให้กดปุ่ม VENT เพื่อให้อากาศเข้าไปในแชมเบอร์
2. เปิดแชมเบอร์ ใส่ชิ้นงานที่เคลือบทองเข้าไป
3. ปิดแชมเบอร์ กดปุ่มสัญญาณลักษณะ EVAC รอจนหน้าจอเครื่อง ขึ้นคำว่า HT - READY
4. ปรับปุ่ม FILAMENT ไว้ทางซ้ายสุด แล้วกดปุ่ม HT
5. ปรับปุ่ม FILAMENT ซ้ำ ๆ ไปทางด้านขวาจนสุด
6. ทำการถ่ายรูปที่ต้องการ



แสดงเครื่อง SEM รุ่น JSM - 5200 ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 42



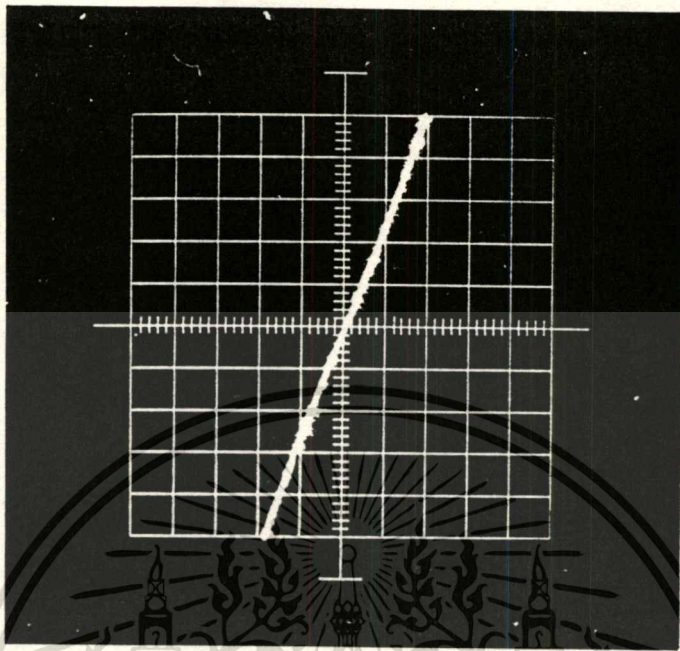
แสดงเครื่อง ที่ใช้สำหรับเคลือบทองคำ

3.5 กระบวนการสร้างไดโอด โครงสร้าง โลหะ กับ ฟิล์มเพชร

โลหะที่เกิดจากรอยต่อระหว่าง โลหะและสารกึ่งตัวนำ เงื่อนไขการเกิดโลหะต้องมีค่าฟังก์ชันงานน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาเชื่อมต่อกัน บริเวณรอยต่อเกิดมีกำแพงศักย์ขึ้น ทำให้สามารถควบคุมทิศทางการไหลของกระแสได้ โดยควบคุมจากขั้วของแรงดันที่ป้อนให้กับระบบ ดังนั้นรอยต่อที่เกิดขึ้นจึงมีคุณสมบัติเป็นไดโอด จากการศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อ ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ รอยต่อระหว่างทองคำกับฟิล์มเพชร มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบโจห์มมิก ดังกราฟรูปที่ 43 และ 44^[6] ในขณะที่รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร มีแบริเออร์เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงนำอลูมิเนียมมาสร้างเป็นส่วนหนึ่งของโลหะ เพื่อสร้างเป็น ไดโอดโครงสร้าง โลหะกับฟิล์มเพชร หรือ ซอตตีไดโอด

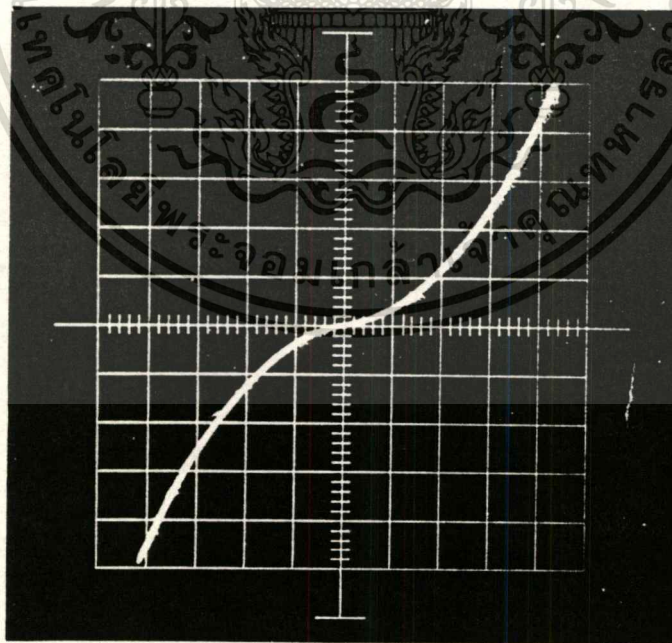
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 43



แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ของรอยต่อทองคำกับฟิล์มเพชร ชนิดพี

รูปที่ 44



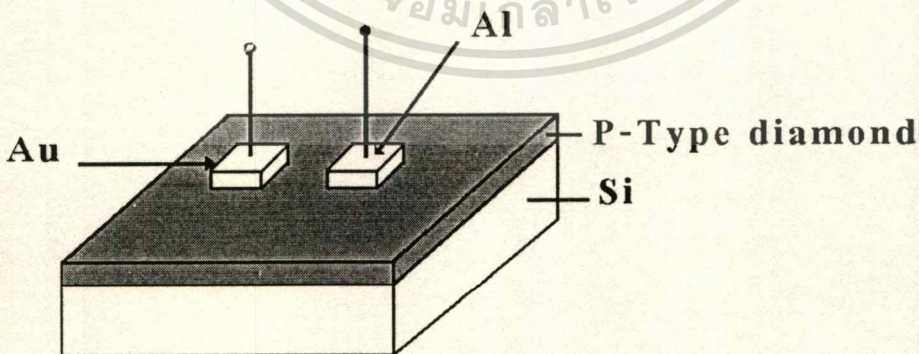
แสดงคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ของรอยต่ออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างขอตักไดโอดมีกระบวนการสร้าง ดังนี้ คือ

- 1) สร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี ตามกระบวนการ ในหัวข้อ 3.2.2
- 2) นำฟิล์มเพชรมาทำความสะอาดพื้นผิว ด้วยสารละลายอิมิตัวของ CrO_3 ร่วมกับ H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 3) ล้างด้วยสารละลายเดือดของ H_2O_2 และ 30 % NH_4OH ในอัตราส่วน 1 : 1 สำหรับการสร้างในข้อที่ 2 และ 3 เป็นวิธีการทำความสะอาดพื้นผิวของฟิล์ม ซึ่งจะทำให้ส่วนของคาร์บอนที่ไม่มีโครงสร้างเป็นเพชรหลุดออกหมด
- 4) ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI
- 5) เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยก๊าซ ไนโตรเจน
- 6) นำฟิล์มที่ทำความสะอาดแล้ว ไปทำขั้วโลหะทอง โดยการเคลือบในสุญญากาศ ที่มีความดัน $1 - 3 \times 10^{-6}$ ทอร์
- 7) นำไปกระทำกระบวนการซินเตอริง (Sintering) ที่อุณหภูมิ 890 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที
- 8) นำฟิล์มไปเคลือบอลูมิเนียม ในสุญญากาศ ที่ความดัน $1 - 3 \times 10^{-6}$ ทอร์
- 9) นำไปกระทำกระบวนการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที

รูปที่ 45



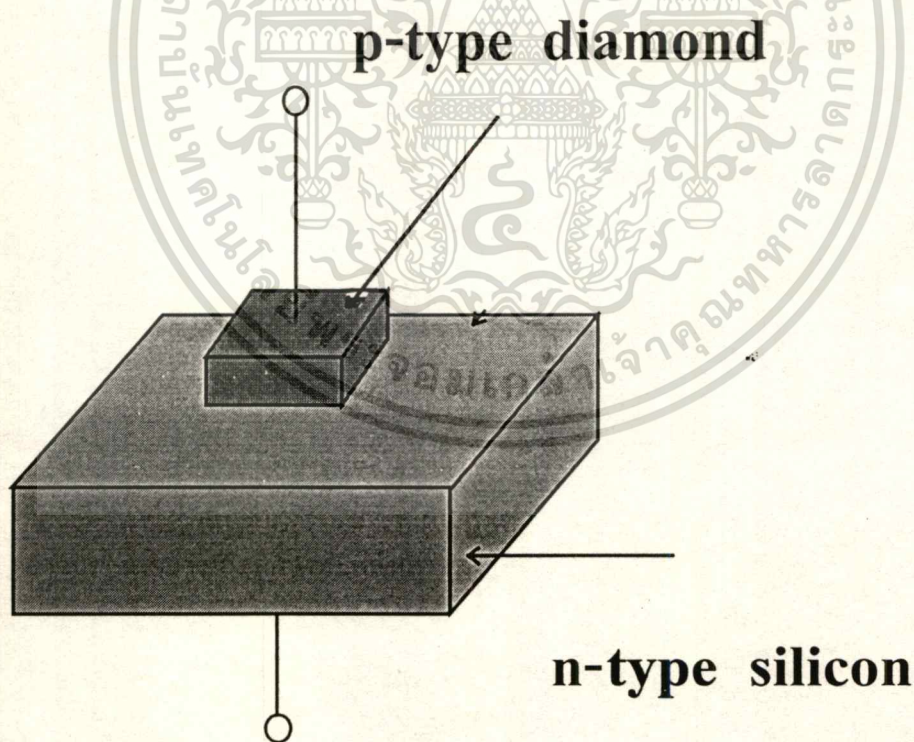
แสดงภาคตัดขวางของไดโอดโครงสร้างโลหะกับฟิล์มบางเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 กระบวนการสร้างไดโอด แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ระหว่างฟิล์มเพชร ชนิดพี กับ ซิลิกอน ชนิดเอ็น

สร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี ตามหัวข้อ 3.2.2 ลงบนฐานรองซิลิกอน ชนิดเอ็น หลังจากนั้น นำฟิล์มมาทำความสะอาดพื้นผิว ด้วยสารละลายอิมตัวของ CrO_3 และ H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นล้างด้วยสารละลาย H_2O_2 และ 30 % NH_4OH ในอัตราส่วน 1 : 1 ซึ่งวิธีการที่กล่าวมาจะทำให้ส่วนของคาร์บอนที่ไม่มีโครงสร้างเป็นเพชร หลุดออกมาหมด นำฟิล์มที่ทำความสะอาดแล้ว ไปทำขั้วโลหะทอง โดยการเคลือบในสุญญากาศที่ความดัน $1-3 \times 10^{-4}$ ทอร์ จากการเคลือบจะได้ความหนาของชั้นโลหะ ประมาณ 1 ไมครอน ขนาดประมาณ 1 ตารางมิลลิเมตร นำไปทำการกระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering) ที่อุณหภูมิ 890 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที เพื่อให้รอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร เกาะติดแน่นขึ้น สุดท้ายนำไปเคลือบกาวเงินที่ด้านล่างสุดของอุปกรณ์

รูปที่ 46



แสดงภาคตัดขวางไดโอดโครงสร้าง ฟิล์มเพชร ชนิดพี กับ ซิลิกอน ชนิดเอ็น ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และ ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาฟิล์มเพชร

หลังจากประสบความสำเร็จในการสร้างฟิล์มเพชร นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ โดยเริ่มตั้งแต่การค้นพบเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดฟิล์มเพชร การวิเคราะห์ลักษณะของฟิล์มจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ และ SEM การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มด้วย Raman Spectroscopy และ การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มด้วยวิธี เข็มร้อน (Hot - point probe) ตามลำดับ สำหรับรายละเอียดได้กล่าวต่อไป

4.1.1 การพัฒนาการสร้างฟิล์มเพชร

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึง กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยเริ่มตั้งแต่ กระบวนการเตรียมแผ่นฐานรอง เพื่อใช้เป็นที่สำหรับสร้างฟิล์มเพชร หลังจากนั้นจึงทำการสร้างฟิล์มเพชร ด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน จากชุดเครื่องมือ ที่ประกอบขึ้น พบว่า การสร้างฟิล์มเพชรให้มีคุณภาพดีนั้น มีพารามิเตอร์หลายอย่างที่มีผลต่อคุณภาพของฟิล์ม พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของฟิล์มเพชร คือ อุณหภูมิของฐานรองและเปอร์เซ็นต์ของเอทิลแอลกอฮอล์ ใน ก๊าซไฮโดรเจน สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองหลาย ๆ ครั้ง ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจากอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นนี้ อุณหภูมิของฐานรองจะมีผลต่อการเกิดลักษณะของฟิล์มเพชร สามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3

แสดงผลของอุณหภูมิของฐานรองต่อการเกิดลักษณะฟิล์มเพชร

อุณหภูมิของฐานรอง (องศาเซลเซียส)	ลักษณะฟิล์มเพชร
600 - 800	ระนาบ (111)
900 - 1000	ระนาบ (100)
ระหว่าง 800 - 900	ระนาบรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอุณหภูมิของไส้หลอดมีค่า 2300 องศาเซลเซียส โดยการเทียบความสว่างกับหลอดไฟ 100 วัตต์ (ชนิดดวงกลมไส้ทั้งสแตน) เนื่องจาก กระแสที่ไหลในเครื่องมือที่ใช้ทดลอง มีค่าประมาณ 7 ถึง 8 แอมแปร์ ที่ 12 - 15 โวลท์ ซึ่งจากการวัดอุณหภูมิของไส้หลอดไฟ 100 วัตต์ พบว่ามีอุณหภูมิ ประมาณ 2300 องศาเซลเซียส

ระยะห่างระหว่างไส้หลอดและฐานรองมีค่าเป็น 1 มิลลิเมตร เป็นข้อสังเกตได้ว่า ถ้าควบคุมระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง ให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร ตลอด จะสามารถเพิ่มขนาดของผลึกเพชรได้ ส่วนเปอร์เซ็นต์ของเอทิลแอลกอฮอล์ในก๊าซไฮโดรเจน มีค่าเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผ่านไปในเอทิลแอลกอฮอล์ ให้มีค่า 10 มิลลิลิตร / นาที ใช้เวลาในการสร้าง 2 ชั่วโมง ความหนาของฟิล์มที่สร้างมีค่าประมาณ 10 - 15 ไมครอน นอกจากนี้ จุกยางที่หลอดแชมเบอร์ ที่ใช้สร้างต้องปิดให้แน่นที่สุด ไม่ให้ก๊าซออกซิเจนจากภายนอกแพร่ซึมเข้าไปได้ สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์มเพชรของชุดทดลองระบบ CVD แบบความร้อน ที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4

แสดงเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์ม

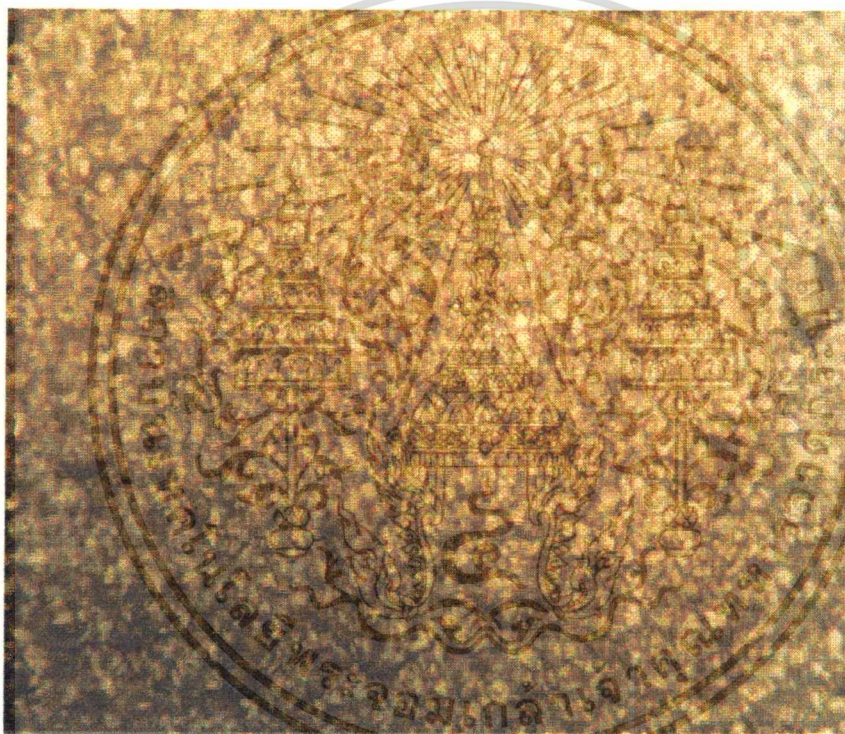
ชนิดของฐานรอง	ซิลิกอน
อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน	10 มิลลิลิตร / นาที
อัตราส่วนของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อก๊าซไฮโดรเจน	14 % โดยปริมาตร
ความดันก๊าซ	ความดันบรรยากาศ
ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง	1 มิลลิเมตร
ระยะเวลาในการสร้าง	2 ชั่วโมง
ความหนาของฟิล์มเพชร	10 - 15 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มจากกล้องจุลทรรศน์

หลังจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน สามารถตรวจสอบว่าการสร้างจะเกิดฟิล์มเพชรหรือไม่ สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีอย่างง่ายที่สุด ด้วยวิธีการแรก คือนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการตรวจสอบลักษณะจาก กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งจะพบลักษณะของฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 47 , 48 , 49 และ 50 ตามลำดับ

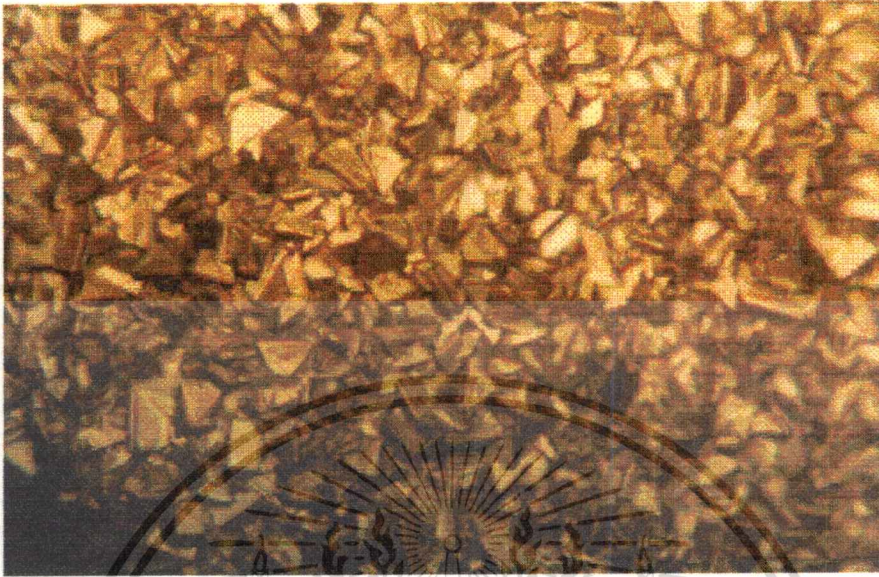
รูปที่ 47



แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรจากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์

กำลังขยาย 200 เท่า

รูปที่ 48



แสดงลักษณะของฟิล์มเพชรจากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์
กำลังขยาย 400 เท่า

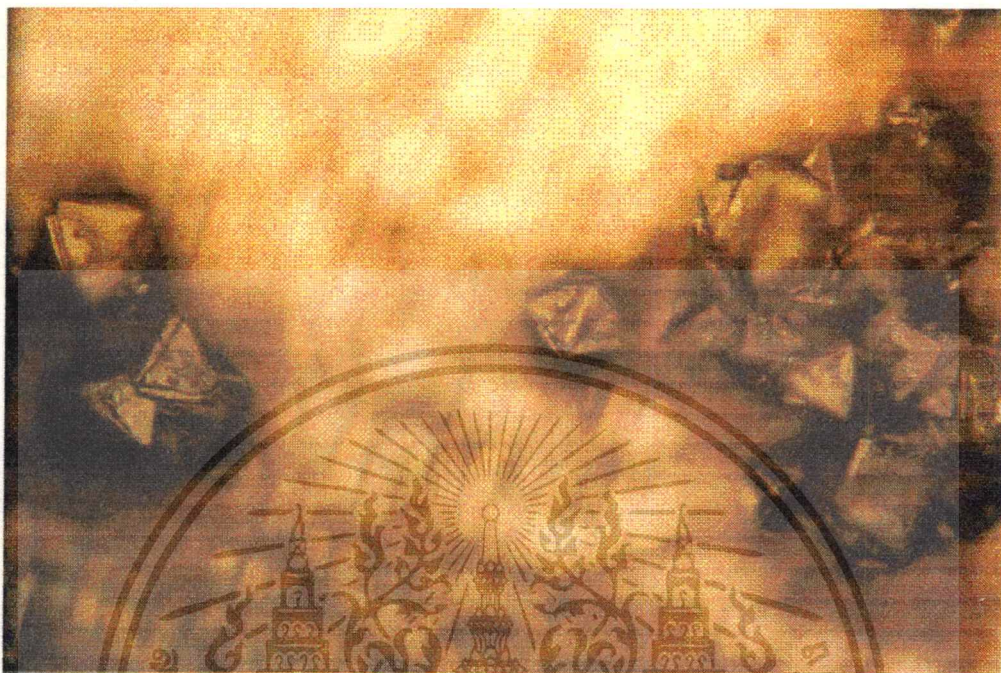
รูปที่ 49



แสดงลักษณะของผลึกเพชรจากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์
กำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 50



แสดงลักษณะของผลึกเพชรจากการตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์
กำลังขยาย 400 เท่า

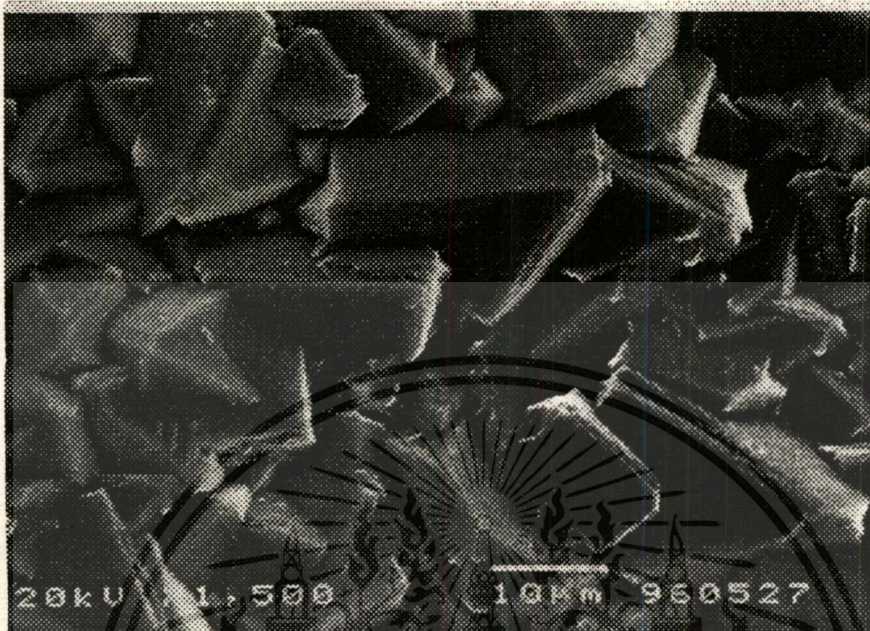
จากตัวอย่างลักษณะของฟิล์มเพชร จะเห็นได้ว่า ยังไม่สามารถกำหนดครณะหรือลักษณะของฟิล์มเพชรได้แน่นอน จึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงกว่านี้ เพื่อตรวจสอบลักษณะฟิล์มเพชรอย่างชัดเจน

4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะของฟิล์มจากภาพถ่าย SEM (Scanning Electron Microscopy)

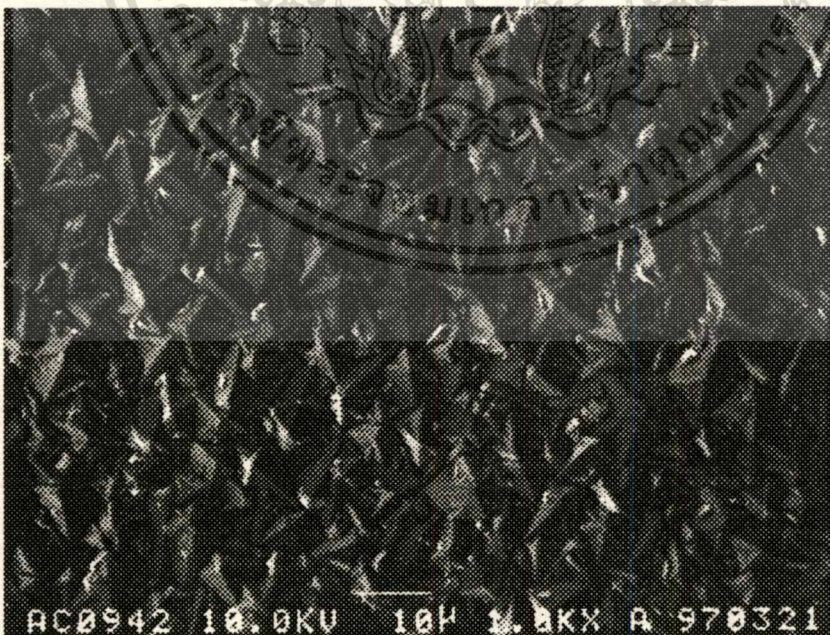
SEM เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน ซึ่งกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาไม่สามารถมองเห็นได้ จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ นำฟิล์มเพชรไปทำการดูลักษณะของฟิล์มจากเครื่อง SEM ทำให้สามารถบอกระนาบของฟิล์มได้โดยตรง จากลักษณะของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 51



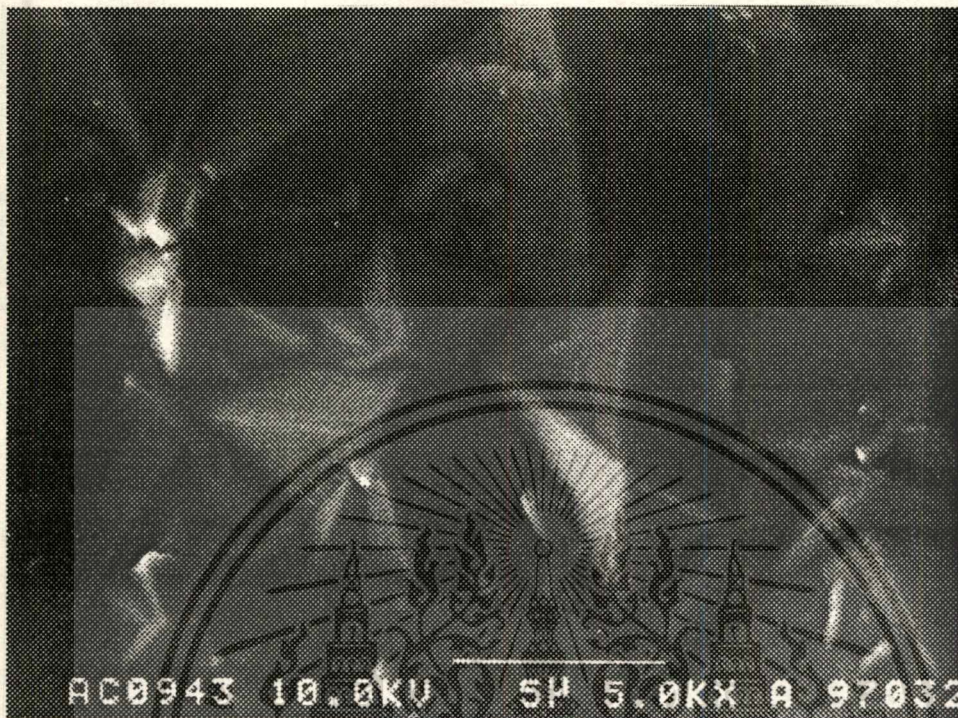
แสดงลักษณะของฟิล์มเพชร ระนาบ (111) ที่อุณหภูมิฐานรอง 800 องศาเซลเซียสจากการตรวจ
 สอบด้วย SEM
 รูปที่ 52



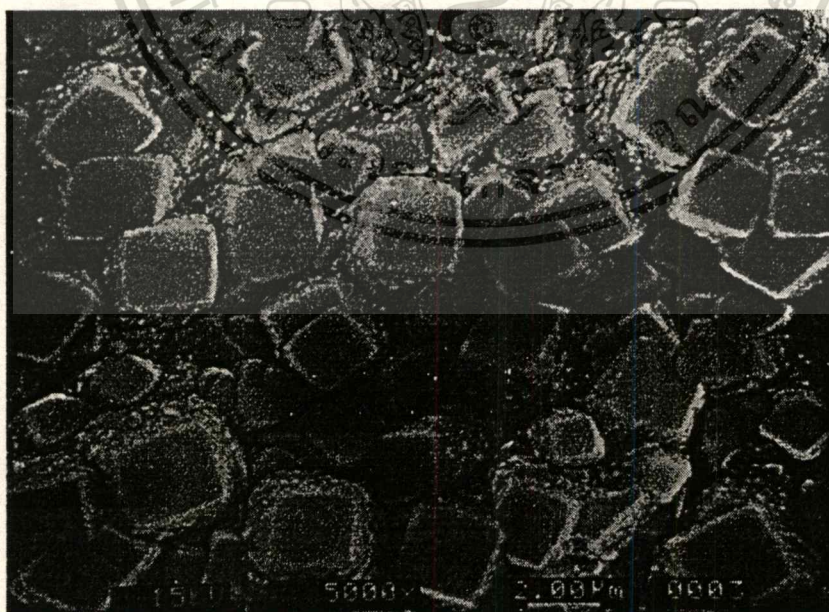
แสดงลักษณะของฟิล์มเพชร ระนาบ (111) ที่อุณหภูมิฐานรอง 750 องศาเซลเซียสจากการตรวจ
 สอบด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 53



แสดงลักษณะของฟิล์มเพชร ระนาบ (111) ที่อุณหภูมิฐานรอง 750 องศาเซลเซียสจากการตรวจ
 สอบด้วย SEM
 รูปที่ 54



แสดงลักษณะของฟิล์มเพชร ระนาบ (100) ที่อุณหภูมิฐานรอง 950 องศาเซลเซียสจากการตรวจ
 สอบด้วย SEM

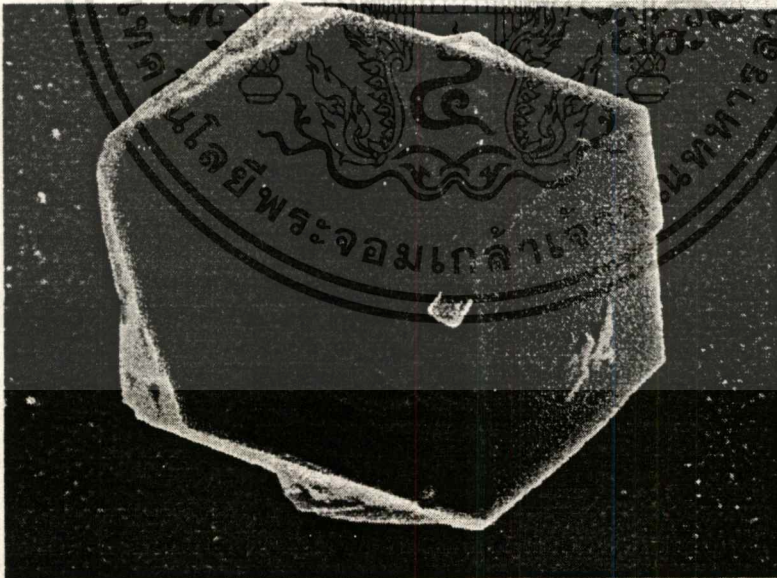
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 55



แสดงลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มเพชร จากการตรวจสอบด้วย SEM

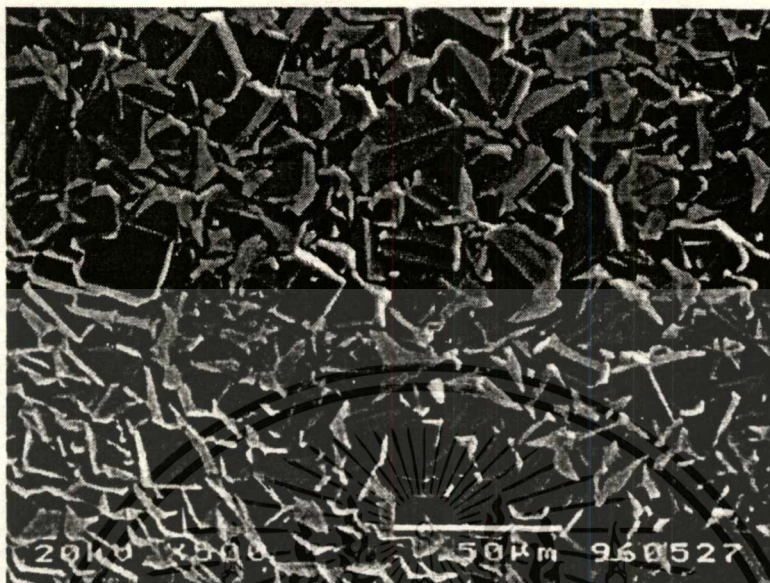
รูปที่ 56



แสดงลักษณะของผลึกเพชร ที่มองจากส่วนยอดของผลึก จากการตรวจสอบด้วย SEM

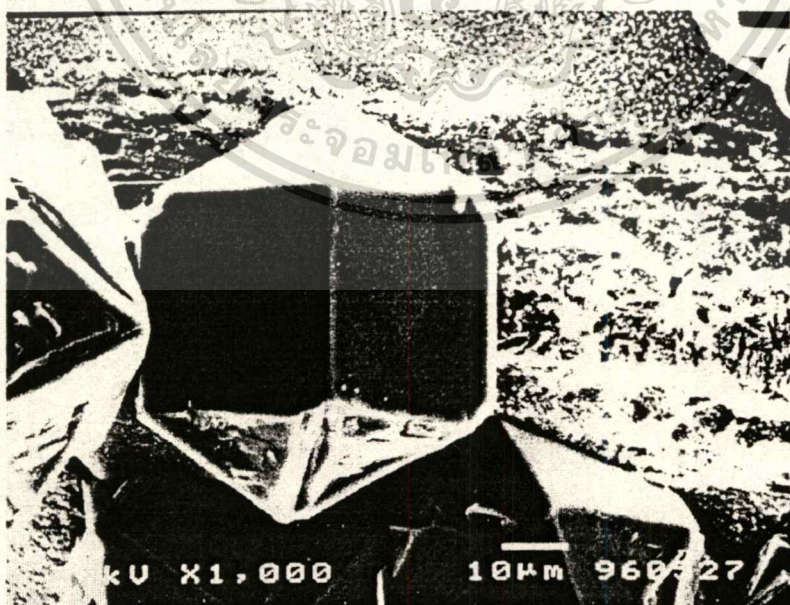
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 57



แสดงลักษณะของฟิล์มเพชร ระบายรวม จากการตรวจสอบด้วย SEM

รูปที่ 58

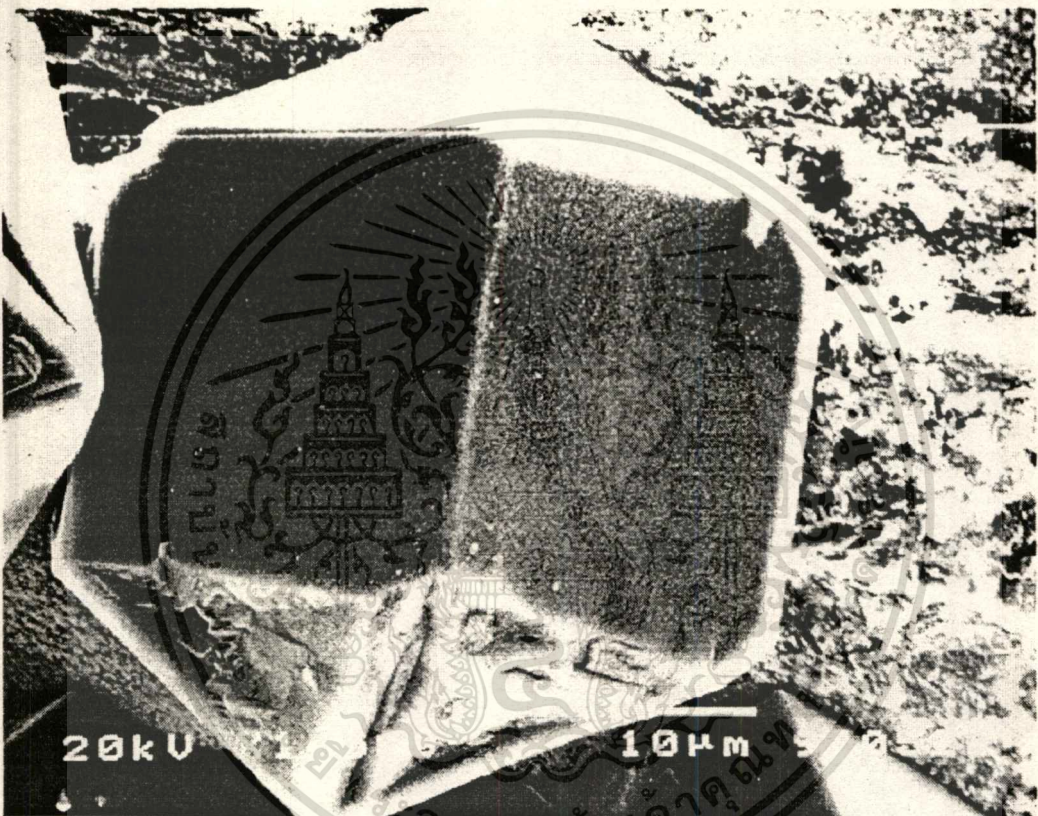


แสดงลักษณะของผลึกเพชร ที่มองจากด้านข้างของผลึก จากการตรวจสอบด้วย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 59

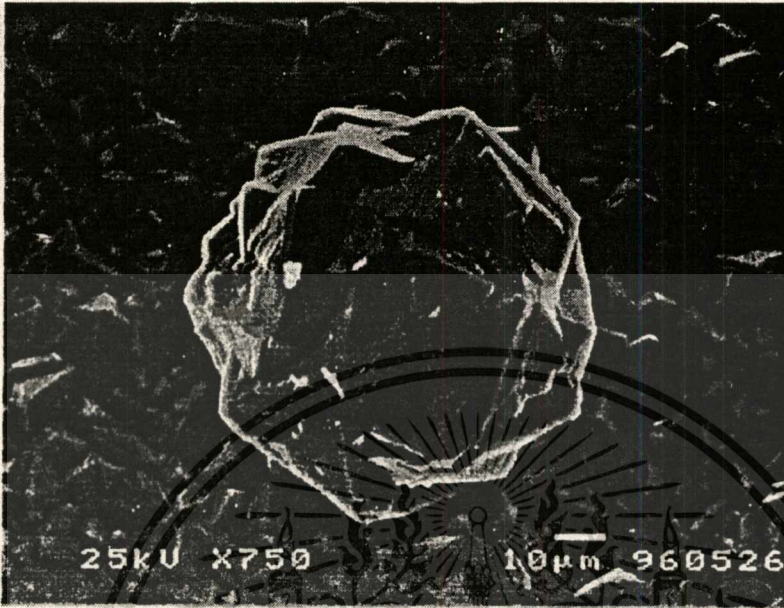


แสดงลักษณะของผลึกเพชร ขนาด 50 ไมครอน จากการตรวจสอบด้วย SEM

จากรูปที่ 59 เป็นผลึกเพชรที่สร้างได้จากวิธีการ CVD แบบความร้อน ที่มีขนาด 50 ไมครอน ซึ่งเป็นผลึกเพชรที่สร้างจากวิธีความดันต่ำ ขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่มีการรายงาน ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 60



แสดงการเกิดฟิล์มเพชรครั้งที่สอง บนฟิล์มเพชรเดิม ในการสร้างคราวเดียวกัน

รูปที่ 61



แสดงการเกิดผลึกเพชรครั้งที่สองบนผลึกเพชรเดิม ในการสร้างคราวเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 60 และ 61 จะเห็นว่าสามารถสร้างผลึกเพชรให้เกิดขึ้นอีกครั้งบนผลึกเพชรเดิมได้ และนอกจากนี้ยังสามารถสร้างฟิล์มเพชรครั้งที่สองบนฟิล์มเพชรเดิม ได้ ซึ่งจะนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างรอยต่อฟิล์มเพชร ได้หลาย ๆ ชั้น เช่น การสร้างฟิล์มเพชร ชนิดพี ลงบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนิก เป็นต้น

4.1.4 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

วิธีการวัดด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นวิธีหนึ่งที่จะตรวจสอบว่าฟิล์มเพชรที่สร้างได้แสดงคุณสมบัติเป็นเพชร และสามารถบอกทิศทางระนาบ ซึ่งวิธีนี้สามารถวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแลกทิกซ์ ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยอาศัย Bragg's law ดังสมการที่ 4-1

$$2 d \sin \theta = n \lambda \quad (4-1)$$

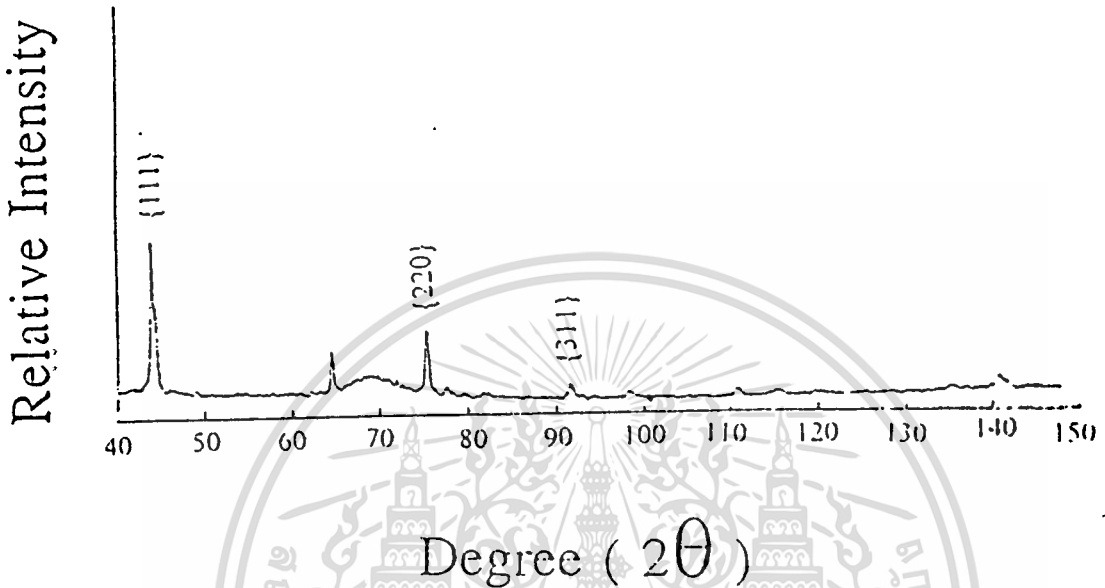
โดยที่ d = ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม (interplanar spacing)

2θ = มุมที่เกิดจากการเลี้ยวเบนและสอดคล้องกับสมการของแบร็ก

λ = ความยาวคลื่น

คำนวณหาค่า ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม (d) นำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของเพชร จากตาราง ASTM (6-675) ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงได้ดังรูปที่ 61

รูปที่ 62



แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากรูปที่ 62 เป็นตัวอย่างการนำฟิล์มเพชร ไปวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากเครื่อง Diffractometer ขนาดเล็ก ของ TELTRON (ภาควิชาฟิสิกส์) จากรูปจะเห็นว่าที่ตำแหน่ง $2\theta = 44.09$ หรือ $\theta = 22.045$ เนื่องจากเป็นการเลี้ยวเบนอันดับแรก ดังนั้น $n = 1$ และแหล่งจ่ายรังสีเอ็กซ์ที่ใช้เป็นของ $(\text{Cu.K}\alpha)$ ซึ่งมีค่าความยาวคลื่น (λ) 0.154×10^{-9} เมตร หรือ 1.54 อังสตรอม เมื่อแทนค่าในสมการ 4-1 จะได้

$$\begin{aligned} d &= n\lambda(\text{Cu.K}\alpha) / 2 \sin \theta \\ &= 1.5418 / 2 \sin 22.045 \\ &= 2.054 \text{ อังสตรอม} \end{aligned}$$

นำค่า ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม (d) ที่คำนวณได้ นำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน interplanar spacing ของเพชร ในตารางที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5

แสดงค่าระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม มาตรฐานของเพชร (ASTM 6-675)

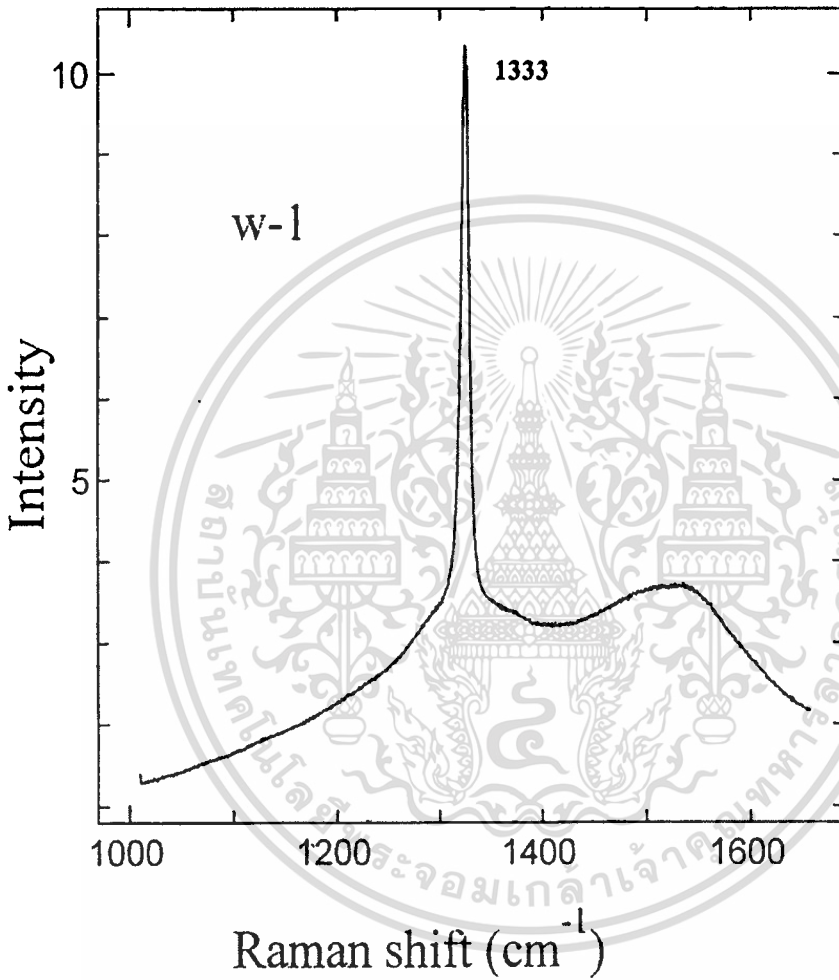
interplanar spacing (A)	hkl
2.06	111
1.261	220
1.0754	311
-	222
0.8916	400
0.8182	331
0.7280	422
0.6864	511,333
0.6305	440
0.6029	531

ผลการคำนวณ ค่า ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมของฟิล์มเพชร เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงเป็นข้อมูลที่ยืนยันได้ว่า ฟิล์มที่ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชร

4.1.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม ด้วย Raman Spectroscopy

สามารถยืนยันฟิล์มเพชรที่สร้างได้ ว่าแสดงคุณสมบัติเป็นเพชรจริงหรือไม่ โดยการนำไปวิเคราะห์ คุณสมบัติของฟิล์ม ด้วยวิธี Raman Spectroscopy ซึ่งเพชรในธรรมชาติ Raman สเปกตรัม มียอดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} จากรูป 63 และรูป 64 แสดงตัวอย่างฟิล์มเพชร 2 ตัวอย่าง ที่นำไปวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

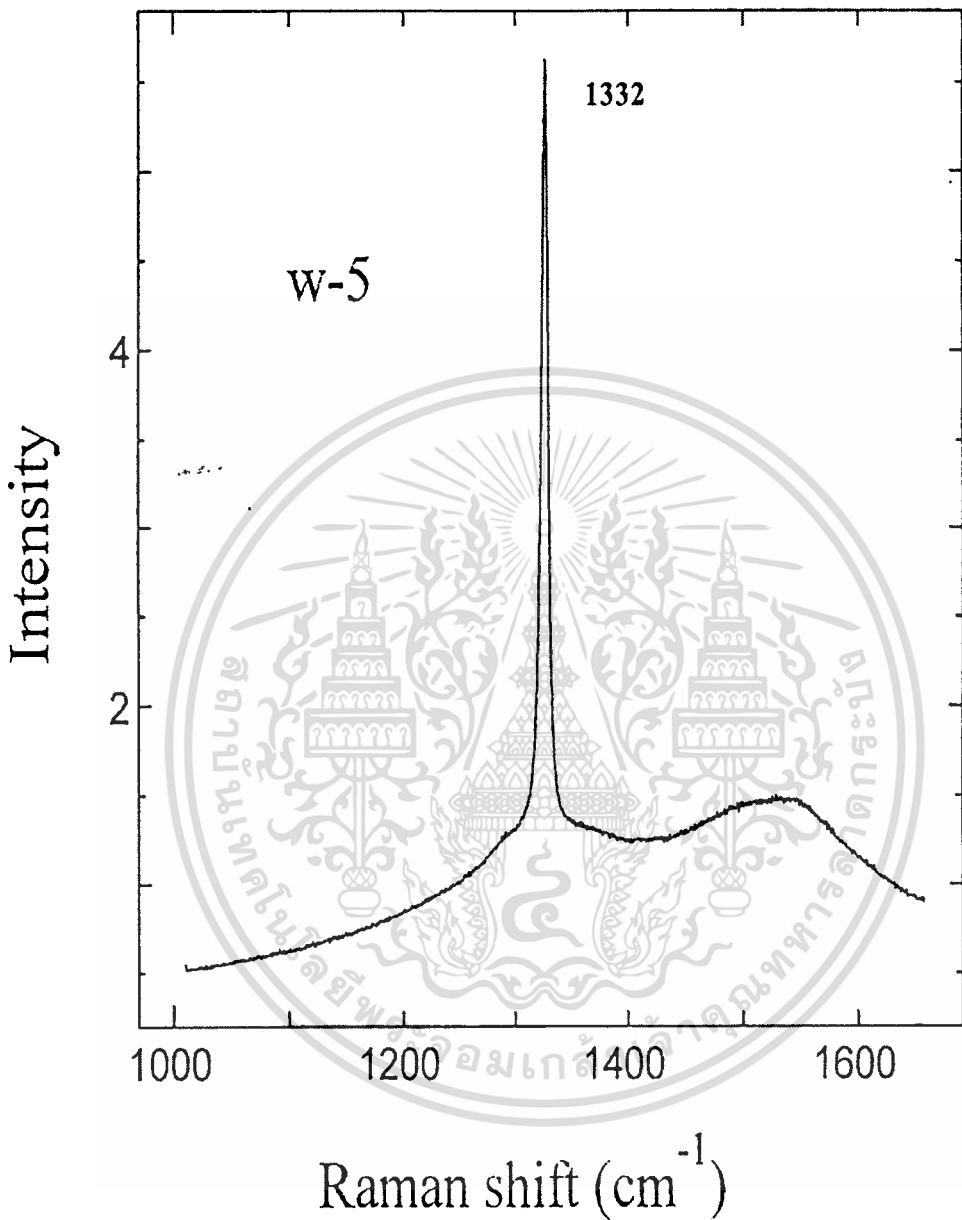
รูปที่ 63



แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ของตัวอย่างฟิล์ม หมายเลข 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 64



แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ของตัวอย่างฟิล์ม หมายเลข 5

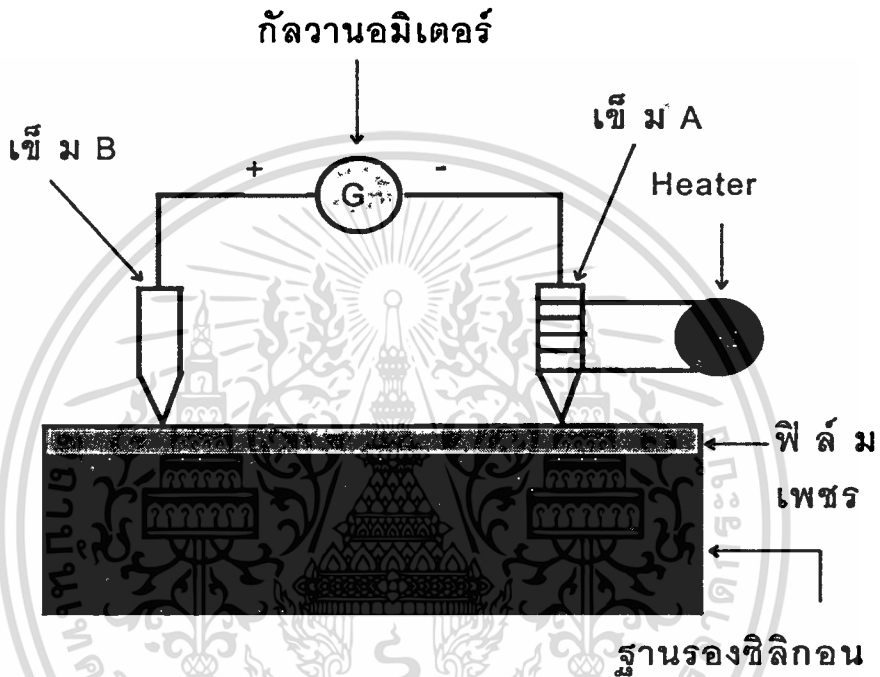
จาก Raman สเปกตรัม ของตัวอย่างที่ 1 ในรูปที่ 63 และของตัวอย่างที่ 5 ใน รูปที่ 64 จะเห็นได้ว่า มียอดใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่า ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติ เป็นเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ด้วยวิธี เข็มร้อน

หลังจากสร้างฟิล์มเพชรเสร็จแล้ว นำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปทำการวิเคราะห์หาชนิด ความนำไฟฟ้าของฟิล์ม ด้วยวิธี เข็มร้อน ดังแสดงในรูปที่ 65 และหลักการแสดงในภาคผนวก ค

รูปที่ 65



แสดงอุปกรณ์การหาชนิดของพาหะในการนำกระแสของฟิล์มเพชร

4.1.6.1 การตรวจสอบฟิล์มเพชร ชนิดพี

เริ่มจากการนำฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือปนในหัวข้อที่ 3.2.2 มาทดสอบ ซึ่งผลการทดลองที่ได้หลังจากให้ความร้อนกับเข็มร้อน ปรากฏว่า เข็มของกัลวานอมิเตอร์ ชี้เอนไปทางด้านบวก แสดงว่า พาหะหลักในการนำกระแสของฟิล์มเพชร ที่ทำการวัด คือ โฮล จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าฟิล์มเพชร ที่สร้างได้มีคุณสมบัติ เป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี

4.1.6.2 การตรวจสอบฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น

ทำการทดสอบเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.6.1 โดยการนำฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น ที่สร้างได้ในหัวข้อ 3.3.3 มาทดสอบ ตามหลักการแล้ว เข็มของ กัลวานอมิเตอร์ จะต้องชี้ไปทางด้านลบ ซึ่งแสดงว่าพหุหลักในการนำกระแสของฟิล์มเพชร ที่ทำการวัด คือ อิเล็กตรอน จึงจะยืนยันได้ว่า ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ มีคุณสมบัติเป็น สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น แต่ปรากฏว่า หลังจากนำฟิล์มเพชรที่เจืออะตอมสารเจือฟอสฟอรัส มาทำการทดสอบ ปรากฏว่า เข็มของกัลวานอมิเตอร์ ยังคงชี้เอนไปทางด้านบวก ซึ่งหมายถึงฟิล์มเพชรที่สร้างได้ ยังคงแสดงเป็น ชนิดพี จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างฟิล์มเพชร ชนิดเอ็นได้ ในกรณีที่สร้างด้วย หลักการ CVD แบบความร้อน และสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์นี้ สามารถศึกษา และ พิสูจน์ได้จากการทดลอง ในหัวข้อที่ 4.2

4.2 การศึกษาผลของก๊าซในอากาศ ที่มีต่อการเกิดชั้นพื้นผิวหน้าไฟฟ้า ของฟิล์ม เพชร

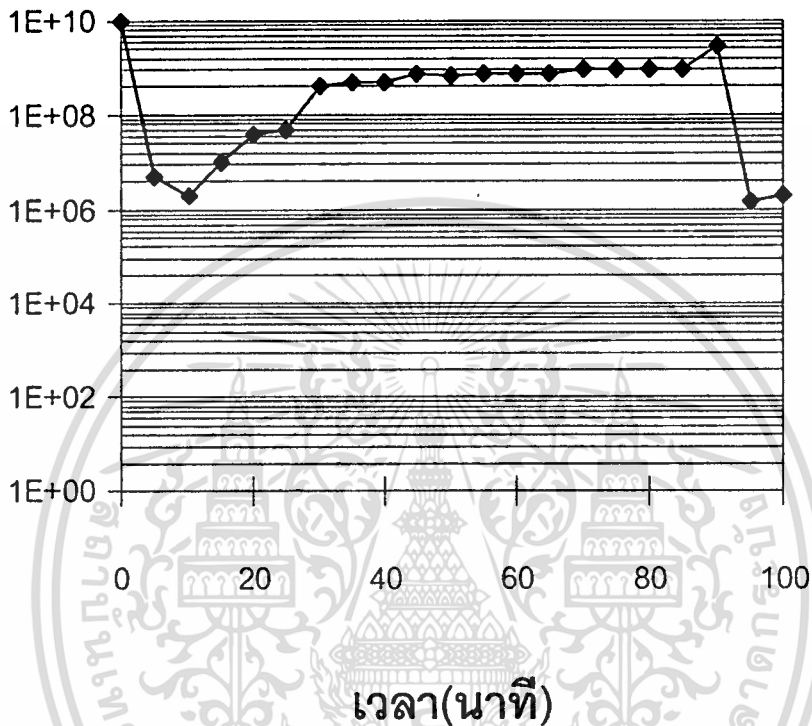
จากการสังเกตในขณะที่ทดลองสร้าง ฟิล์มเพชรในท่อแก้ว CVD จะพบว่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่พื้นผิว จะมีค่าสูงมาก และมีค่าเท่าเดิม เมื่อขึ้นสารยังอยู่ในระบบ (ในท่อแก้ว CVD) แต่ค่าความต้านทานจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีการเปิดระบบสู่อากาศ แสดงว่า อากาศที่อยู่รอบ ๆ พื้นผิวของชั้นสารอาจสนับสนุนต่อการก่อตัวของการเกิดชั้นนำไฟฟ้า ของฟิล์มเพชร แต่อากาศยังประกอบด้วยก๊าซ ชนิดต่าง ๆ หลายชนิดด้วยกัน จึงมีการตรวจสอบหาว่าก๊าซชนิดใดบ้างที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มเพชร โดยมีวิธีการทดลองในตอนต่อไป

4.2.1 การทดสอบผลของอากาศที่มีต่อการเกิดฟิล์มเพชร

เพื่อที่จะทดสอบว่า อากาศที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มเพชร โดยทำการขับก๊าซทั้งหมดออกจากท่อแก้ว CVD ทำการวัด ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ฟิล์มทันที หลังจากการสร้างฟิล์มเพชรเสร็จ จะพบว่า ค่าความต้านทานพื้นผิวมีค่าสูงมาก ต่อมาปล่อยอากาศจากภายนอกเข้าไปในชุดทดลอง ทำการวัดค่าความต้านทาน ซึ่งผลที่ได้แสดงในกราฟ รูปที่ 66

รูปที่ 66

ความต้านทาน(โอห์ม)



แสดงผลของอากาศที่มีต่อความต้านทานไฟฟ้าของ ฟิล์มเพชร

จากกราฟจะพบว่า ในขณะที่ไส้ก๊าสเข้าไปในชุดทดลอง (ท่อแก้ว CVD) จะพบว่า ค่าความต้านทานมีค่าลดลง เมื่ออากาศถูกปล่อยไปในระบบ ที่ เวลา $t = 5$ นาที และจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เมื่ออากาศถูกขับออกจากระบบที่เวลา $t = 15$ นาที ทดลองใส่อากาศเข้าไปอีกครั้ง ที่เวลา $t = 90$ นาที พบว่า ค่าความต้านทานลดลงทันทีที่อากาศถูกใส่เข้าไป จากผลการทดลองที่ได้ แสดงว่า อากาศที่ล้อมรอบตัวเรา มีบทบาทสำคัญในการก่อตัวของการเกิดชั้นนำไฟฟ้า ฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

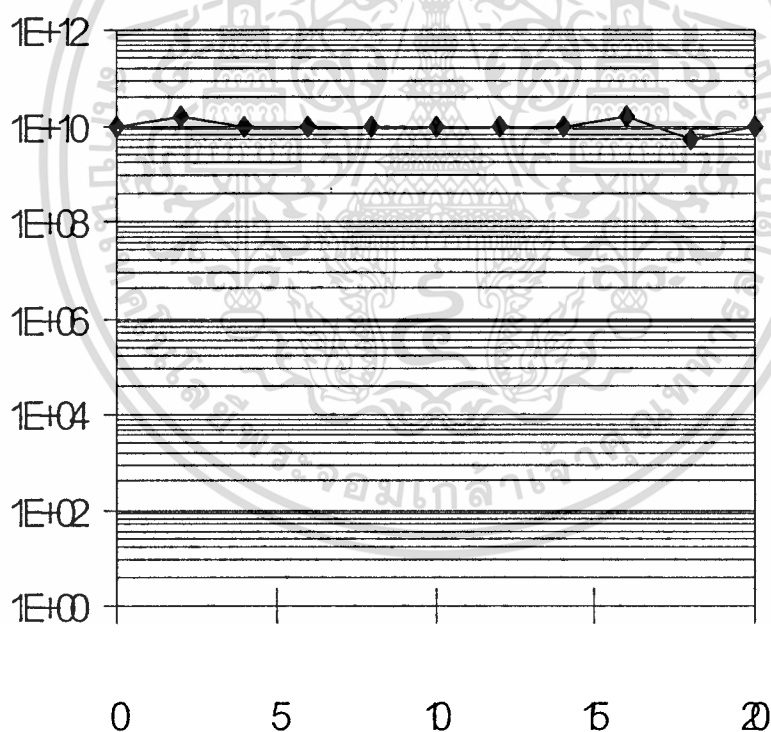
4.2.2 การทดสอบก๊าซที่เป็นองค์ประกอบหลักในอากาศปกติ

ต่อการเกิดฟิล์มเพชร

เนื่องจากในอากาศประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดด้วยกัน จึงจะทำการทดสอบว่าก๊าซชนิดใดที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มเพชร โดยองค์ประกอบหลักของก๊าซปกติ จะประกอบด้วย ก๊าซออกซิเจน (O_2) ไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งการทดสอบโดยการนำก๊าซแต่ละชนิดเหล่านี้ผ่านไปยังชุดทดลอง ทดสอบหาค่าความต้านทานไฟฟ้า เช่นเดียวกับตอนแรก ซึ่งจะได้ผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 67 , 68 , 69 และ 70 ตามลำดับ

รูปที่ 67

ความต้านทาน(โอห์ม)



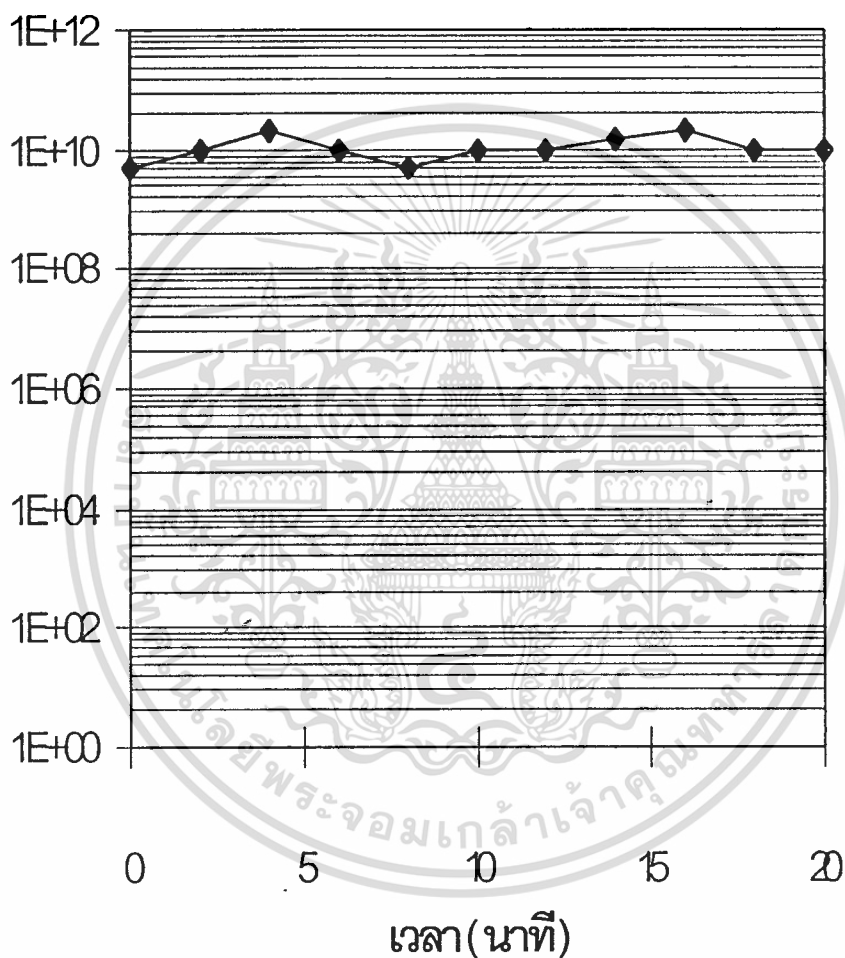
เวลา(นาที)

แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้า พื้นผิวฟิล์มเพชร กับก๊าซออกซิเจน (O_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 68

ความต้านทาน (โอห์ม)

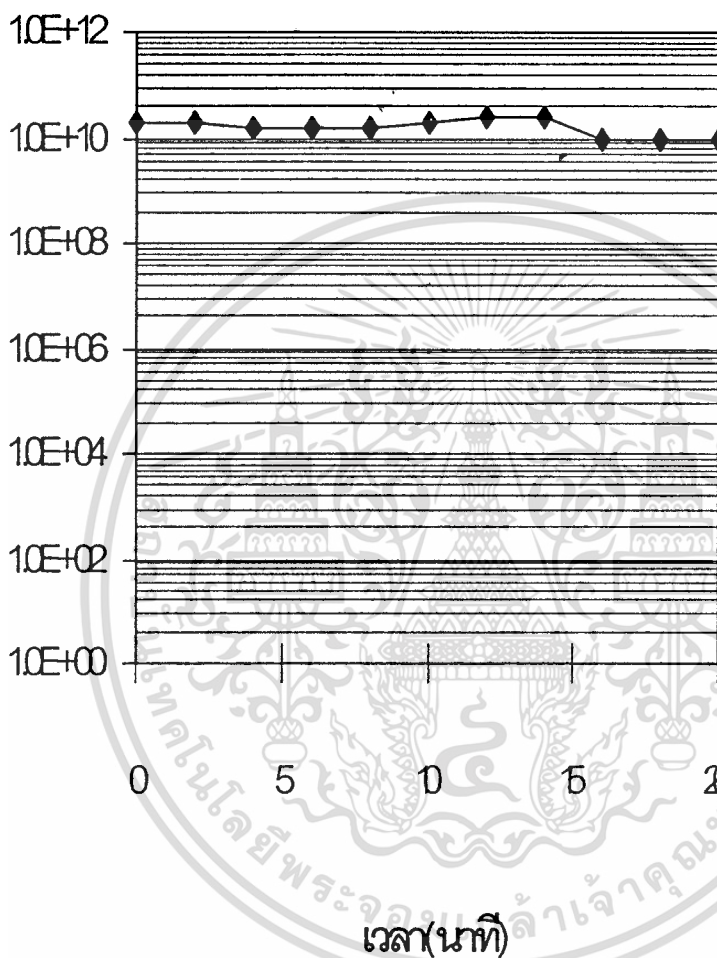


แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้า พื้นผิวฟิล์มเพชร กับก๊าซไนโตรเจน (N_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 69

ความต้านทาน(โอห์ม)

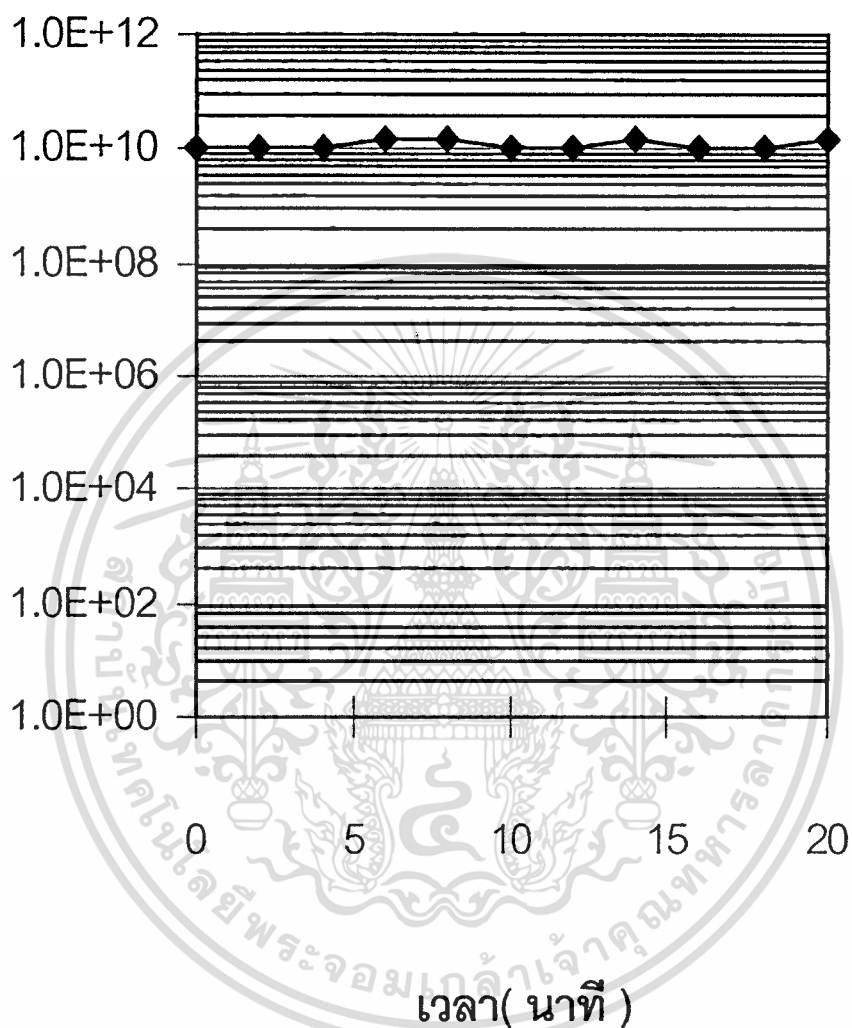


แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้า พื้นผิวฟิล์มเพชร กับก๊าซคาร์บอน
ไดออกไซด์ (CO_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 70

ความต้านทาน(โอห์ม)



แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้า พื้นผิวฟิล์มเพชร กับก๊าซไฮโดรเจน (H_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่ได้ทั้ง 4 รูป จะได้ว่า แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้า ใน ก๊าซแต่ละชนิดที่ทำการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า ก๊าซเหล่านี้ ไม่ได้มีผลสนับสนุน ต่อการเกิดชั้นพื้น ผิวหน้าไฟฟ้า

4.2.3 การทดสอบไอของกรด และ ไอของด่างต่อการเกิดฟิล์ม

เพชร

จากการทดสอบที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าก๊าซที่เป็นองค์ประกอบหลัก ตามปกติของอากาศ ไม่มีผลต่อการเกิดฟิล์มเพชร ซึ่งเป็นไปได้ว่า จะต้องมีก๊าซบางชนิดที่รวมอยู่กับอากาศ อาจจะมี ผลต่อ การเกิดชั้นนำไฟฟ้าพื้นผิวฟิล์มเพชร

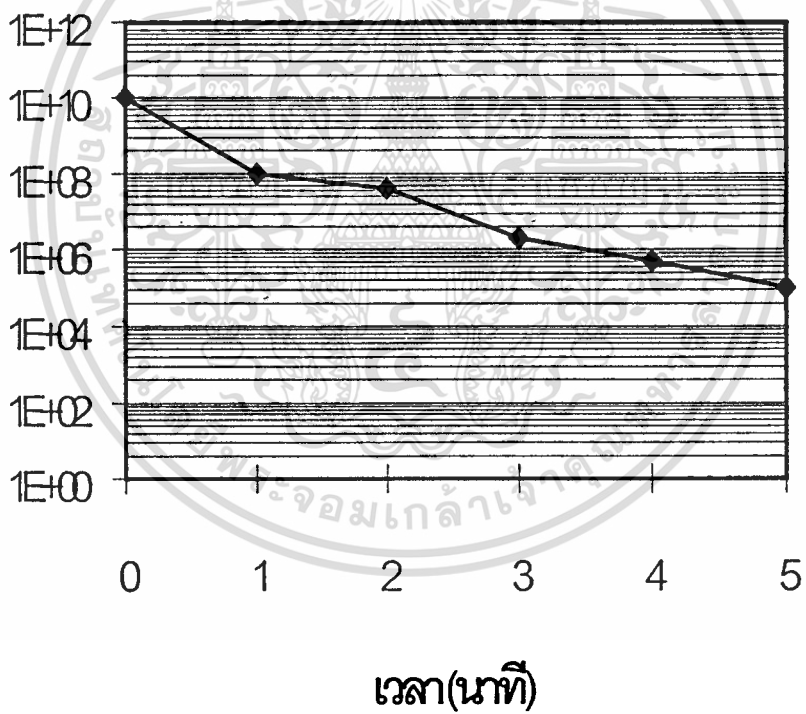
เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า อากาศที่อยู่รอบตัวเราในปัจจุบันถูกปนเปื้อน โดยไอที่มีสภาพ เป็นกรด และ ด่าง จึงจะทำการทดสอบไอของกรดหรือด่าง มีผลต่อการเกิดฟิล์มเพชรหรือไม่ โดยใช้ไอกรด และ ไอที่ประกอบด้วยไอออนของโซเดียม (Na) ถูกใช้เป็นเสมือนบรรยากาศที่ล้อมรอบ ชิ้นงานตัวอย่าง

4.2.3.1 การทดสอบผลของไอกรดต่อฟิล์มเพชร

ในการทดสอบนี้จะใช้ไอกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ด้วยปริมาณ 0.03 มิลลิลิตร วางสาร ละลายนี้ไว้ที่ด้านล่างของชุดทดลอง (ท่อแก้ว CVD) เมื่อสารละลายกลายเป็นไอ ภายในท่อ แก้วจะเต็มไปด้วยไอของกรด ไฮโดรคลอริก (HCl) ทำการวัดความต้านทานไฟฟ้า ได้เช่นเดียวกับ ตอนแรก

รูปที่ 71

ความต้านทาน(โอห์ม)



แสดงผลความต้านทานไฟฟ้า ของไอกรด ต่อพื้นผิวหน้าไฟฟ้าฟิล์มเพชร

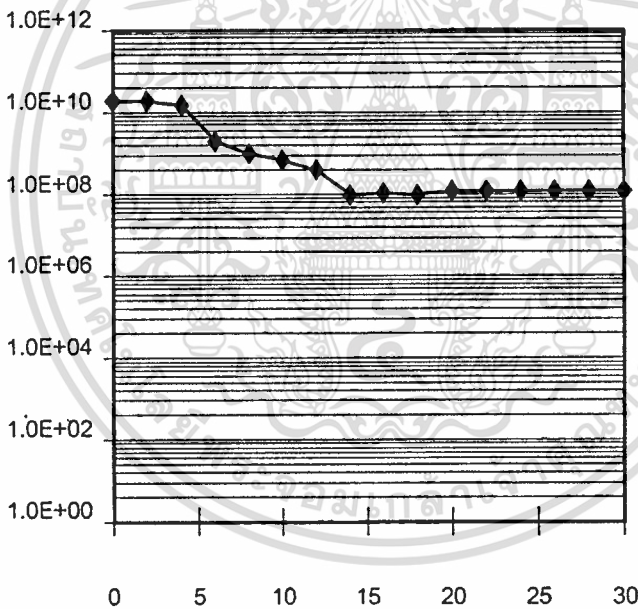
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 การทดสอบผลของไอที่มีสภาพเป็นต่างต่อฟิล์มเพชร

บรรยากาศที่มีไอออนของโซเดียม (Na^+) ถูกเตรียมขึ้น โดยทำให้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลายเป็นไอ ทำการวัดความต้านทานไฟฟ้า ได้เช่นเดียวกับตอนแรก

รูปที่ 72

ความต้านทาน (โอห์ม)



เวลา (นาที)

แสดงผลความต้านทานทางไฟฟ้า ของ ไอที่มีสภาพเป็นต่างต่อฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

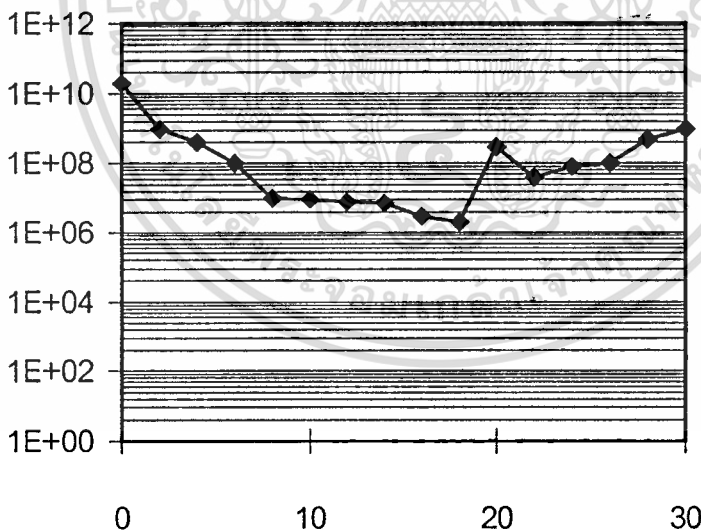
จากกราฟรูปที่ 71 จะเห็นว่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ที่วัดในไอของกรด ไฮโดรคลอริก (HCl) จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนค่าความต้านทาน ที่วัดในไอที่ประกอบไปด้วย ไอออนของ โซเดียม (Na^+) ที่ใช้แทนไอของต่าง ในกราฟรูปที่ 72 จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้น จากการทดลอง จะเห็นได้ชัดว่า กรดมีบทบาทสำคัญในการก่อตัวของชั้นนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

4.2.4 การทดสอบสนับสนุน ผลของกรด ต่อ ฟิล์มเพชร

เพื่อที่จะยืนยันว่า ไอของกรด ทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าลดลง โดยขณะทดสอบไอของกรด ทำให้ไอของกรดถูกสะเทินโดยไอของต่าง โดยใช้ไอของแอมโมเนีย (NH_3)

รูปที่ 73

ความต้านทาน (โอห์ม)



เวลา (นาที)

แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานของฟิล์มเพชร ในบรรยากาศที่ปกคลุมด้วยไอของกรด และที่เวลา 20 นาที บรรยากาศได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นไอแอมโมเนีย (NH_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

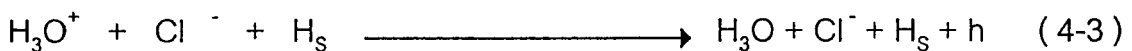
จากกราฟ จะเห็นได้ทันที หลังจากการใช้ไอของแอมโมเนีย (NH_3) ความต้านทานทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นทันที แสดงว่า กรดมีผลต่อการก่อตัวของชั้นนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ชนิดที่

4.2.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เราสามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเพชร หลังเสร็จสิ้นกระบวนการสร้าง พบว่ามีค่าสูงถึง 10^{10} โอห์ม และยังคงแสดงค่านี้ เว้นแต่ว่าพื้นผิวฟิล์มเพชรถูกเปิดสู่อากาศที่มีไอน้ำ เมื่อผิวฟิล์มถูกล้อมรอบด้วยไอน้ำ ความต้านทานทางไฟฟ้า จะลดลงอย่างมาก ถึง 10^4 เท่า เมื่อกรดถูกสะเทิน โดยสารต่าง หรือถูกขจัดออกไปทางกล พื้นผิวจะแสดงความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นอีกครั้ง ซึ่งสาเหตุของการเกิดเช่นนี้ สามารถวิเคราะห์และอธิบายได้โดยพิจารณาจากความเป็นจริงที่ว่า ประจุพาหะในชั้นผิวฟิล์ม ชนิดที่ เป็นโฮล กรดสามารถสร้างโฮลในบริเวณพื้นผิวของฟิล์มเพชร และ กรดในน้ำจะละลายเพื่อที่จะเป็น ไอออนไฮโดรเจน (H^+) ไอออนนี้กลายเป็น ไฮโดเนียมไอออน (H_3O^+) ในทันทีที่รวมตัวกับ น้ำ (H_2O) ตัวอย่างเช่น น้ำกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ละลายน้ำ ดังนี้

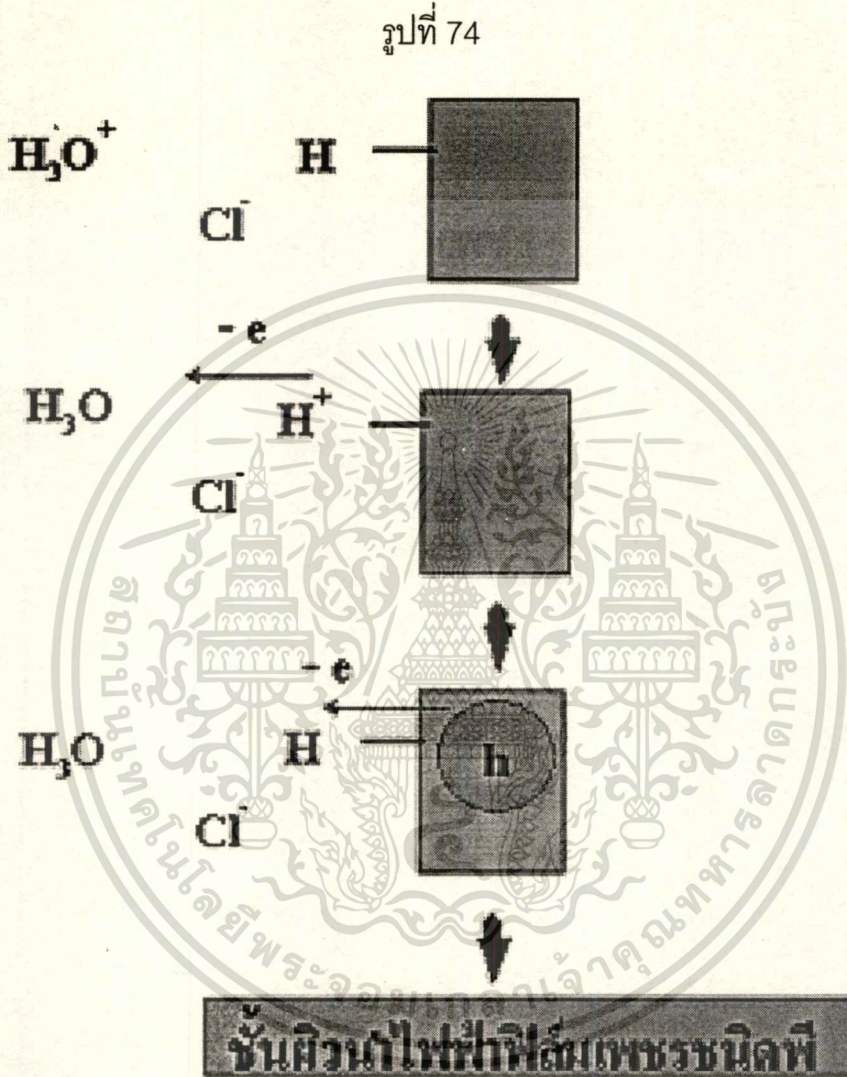


เมื่อสารละลายที่มี ไฮโดเนียมไอออน (H_3O^+) ที่พื้นผิวฟิล์มเพชร จะเป็นตัวหยุดหยุดยั้งอะตอมไฮโดรเจน และให้อิเล็กตรอนออกมา อะตอมไฮโดรเจนบนพื้นผิวฟิล์มเพชร ถูกอัดประจุแบบบวก อิเล็กตรอนชั้นนอก (Valence electron) ที่ถูกดึงดูดโดย ไอออนบวกของไฮโดรเจน ด้วยพันธะวาเลนซ์ (Valence bond) ทำให้เกิดการสูญเสีย ของวาเลนซ์อิเล็กตรอน ในพันธะ และ เกิดโฮลขึ้นพร้อมกัน ขบวนการนี้อธิบายด้วยสมการ 4-3



ซึ่ง H_s และ h เป็นอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ที่พื้นผิวของฟิล์มเพชร และ โฮลในฟิล์มเพชร ตามลำดับ

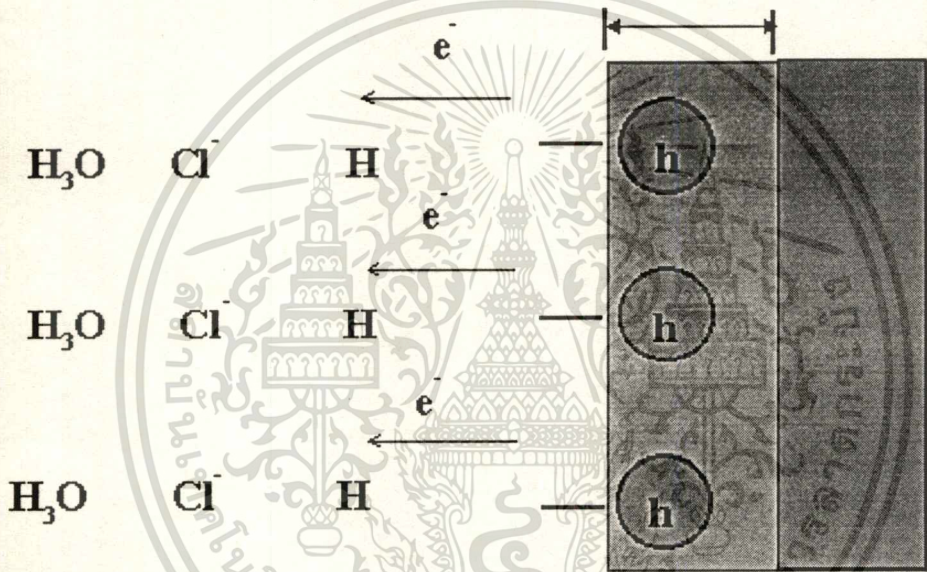
สามารถอธิบายกระบวนการก่อตัวของชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้า ชนิดพี และกระบวนการเกิดโฮล ในฟิล์มเพชร ที่ระบุข้างต้นได้จากแบบจำลอง ดังรูปที่ 74



แสดงกระบวนการ ซึ่งจะอธิบายการก่อตัวของชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้า ชนิดพี

รูปที่ 75

การเกิดโฮลในฟิล์มเพชร



แสดงกระบวนการ ซึ่งจะอธิบายการก่อตัวของชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้า ชนิดพี และ ขบวนการเกิดโฮลในฟิล์มเพชร

จากแบบจำลอง ทำให้สามารถเข้าใจได้ว่า ทำไมไอกรดจึงช่วยให้เกิดการก่อตัวของชั้นพื้นผิว ชนิดพี บนฟิล์มเพชร และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ไม่สามารถสร้าง ฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น ด้วยวิธีการ CVD แบบความร้อน (HFCVD) ขึ้นมาได้

4.2.6 สรุป

จากการทดลอง ในตอนที่ 4.2 ทั้งหมด จะพบว่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์จากระบบ CVD แบบความร้อน จะลดลงอย่างมาก จากค่า 10^{10} โอห์ม ไปสู่ค่า 10^6 โอห์ม เมื่อไอกรดปกคลุมผิวของฟิล์มเพชร ซึ่งการทดลองของค่าความต้านทาน มีสาเหตุมาจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การก่อตัวของชั้นนำไฟฟ้าผิวและการสัมผัสของกรดที่มีอยู่ในไอน้ำ กับ พื้นผิวของฟิล์มเพชร ทำให้ ไอออนของไฮโดรเจนถูกเปลี่ยนไปเป็นไฮโดเนียมไอออน (H_3O^+) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดชั้นนำไฟฟ้าฟิล์มเพชร ชนิดพี และทำให้ ไม่สามารถสร้างฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น ขึ้นได้ นอกจากนี้ วิธีทดลองนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจสอบ ก๊าซ ด้วยฟิล์มเพชร ต่อไป

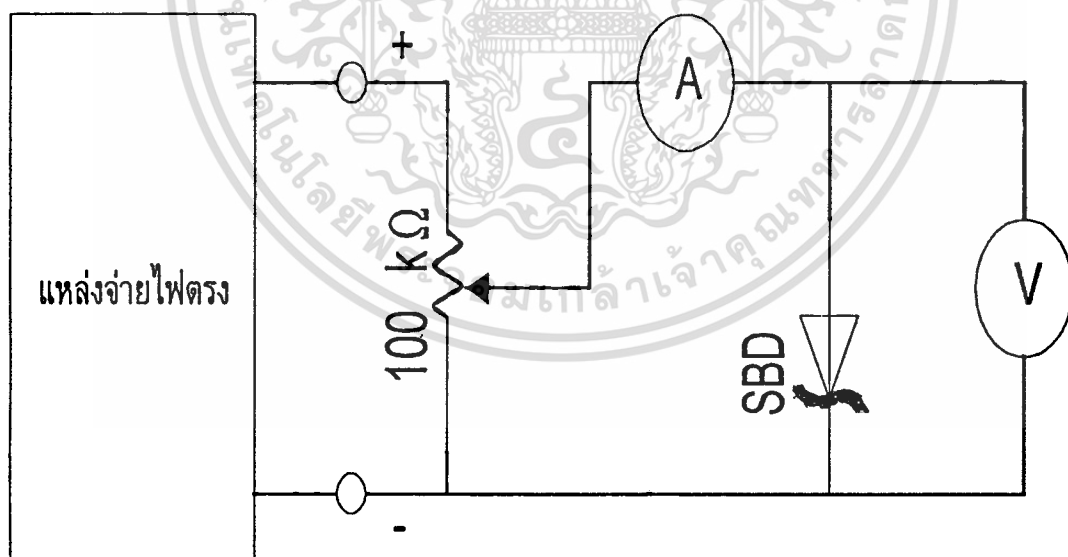
4.3 การศึกษาคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้างโลหะกับฟิล์มเพชร

หลังจากทำการสร้างชิ้นงานตามขั้นตอนในตอนต้นที่ 3.4 เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานมาศึกษา คุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าคุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน ของไดโอดที่มีโครงสร้างระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร หรือที่เรียกว่า ซอตติกไดโอด ซึ่งแสดงได้ในตอนที่ 4.3.1

4.3.1 คุณลักษณะของกระแสและแรงดัน

โดยทำการวัดค่ากระแส (I) และค่าความต่างศักย์ (V) ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งวงจรที่ใช้ในการวัดแสดงได้ดังรูปที่ 76

รูปที่ 76

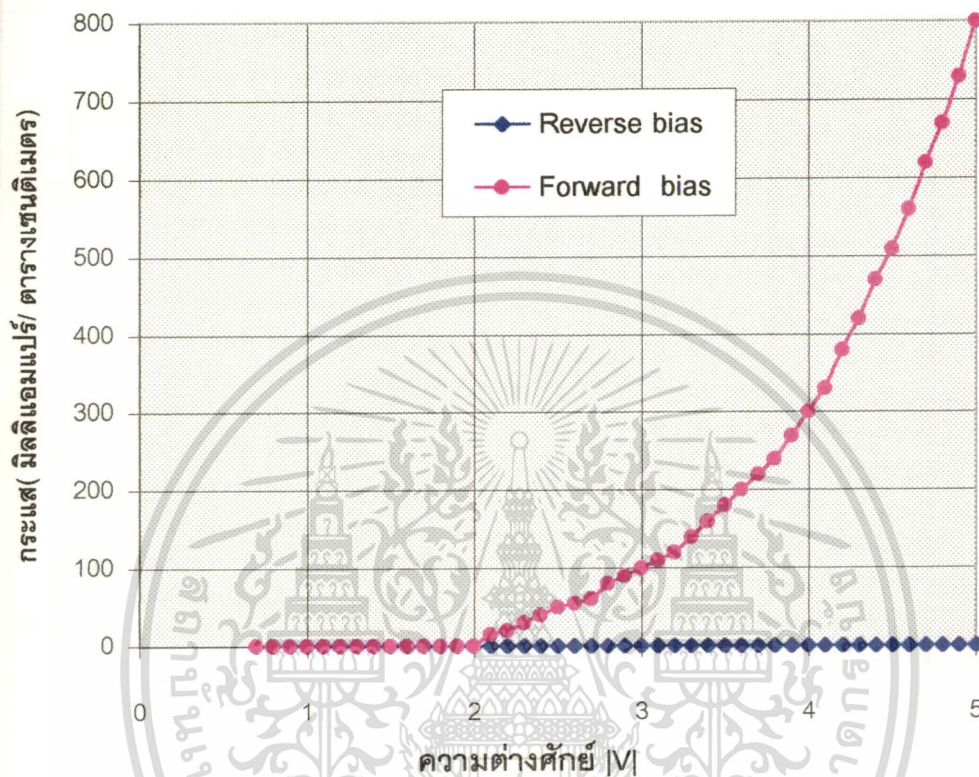


แสดงวงจรที่ใช้ในการวัด ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของซอตติกไดโอดที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการทดลองจะได้ผล ดังแสดงในรูปที่ 77

รูปที่ 77

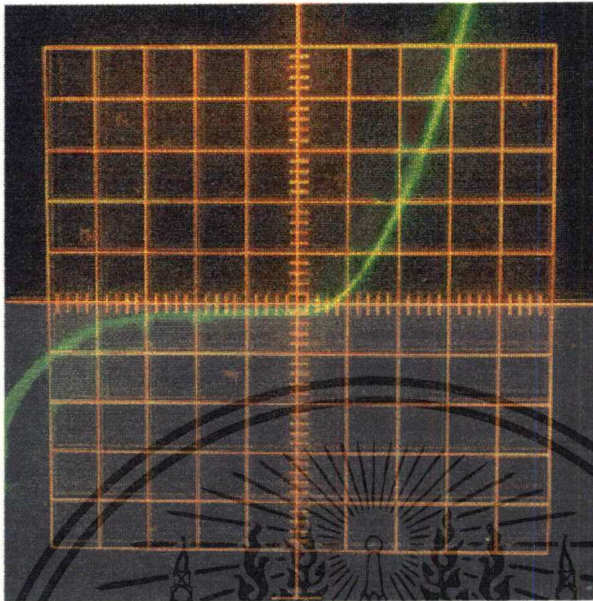


แสดงคุณลักษณะของกระแส และ แรงดัน ของขอตักไดโอด

4.3.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอดที่สร้างขึ้น

เพื่อศึกษาการทำงานของไดโอดโครงสร้าง โจนะ กับ ฟิล์มเพอร์ ชนิดพี ถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อ คุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ของอุปกรณ์ว่ามีลักษณะอย่างไร จึงทำการศึกษาคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยแสดงคุณลักษณะของกระแสกับแรงดัน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ , 100 องศาเซลเซียส , 200 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส ได้ดังรูปที่ 78 , 79 , 80 และ 81 ตามลำดับ

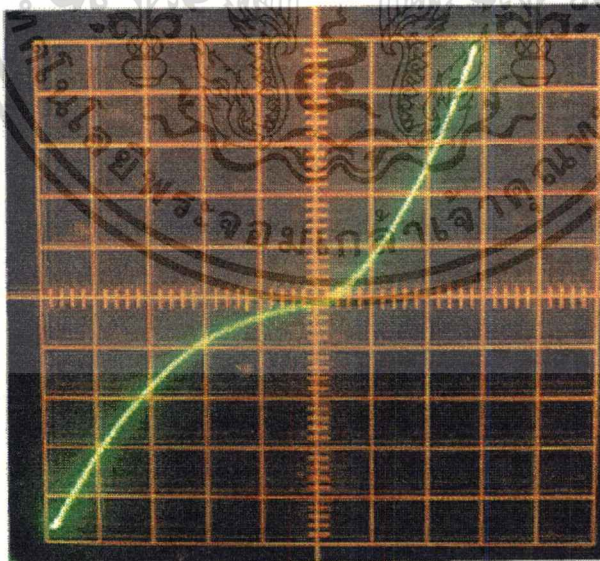
รูปที่ 78



VER 0.2 mA/DIV
 HOR 5 V/DIV

แสดงคุณลักษณะกระแสกับแรงดันของขอตตกไดโอด ที่อุณหภูมิ ห้อง

รูปที่ 79

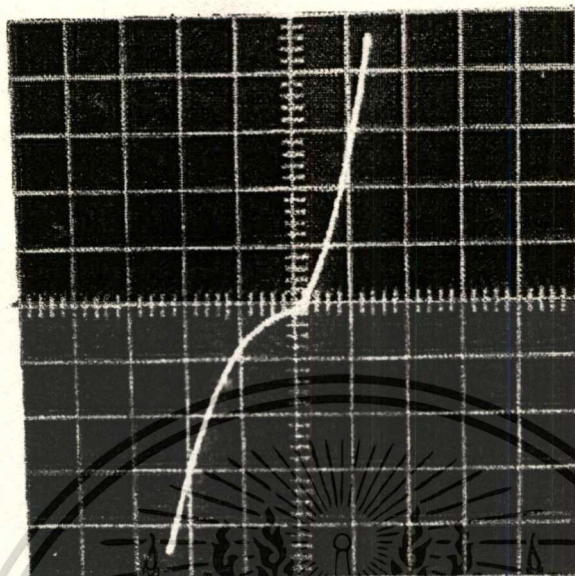


VER 0.2 mA/DIV
 HOR 5 V/DIV

แสดงคุณลักษณะกระแสกับแรงดันของขอตตกไดโอด ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

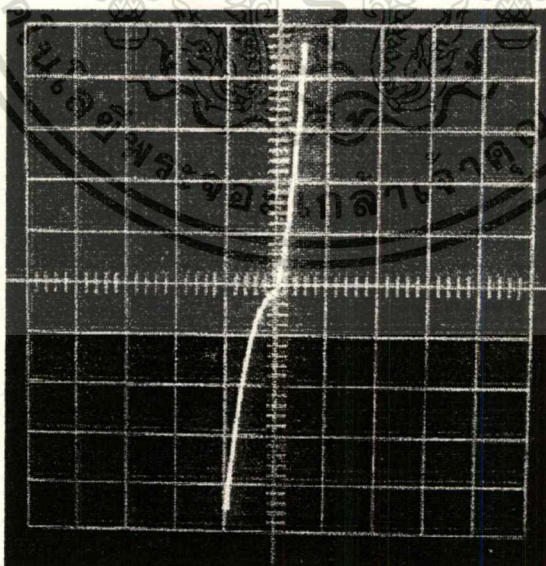
รูปที่ 80



VER 0.2 mA/DIV
 HOR 5 V/DIV

แสดงคุณลักษณะกระแสกับแรงดันของขอตักไดโอด ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

รูปที่ 81



VER 0.2 mA/DIV
 HOR 5 V/DIV

แสดงคุณลักษณะกระแสกับแรงดันของขอตักไดโอด ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

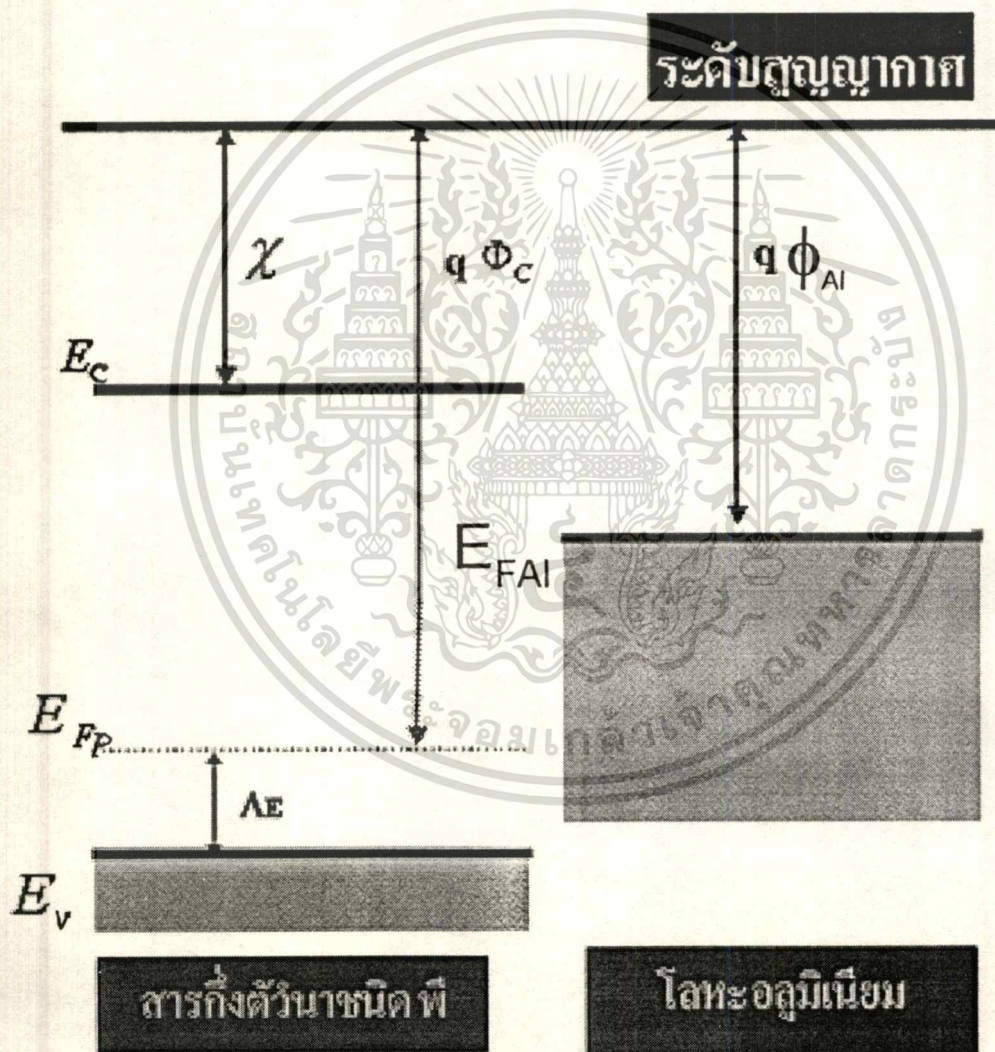
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สามารถวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ได้โดยพิจารณาจากแถบพลังงาน ของโลหะ และ สารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 82

รูปที่ 82

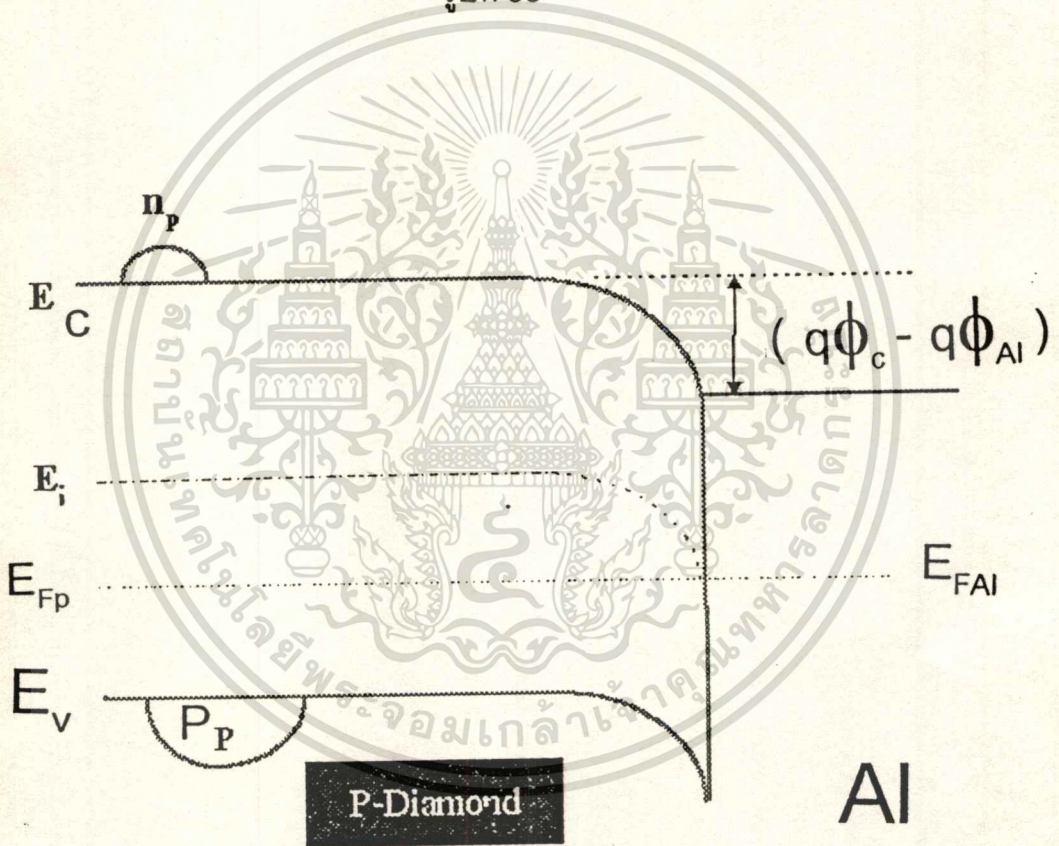


แสดงแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ที่แยกกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป q เป็นประจุของอิเล็กตรอน , ϕ_{Al} เป็นฟังก์ชันงานของอลูมิเนียม และ ϕ_c เป็นฟังก์ชันงานของเพชร ส่วนช่วงความแตกต่างของระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ระหว่างสูญญากาศและระดับแถบความนำ (E_c) เรียกว่า อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity) กำหนดโดย χ ซึ่งของเพชรมีค่าเท่ากับ 1.27 eV เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาเชื่อมต่อกัน จะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน จากโลหะไปสู่สารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดการ Recombination กับ โฮลที่บริเวณรอยต่อ จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิ ของสารทั้งสองมีค่าเท่ากัน หรือ อยู่ในสภาวะสมดุลของการถ่ายเทประจุ

รูปที่ 83



แสดงแถบพลังงานของอลูมิเนียมและฟิล์มเพชร ชนิดพี ที่นำมาเชื่อมต่อกัน

ซึ่ง $\Delta E_F = 0$ กระแสอิเล็กตรอนจะหยุดไหล ทำให้จำนวนโฮลในสารกึ่งตัวนำลดลง พิจารณาสมการที่ 4-2

$$P_p = N_v \cdot e^{-\Delta E / kT} \quad (4.2)$$

โดย P_p = จำนวนอะตอมสารเจือตัวรับโบรอน

N_v = ค่าคงที่สถานะพลังงานของโฮล

ΔE = ความแตกต่างระหว่าง ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี (E_{FP}) กับพลังงานวาเลนซ์ (E_v) = ($E_{FP} - E_v$)

K = ค่าคงที่ของโบสท์มันน์ = 8.63×10^{-5} eV / K

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

จากสมการ (4-2) สามารถหาค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี (E_{FP}) ได้เท่ากับ 0.33 eV และนำไปหาค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเพชร ได้จากสมการ (4-3)

$$\phi_{C(\text{เพชร})} = \chi + 5.5 - E_{FP} \quad (4-3)$$

ซึ่งจะได้ค่า $\phi_{C(\text{เพชร})}$ เท่ากับ 6.44 โวลท์ ซึ่งจะแตกต่างกับค่า ϕ_{A_i} ของอลูมิเนียม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.25 โวลท์ อยู่ 2.19 โวลท์

เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าที่อ่านได้จากกราฟ ในรูปที่ 74 พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงได้ไดโอดโครงสร้างระหว่างโลหะและฟิล์มเพชร ชนิดพี ที่มีแรงดันภายในเป็น 2.19 โวลท์ ที่สามารถใช้งานได้ต่อไป

พิจารณารูปที่ 83 เมื่อให้กรณีไบแอสย้อนกลับ คือ ให้โพลบทางด้าน ฟิล์มเพชร ชนิดพี ให้ไฟบวกทางด้านโลหะ แถบพลังงานทางด้านฟิล์มเพชร ชนิดพี จะยกขึ้น ส่วนระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะจะกดต่ำลงมา พิจารณา จำนวนประจุโฮล (P_p) ซึ่งเป็นจำนวนประจุพาหะส่วนใหญ่ ในสารกึ่งตัวนำเพชร ชนิดพี ที่แถบพลังงานวาเลนซ์ จะไม่สามารถเคลื่อนผ่านรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้เพราะ ถูกขัดขวางด้วยกำแพงศักย์ ที่งอโค้งลงมา

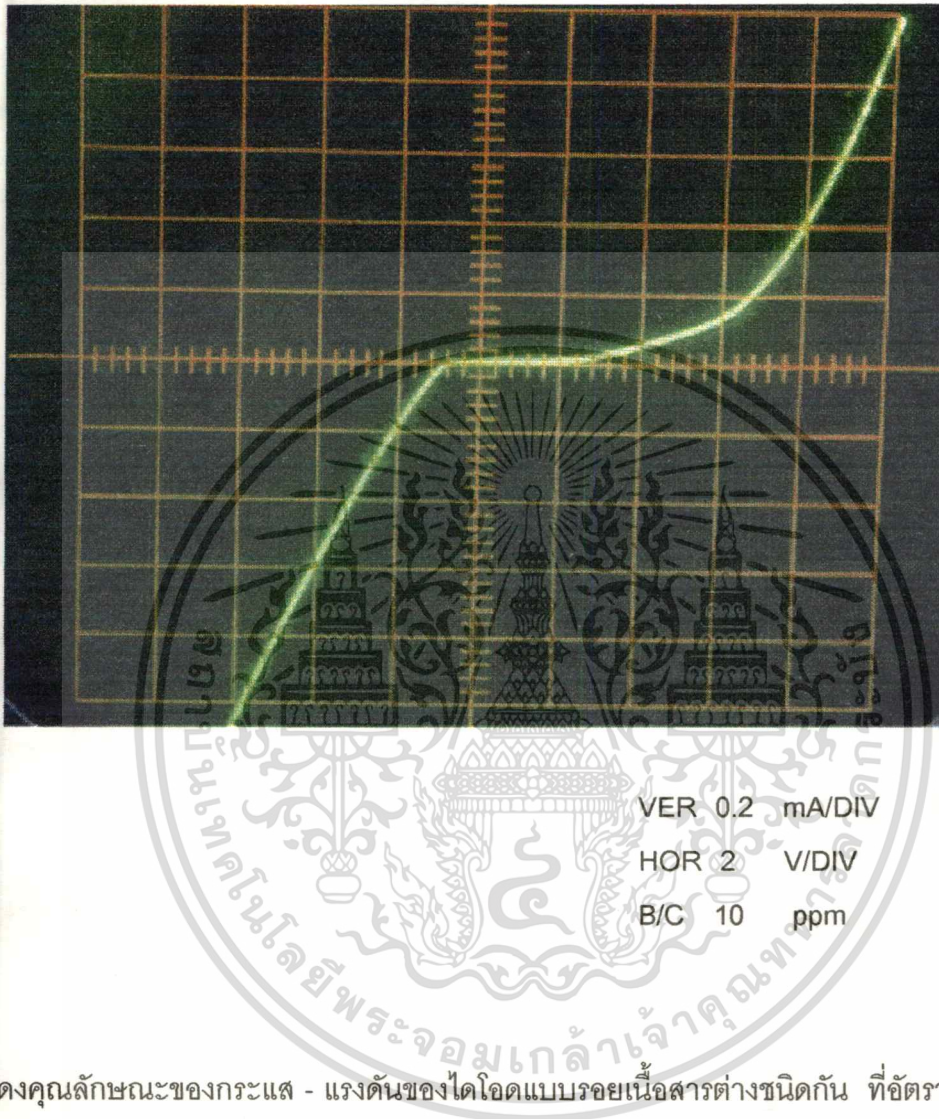
ส่วนในกรณีไบแอสไปข้างหน้า คือ ให้ไฟบวกทางด้านฟิล์มเพชร ชนิดพี ให้โพลบทางด้านโลหะ แถบพลังงานด้านฟิล์มเพชร ชนิดพี จะลดต่ำลงมา ส่วนค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะจะยกสูงขึ้น พิจารณาค่าจำนวนประจุโฮล (P_p) ที่แถบพลังงานวาเลนซ์ในฟิล์มเพชร ชนิดพี เมื่อให้พลังงานมากเพียงพอ ค่า ๆ หนึ่ง (ในที่นี้ ให้พลังงานเท่ากับ 2.19 โวลท์) ค่าจำนวนประจุโฮล (P_p) จะสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสผ่านไปยังโลหะได้ ซึ่งจะตรงกับ ในกรณีไบแอสไปข้างหน้า จากคุณลักษณะ ของกระแสและแรงดัน ของ ซอตต์กีไดโอด ในรูปที่ 77

4.4 การศึกษาคุณสมบัติของ ไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ระหว่างฟิล์มเพชร ชนิดพี กับซิลิกอนชนิดเอ็น

4.4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า

สามารถทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้า ของไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ระหว่างฟิล์มเพชร ชนิดพี กับ ซิลิกอน ชนิดเอ็น โดยเริ่มจากศึกษาผลของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอน ในฟิล์มเพชร ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 84 , 85 , 86 และ 87 ตามลำดับ

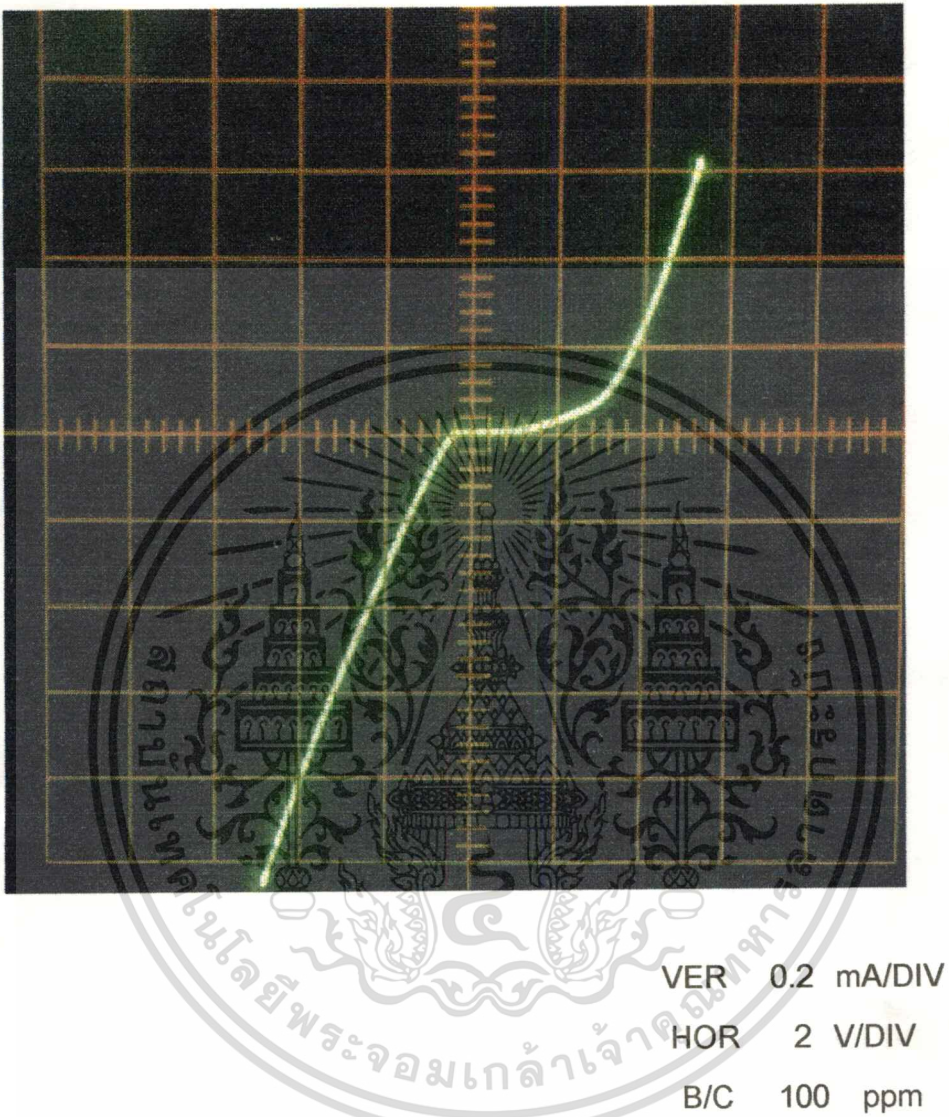
รูปที่ 84



แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดันของไดโอดแบบรอยเนื้อสารต่างชนิดกัน ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ในฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้น 10 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

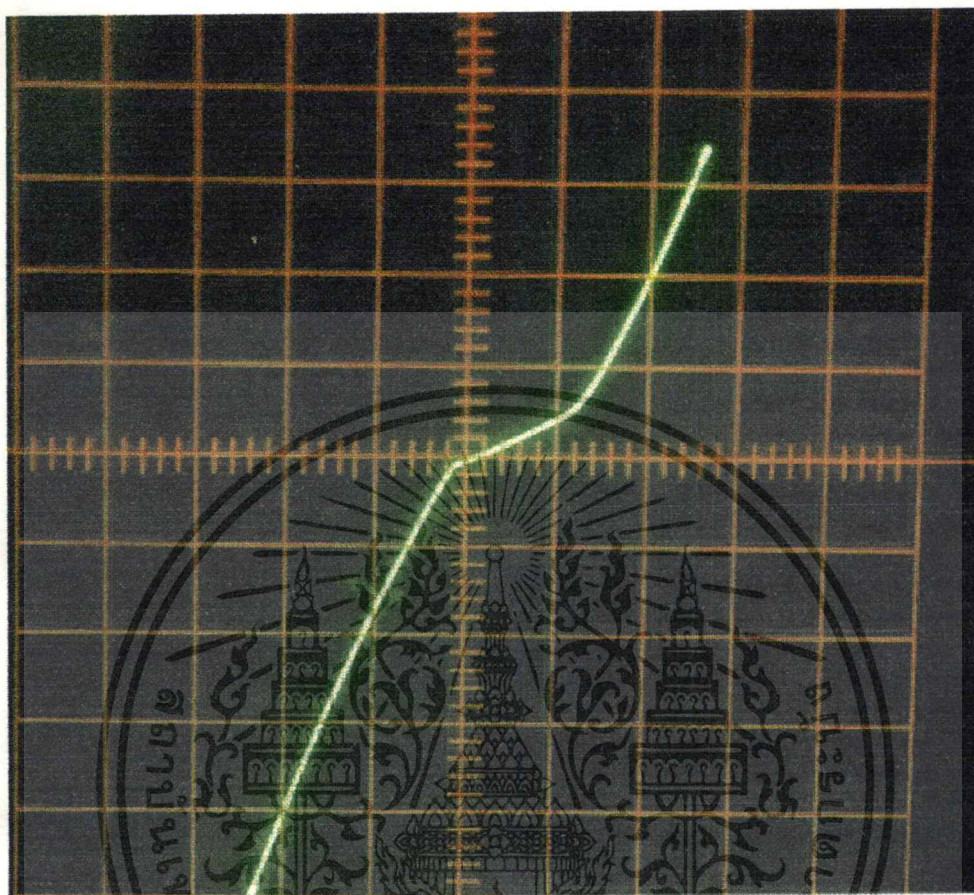
รูปที่ 85



แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ของไดโอดแบบรอยเนื้อสารต่างชนิดกัน ที่อัตราส่วน
 โบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ในฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้น 100 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 86

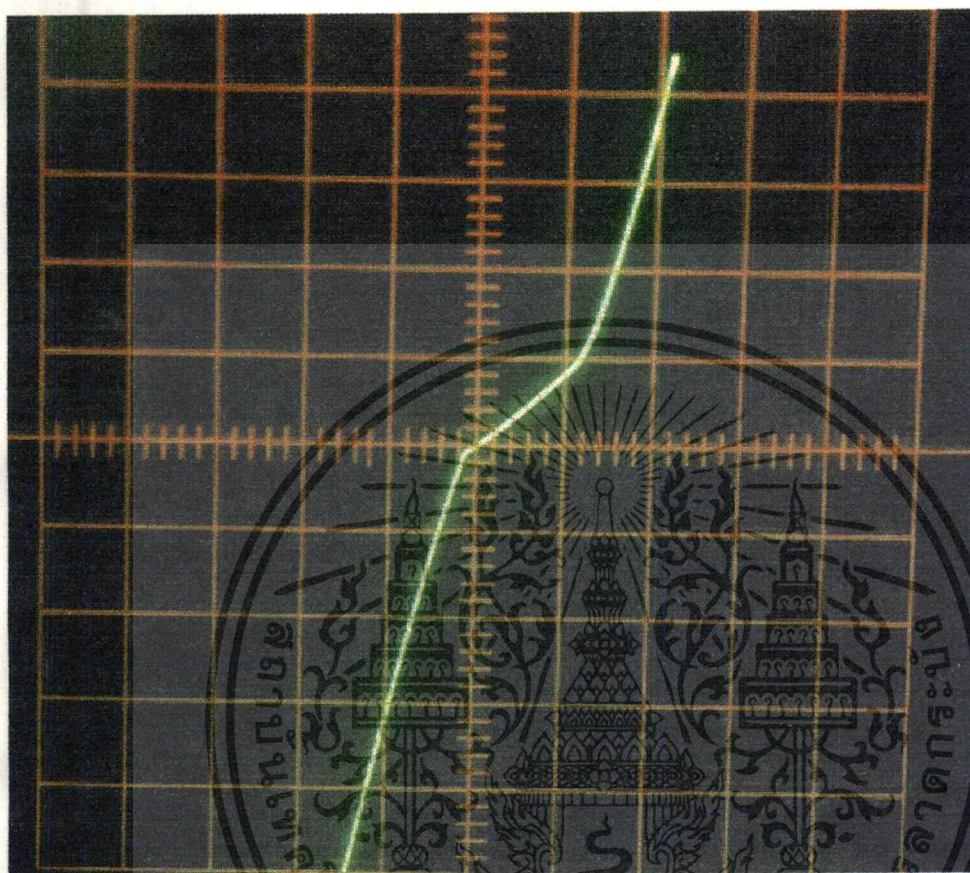


VER 0.2 mA/DIV
 HOR 2 V/DIV
 B/C 1000 ppm

แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ของไดโอดแบบรอยเนื้อสารต่างชนิดกัน ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ในฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้น 1000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 87



VER 0.2 mA/DIV

HOR 2 V/DIV

B/C 10000 ppm

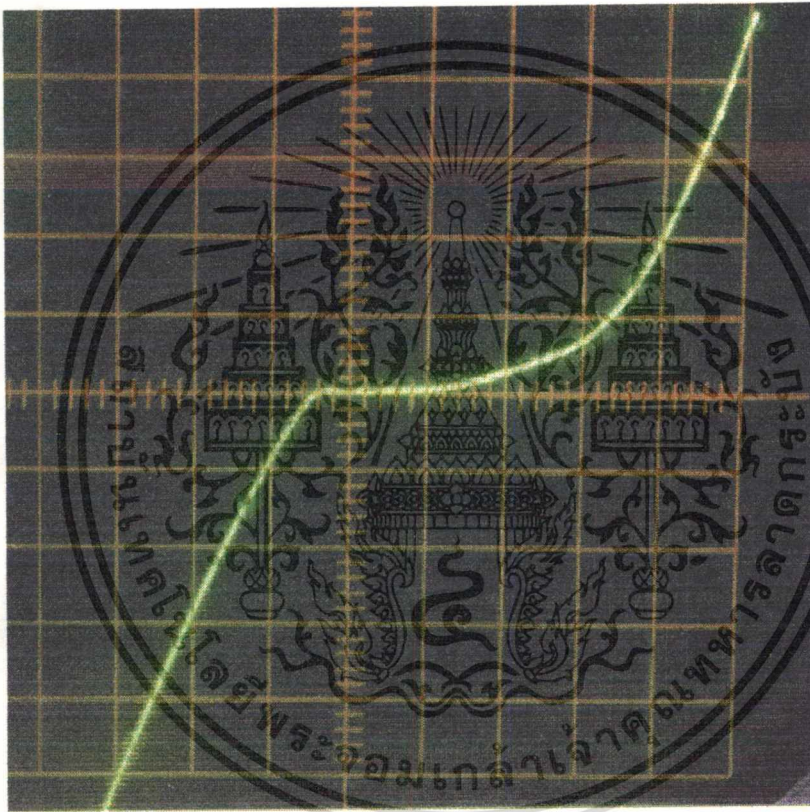
แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ของไดโอดแบบรอยเนื้อสารต่างชนิดกัน ที่อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ในฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้น 10000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอดที่สร้างขึ้น

เพื่อศึกษาการทำงานของไดโอดที่สร้างขึ้นที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จึงทำการทดสอบค่าคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน โดยทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เช่นที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 88 , 89 และ รูปที่ 90 ตามลำดับ

รูปที่ 88



VER 0.2 mA/DIV

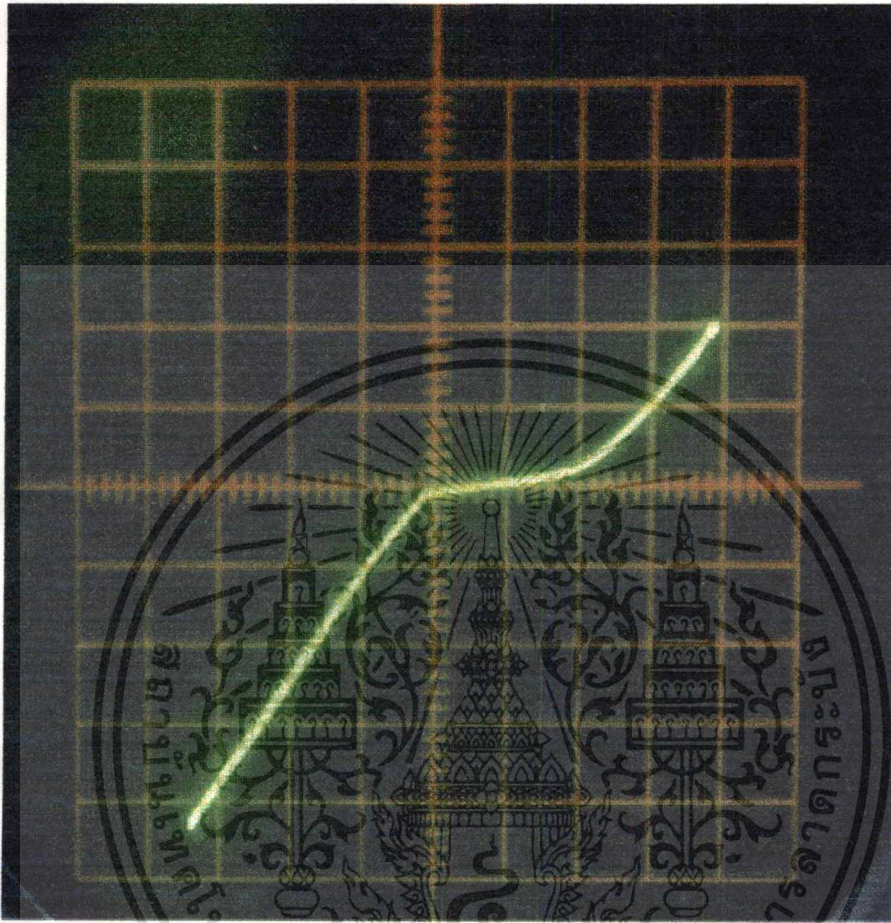
HOR 2 V/DIV

B/C 10 ppm

แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 89



VER 0.2 mA/DIV

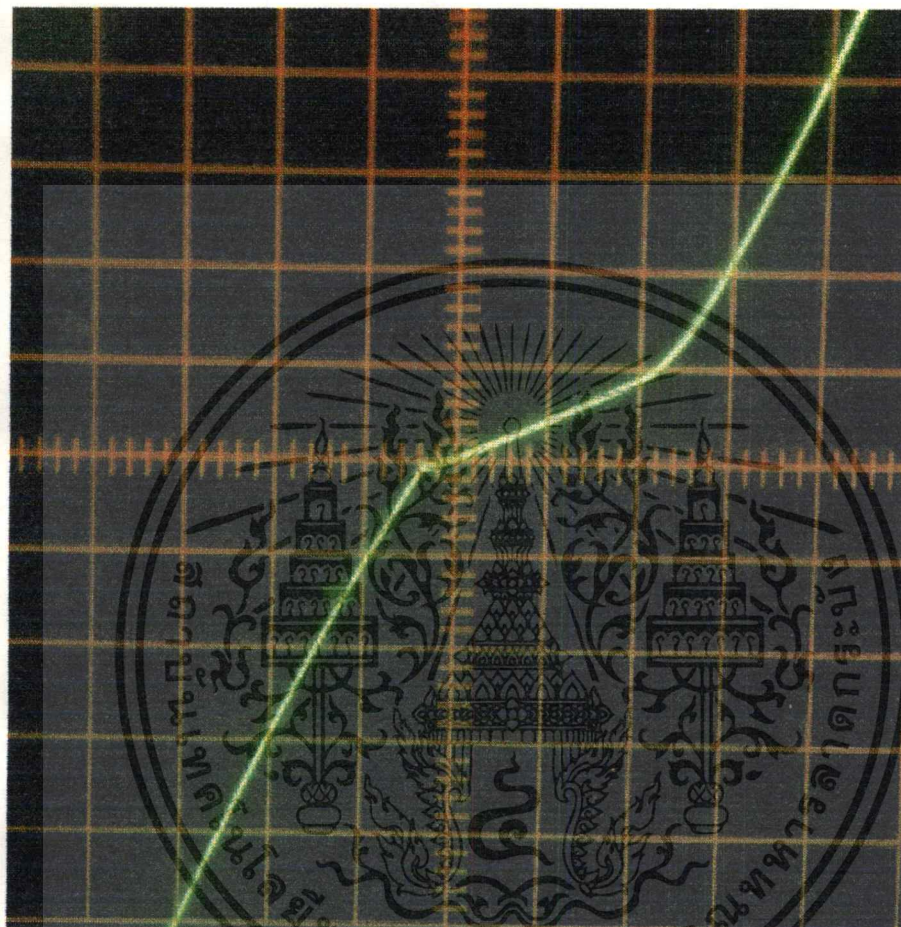
HOR 2 V/DIV

B/C 10 ppm

แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 90



VER 0.2 mA/DIV

HOR 2 V/DIV

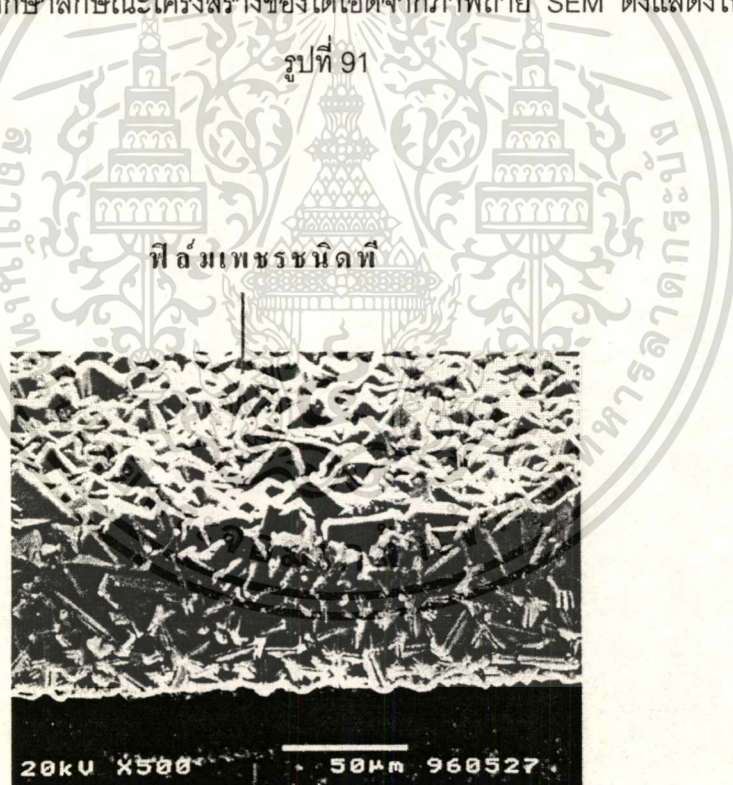
B/C 10 ppm

แสดงคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของไดโอด จะมีคุณสมบัติเหมือนกับ คุณสมบัติของ แบคเวอริตไดโอด ที่ขณะได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ แม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม จะมีกระแสไหลผ่านเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีลักษณะคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและแรงดัน ตรงข้ามกับไดโอดทั่ว ๆ ไป และจากผลความเข้มข้นอะตอมสารเจือปนโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ต่าง ๆ ในฟิล์มเพชร ค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับ ($V_{reverse}$) ลดลง เมื่อความเข้มข้นของโบรอนอะตอมเพิ่มขึ้น (พิจารณารูปที่ 84 , 85 , 86 และ 87 ตามลำดับ) สรุปได้ว่า ที่ภายใต้ค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับคงที่ ค่ากระแสย้อนกลับจะเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนโบรอนในฟิล์มเพชร และ จากผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอดจะเห็นได้ว่าไดโอดโครงสร้างระหว่างฟิล์มเพชร ชนิดพี และ ซิลิกอน ชนิดเอ็น มีแนวโน้มที่จะสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งไดโอดโดยปกติจะไม่สามารถทำงานได้

นอกจากนี้สามารถศึกษาลักษณะโครงสร้างของไดโอดจากภาพถ่าย SEM ดังแสดงในรูปที่ 91



ซิลิกอนชนิดเอ็น

แสดงลักษณะโครงสร้างของไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันระหว่างฟิล์มเพชรกับ

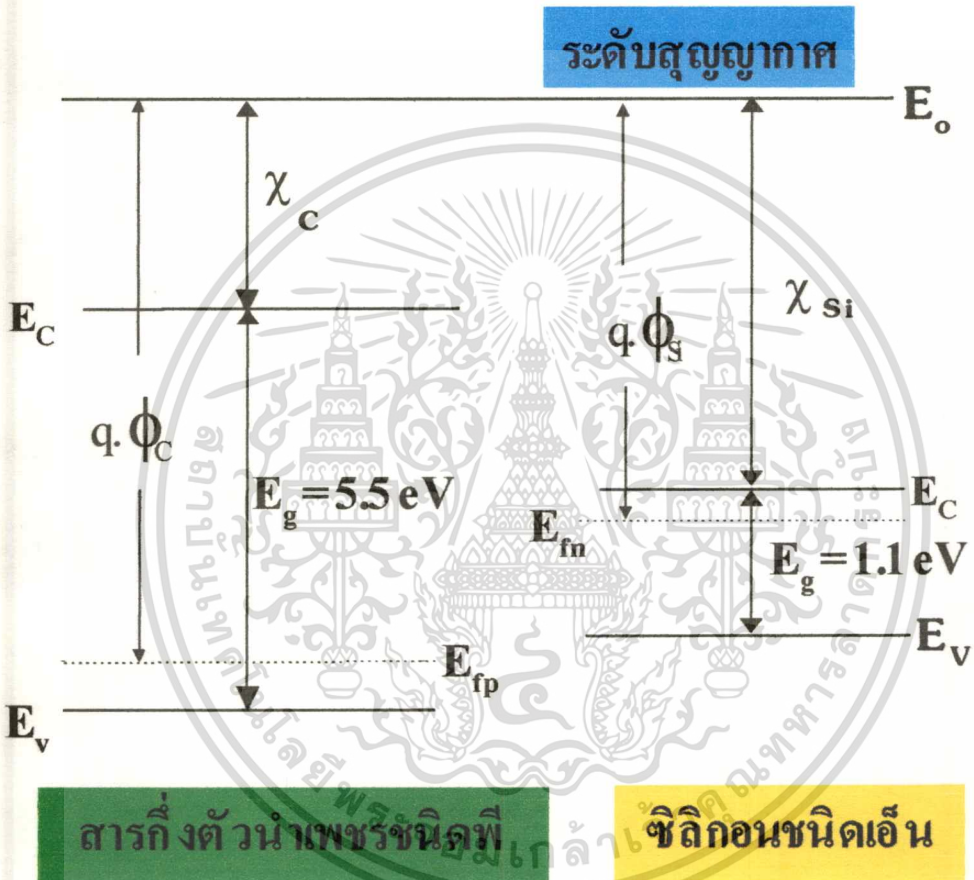
ซิลิกอนจากภาพถ่าย SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้โดยพิจารณาจากแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชรกับซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 92

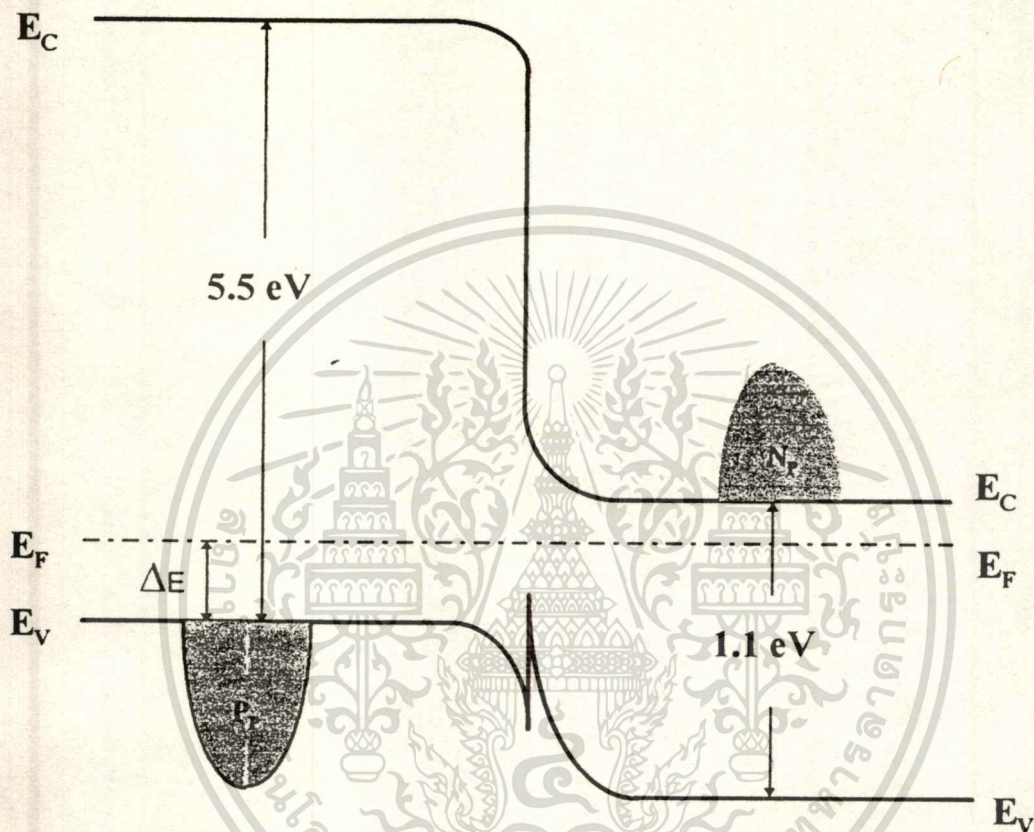
รูปที่ 92



แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชร ชนิดพีกับซิลิกอน ชนิดเอ็น ที่แยกกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 93



แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชร ชนิดพีและซิลิกอน ชนิดเอ็น ที่ สภาวะสมดุลย์

จากรูป 92 χ_C และ χ_{Si} เรียกว่า อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity) เป็นช่วงความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างสูญญากาศและระดับแถบความนำ (E_C) ของสารกึ่งตัวนำเพชร และ ซิลิกอน ตามลำดับ ซึ่งของเพรมีค่า 1.27 eV และของซิลิกอนมีค่า 1.39 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองมาเชื่อมต่อกันจะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ชนิดเอ็น ไปสู่สารกึ่งตัวนำเพชร ชนิดพี จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งสองมีค่าเท่ากัน หรืออยู่ในสภาวะสมดุลของการถ่ายเทประจุ ดังแสดงในรูปที่ 93

สำหรับการคำนวณหาค่าศักย์สัมผัส จะเริ่มจากสมการ (4-4) ^[20]

$$P_p = N_v \cdot e^{-\Delta E / kT} \quad (4-4)$$

โดย P_p = จำนวนอะตอมสารเจือผู้รับ (โบรอน)

N_v = ค่าคงที่สถานะพลังงานของโฮล

ΔE = ความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_{fp}) กับ พลังงานวาเลนซ์ (E_v) ของสารกึ่งตัวนำเพชร ชนิดพี = ($E_{fp} - E_v$)

K = ค่าคงที่ของโบสท์มันน์

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

จากสมการ (4-4) สามารถหาค่า ความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_{fp}) กับ พลังงานวาเลนซ์ (E_v) ของสารกึ่งตัวนำเพชร ชนิดพี (ΔE) ได้เท่ากับ 0.33 eV และนำไปหาค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเพชร ได้จากสมการ ที่ (4-5)

$$q\phi_c = \chi_c + 5.5 - \Delta E \quad (4-5)$$

ซึ่งจะได้ค่า $q\phi_c$ ของเพชรเท่ากับ 6.44 eV จากนั้นจึงหาค่าฟังก์ชันงานของซิลิกอน ชนิดเอ็น ซึ่งหาได้ด้วยวิธีเดียวกับสารกึ่งตัวนำเพชร ชนิดพี โดย $q\phi_s$ มีค่าเท่ากับ 2.22 eV ซึ่งศักย์สัมผัสจะหาได้จากค่าแตกต่างของฟังก์ชันงานมีค่าเป็น 4.22 eV จึงได้ไดโอดที่มีค่าแรงดันภายในเป็น 4.22 eV ที่สามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป

พิจารณารูปที่ 93 ในกรณีของรอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกัน ระหว่าง ฟิล์มเพชร ชนิดพี กับ ซิลิกอน ชนิดเอ็น ในขณะที่สัมผัสกัน ในส่วนของรอยต่อ น่าจะมี ยอดแหลม เกิดขึ้น เพื่อที่จะทำให้ค่าแถบพลังงานวาเลนซ์ ในส่วน Depletion region ของซิลิกอน ชนิดเอ็น ห่างจากแถบพลังงานนำกระแส อยู่ที่ 1.1 eV เท่าเดิม นั่นคือ ถ้ามีโครงสร้างนี้เกิดขึ้นแล้ว ผลที่ตามมา คือ ถึงจะทันแนล (ทะลุข้ามรอยต่อ) ไปแล้ว ส่วนยอดแหลม ตรงนี้น่าจะยังติดอยู่ ต่อมาพิจารณารูปที่ ไบแอสย้อนกลับ คือ ให้โพลบทางด้าน ฟิล์มเพชร ชนิดพี ให้โพลบทางด้าน ซิลิกอน ชนิดเอ็น ผลที่ตามมา คือ แถบพลังงานทางด้านฟิล์มเพชร ชนิดพี จะยกสูงขึ้น ส่วนแถบพลังงานของซิลิกอน ชนิดเอ็น จะกดต่ำลงมา ทำให้อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ ของเพชร สามารถทะลุผ่านรอยต่อไปยัง แถบความนำ ของ ซิลิกอนชนิดเอ็นได้ทันที (กรณีไบแอสย้อนกลับ พิจารณาประจุพาหะส่วนน้อย เคลื่อนที่) เรียกปรากฏการณ์แบบนี้ว่า ปรากฏการณ์ทะลุผ่าน (tunnelling effect) พิจารณารูปที่ 33 ก็เลยพบปรากฏการณ์กระแสไหลทันที ตอนไบแอสย้อนกลับ ดังรูปที่ 84 เป็นต้น

ส่วนกรณีไบแอสไปข้างหน้า คือ ให้โพลบทางด้านฟิล์มเพชร ชนิดพี ให้โพลบทางด้านซิลิกอน ชนิดเอ็น เช่นเดียวกัน ผลที่ตามมา ก็คือ แถบพลังงานทางด้าน ซิลิกอน ชนิดเอ็น จะยกสูงขึ้น แถบพลังงานทางด้านฟิล์มเพชร ชนิดพี กดต่ำลง ทำให้อิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานสูงทางด้านซิลิกอน ชนิดเอ็น ก็จะข้ามแถบพลังงานนำกระแสข้ามกำแพงศักย์ไปได้ เกิดกระแสไหล (กรณีไบแอสไปข้างหน้า พิจารณาประจุพาหะส่วนใหญ่เคลื่อนที่) อย่างไรก็ตาม ช่องว่างที่เกิดขึ้นตรงส่วนนี้ ค่อนข้างจะมีค่าสูงมาก เพราะฉะนั้น ศักดาไฟฟ้าที่ให้ตอนไบแอสไปข้างหน้า ถ้ามีจำนวนเล็กน้อย จะไม่สามารถข้ามกำแพงศักย์ ตรงส่วนนี้ไปได้มากเพียงพอ จนกระทั่ง ศักดาไฟฟ้ามากพอ (ในที่นี้ มีค่าเท่ากับ 4.2 โวลท์) กระแสถึงจะไหลไปได้จำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 84 ในส่วนของไบแอสไปข้างหน้า เป็นต้น

จึงเป็นปรากฏการณ์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ระหว่างฟิล์มเพชร ชนิดพี กับ ซิลิกอน ชนิดเอ็น ที่พบ และวิเคราะห์ออกมาในตอนนี้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

ผลงานวิจัยฉบับนี้ เป็นการศึกษาและพัฒนาฟิล์มบางเพชร เป็นไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันระหว่างฟิล์มเพชรและซิลิกอน โดยการศึกษาเริ่มจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ใช้ระบบ CVD ที่มีให้หลอดเป็นตัวให้ความร้อน การสร้างเพชรจะสร้างบนฐานรองซึ่งการเตรียมแผ่นฐานรองใช้ผงเพชรช่วยในการสร้างเนื่องจากวิธีนี้สะดวกและการเกิดฟิล์มเพชรจะเกิดมากกว่าการเตรียมด้วยวิธีอื่น พัฒนาชุดทดลองเป็นชุดทดลองที่ใช้ง่าย และปลอดภัยขึ้น การสร้างฟิล์มเพชรสามารถสร้างได้ 3 ชนิด คือ ชนิดอินทรินซิก ซึ่งเป็นฟิล์มเพชรที่สร้างจากเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) เพียงอย่างเดียว ต่อมาเพื่อที่จะทำให้เพชรสามารถนำไฟฟ้าได้ จึงทำการเติมอะตอมสารเจือ ลงไปในฟิล์มเพชร ทั้งชนิดเอ็น แหล่งจ่ายที่ใช้เป็นการเติม อะตอมสารเจือ ฟอสฟอรัส โดยใช้ฟอสฟอรัสเพนตระออกไซด์ (P_2O_5) และ ชนิดพี แหล่งจ่ายที่ใช้จะเป็นการเติมอะตอมสารเจือโบรอน โดยใช้โบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) และผลจากการศึกษาการสร้างฟิล์มเพชร พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเกิดฟิล์มเพชร มีดังต่อไปนี้ คือ อุณหภูมิฐานรองจะเป็นตัวกำหนดการเกิดฟิล์มเพชรระนาบต่าง ๆ พบว่า ที่อุณหภูมิระหว่าง 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ฟิล์มเพชรจะเกิดระนาบ (111) อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ขึ้นไป คือระหว่างอุณหภูมิ 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียส จะเกิดฟิล์มระนาบ (100) ถ้าอุณหภูมิละหว่าง 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส ลักษณะของฟิล์มจะเกิดระนาบรวมหลายระนาบ หลังจากสร้างฟิล์มเพชรเสร็จแล้ว สามารถตรวจสอบการเกิดฟิล์มเพชร จากกล้องจุลทรรศน์ และ เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันการเกิดฟิล์มเพชรได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ เทคนิค Raman Spectroscopy ซึ่งผลที่ได้จากทั้งสองวิธี ยืนยันได้ว่าฟิล์มที่ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชร

ก่อนการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งาน มีการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์ม โดยใช้เทคนิคเข็มร้อน จากการตรวจสอบพบว่า ฟิล์มเพชรที่ทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอน จะแสดงความนำไฟฟ้า ชนิดพี ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่เป็นเช่นนี้ เป็นผลมาจากก๊าซในอากาศที่มีต่อการเกิดชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้า ของฟิล์มเพชร ชนิดพี จากการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานของฟิล์มเพชร ที่สังเคราะห์จากระบบ CVD แบบความร้อนจะลดลงอย่างมาก จากค่า 10^{10} โอห์ม ไปสู่ค่า 10^6 โอห์ม เมื่อโอบรุดปกคลุมพื้นผิวของฟิล์มเพชร ซึ่งการทดลองของค่าความต้านทานมีสาเหตุมาจากการก่อตัวของชั้นผิวนำไฟฟ้า และการสัมผัสของกรดกับพื้นผิวฟิล์มเพชร ทำให้ไอออนของไฮโดรเจนถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) โดยการรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำ (H_2O) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดชั้นนำไฟฟ้าฟิล์มเพชร ชนิดพี และ ทำให้ไม่สามารถวัดค่านำไฟฟ้าผิวชนิดเอ็นของฟิล์มเพชร ชนิดเอ็นวัดได้แต่เพียงชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้า ชนิดพี จึงไม่สามารถนำฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ไปใช้งานได้

สุดท้ายนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้นำไปประยุกต์ใช้งาน โดยสร้างเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยเริ่มจาก การสร้างไดโอดโครงสร้างโลหะ อลูมิเนียม กับฟิล์มเพชร ชนิดพี หรือที่เรียกว่า ซอตตีไโคไดโอด ซึ่งรอยต่อมีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด เปรียบเทียบกับการคำนวณจากสูตร พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน และทดสอบผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอดที่สร้างขึ้นพบว่าไดโอดยังสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูงถึง 400 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ได้โดยพิจารณาจากแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ มาช่วยในการอธิบาย ต่อมาพัฒนาเป็นไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างเพชร ชนิดพี และ ซิลิกอน ชนิดเอ็น ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าไดโอดจะแสดงคุณลักษณะเหมือนกับคุณลักษณะของแบคเวิร์ดไดโอด จึงอาจเรียกไดโอดแบบนี้ได้ว่าเป็น แบคเวิร์ดไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน โครงสร้าง เพชร และ ซิลิกอน พบว่าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอนในฟิล์มเพชร มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า นั่นคือที่ภายใต้ค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับคงที่ ค่ากระแสย้อนกลับจะเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอน นอกจากนี้ไดโอดยังสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และสามารถวิเคราะห์ผลการทดลอง ที่ได้โดยพิจารณาจากแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเพชร และ ซิลิกอน มาช่วยในการอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีของซอตตีไโคไดโอด จากการที่เพชรมีคุณสมบัติที่เด่นต่าง ๆ จึงเป็นแนวทางการพัฒนาการสร้าง ไดโอดโครงสร้างโลหะกับฟิล์มเพชร หรือ ไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพี กับ ซิลิกอนชนิดเอ็น หรือ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ชนิดอื่น ๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ที่สามารถทำงานได้ที่ กำลังความดัน และอุณหภูมิสูง ต่อไป

สำหรับข้อเสียของการทดลองด้วยวิธีนี้ คือ ไม่สามารถสร้างฟิล์มเพชรให้มีบริเวณกว้างได้ เนื่องจากข้อจำกัดของไล่หลอดที่ทำจากทังสเตน ที่ให้ความร้อนบริเวณจำกัด และ ถ้าใช้งานไปประมาณ 2 ถึง 3 ครั้ง ไล่หลอดจะเกิดการเปลี่ยนรูป ทำให้ได้อุณหภูมิไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นผิวฐานรอง ฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นจึงไม่สม่ำเสมอ

เอกสารอ้างอิง

- 1) บัญชา กิตติรังสี, นริศ จันทรแดง, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เขียวศิริกุล, ผศ.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง, รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, "ผลของอุณหภูมิฐานรองต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเพชร", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 , พ.ศ. 2537
- 2) บัญชา กิตติรังสี, กอบศักดิ์ ศรีประภา, นาวัน อุทัยวัฒนานนท์, ผศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง, " ข้อดัดก็ไคโอตที่สร้างจากฟิล์มบางเพชร , " ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 , พ.ศ. 2539
- 3) บัญชา กิตติรังสี, กอบศักดิ์ ศรีประภา, นิรุช ปิ่นเกตุ, ผศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง, " ผลของก๊าซในอากาศที่มีต่อการเกิดชั้นพื้นผิวนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ชนิดพีในระบบ CVD แบบความร้อน", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 , พ.ศ. 2539
- 4) บัญชา กิตติรังสี, กอบศักดิ์ ศรีประภา, ลัดดาวัลย์ สุภาดี, ภควัด สรวายสุวรรณ, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ผศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง, " แบบเคเวิร์ตไคโอตที่สร้างจากฟิล์มบางเพชร", การประชุมสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง ฟิสิกส์ไทยในปีกาญจนาภิเษก โดย สมาคมฟิสิกส์ไทย ณ.จังหวัดภูเก็ต , พ.ศ. 2539
- 5) R.F.Davis, " Diamond Films and coating ", Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey U.S.A, 1993
- 6) นริศ จันทรแดง, " การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชร", (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขา วิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2538) , หน้า 70 - 74
- 7) C.Kittel, " Introduction to solid state physics, " John Wiley & Sons, New York, Sixth Edition
- 8) S.M.SZE, " Physics of semiconductor devices " John Wiley & Sons, New York, Second Edition, pp7, 193
- 9) W.Zhu, B.R.Stoner, B.E.Williams and J.T.Glass, " Growth and Characterization of diamond films on Non diamond substrates for Electronic Applications", Proceedings of the IEEE, vol 79, May 1991, No.5, p649
- 10) L.Solymar and D.Walsh, " Lectures on the Properties of materials", Oxford University Press, Oxford 1984, pp 222-223
- 11) Walter A.Yarbruogh and Russell messier, " Current Issues and Problems in the chemical vapor deposition of diamond", SCIENCE, vol 247 February 1990, p 688

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 12) D.S Knight and W.B.whilte," Characterization of diamond films by Raman Spectroscopy" J.Mater.Res., vol4,Mar/Apr 1989,pp 385 - 393
- 13) J.E.Field," The properties of diamonds", Academic Press,London,1979
- 14) Robert F. Pierret," Semiconductor Fundamentals ",2nd edition,Modular series on solid state devices,Addison-Wiley Publishing Company,Inc,pp 76-78
- 15) A.G.Milnes and D.L.Feucht," Heterojunctions and Metal-semiconductor Junctions", Academic Press,New york and London,pp 157-158,1972
- 16) สมเกียรติ ศุภเดช," อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ " คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,หน้า 139,พ.ศ. 2521
- 17) Lawrence S.pan," Diamond Electronic properties and application", Kluwer Academic publishes,London, p 61,1995
- 18) M.W.Geis and John C.Angus,"Diamond film semiconductors" Scientific American,October 1992,pp 64-69
- 19) Paul W.May," CVD diamond - a new technology for the Future ? ", Endeavour megazine 19(3),1995,pp 101-10
- 20) สมเกียรติ ศุภเดช," สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ " คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,หน้า 30,พ.ศ. 2536

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่าโบรอนต่อคาร์บอน

สามารถคำนวณหาค่าโบรอนต่อคาร์บอน (B/C) ได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1

คำนวณหาค่าน้ำหนักโมเลกุลของโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) ซึ่งประกอบด้วยโบรอนจำนวน 2 อะตอมและออกซิเจนจำนวน 3 อะตอม ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลมีค่า

$$\begin{aligned} &= (\text{น้ำหนักอะตอมโบรอน} \times 2) + (\text{น้ำหนักอะตอม ออกซิเจน} \times 3) \\ &= (10.811 \times 2) + (15.9994 \times 3) \\ &= 69.6202 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2

คำนวณหาค่าน้ำหนักโมเลกุลของเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 2 อะตอม ไฮโดรเจนจำนวน 6 อะตอม และ ออกซิเจนจำนวน 1 อะตอม ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุลมีค่า} &= (\text{น้ำหนักอะตอมคาร์บอน} \times 2) + (\text{น้ำหนักอะตอมไฮโดรเจน} \times 6) \\ &\quad + (\text{น้ำหนักอะตอมออกซิเจน} \times 1) \\ &= (12.01115 \times 2) + (1.00797 \times 6) + (15.9994 \times 1) \\ &= 46.0695 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของโบรอน และคาร์บอนจาก

โบรอนไตรออกไซด์ หนัก 69.6202 กรัม เป็นน้ำหนักของโบรอน 21.622 กรัม

$$\text{ดังนั้นมีเปอร์เซ็นต์ของโบรอน} = \frac{21.622 \times 100}{69.6202} = 31.0571 \text{ กรัม}$$

เอทิลแอลกอฮอล์ หนัก 46.0223 กรัม เป็นน้ำหนักของคาร์บอน 24.0223 กรัม

$$\text{ดังนั้นมีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน} = \frac{24.0223 \times 100}{46.0692} = 52.1439 \text{ กรัม}$$

ขั้นตอนที่ 4

เนื่องจากสาร 1 โมลประกอบด้วยอะตอมจำนวน 6.02×10^{23} อะตอม

ดังนั้น โบรอนไตรออกไซด์ 1 โมล ประกอบด้วยโบรอนจำนวน $6.02 \times 10^{23} \times 31.0571$ อะตอม

ถ้า โบรอนไตรออกไซด์ A โมล ประกอบด้วยโบรอนจำนวน $6.02 \times 10^{23} \times 31.0571 \times A$ อะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของเอทิลแอลกอฮอล์

ถ้ามีเอทิลแอลกอฮอล์ B โมล จะประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน $6.02 \times 10^{23} \times 52.1439 \times B$ อะตอม โดยที่

$$A = \frac{\text{น้ำหนักโบรอนไตรออกไซด์ (กรัม)}}{69.6202} \quad \text{โมล} \quad (1)$$

$$B = \frac{\text{น้ำหนักเอทิลแอลกอฮอล์ (กรัม)}}{46.0695} \quad \text{โมล} \quad (2)$$

ดังนั้นอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน (B / C) มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} B/C &= \frac{6.02 \times 10^{23} \times 31.0571 \times A}{6.02 \times 10^{23} \times 52.1439 \times B} \times 10^6 \\ &= \frac{31.0571 \times A}{52.1439 \times B} \times 10^6 \quad \text{ppm} \end{aligned} \quad (3)$$

สำหรับน้ำหนักของโบรอนไตรออกไซด์ที่ค่าอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน ที่เตรียมสารละลายจำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงน้ำหนักโบรอนไตรออกไซด์ที่ค่า B/C ต่าง ๆ ที่เตรียมเอทิลแอลกอฮอล์จำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

B / C (ppm)	น้ำหนัก โบรอนไตรออกไซด์ (กรัม)
0.1	0.00001
1	0.0001
10	0.0010
100	0.0100
1000	0.1001
10000	1.0011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เทคนิคการวัดวิธีเข็มร้อน

เทคนิคการวัดแบบเข็มร้อน เป็นการทำให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่ปลายด้านหนึ่ง ซึ่งทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามแท่งวัสดุ และพบว่ามีการปรากฏการณ์เกิดขึ้นตามมา คือ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ความเข้มข้นของประจุพาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะในแท่งวัสดุขึ้น จากหลักการดังกล่าวจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรว่ามีพาหะหลักในการนำกระแสชนิดใด การทดลองเพื่อหาคคุณสมบัติดังกล่าว จะใช้อุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 65 จากรูปจะเห็นว่าชุดอุปกรณ์ ประกอบด้วย เข็ม 2 เล่ม จี๊ดบนฟิล์มเพชร โดยเข็ม A ทำหน้าที่เป็น เข็มความร้อน มีลวดทั้งสี่เตนพันอยู่โดยรอบ ส่วนเข็ม B จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง นำกัลวานอมิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกของกัลวานอมิเตอร์ต่อกับเข็ม B และที่ขั้วลบต่อที่เข็ม A เข็มให้ความร้อนแก่เข็ม A ผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7

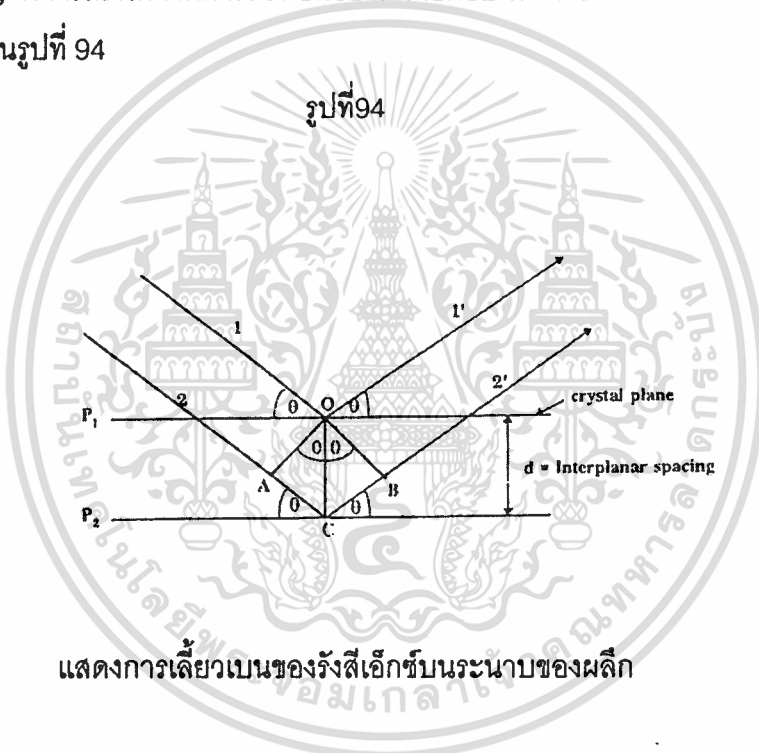
แสดงผลการทดลองการวัดแบบเข็มร้อนที่ได้หลังจากให้ ความร้อนกับเข็ม A

เข็มกัลวานอมิเตอร์	ชนิดพาหะ
ขั้วทางบวก	โฮล
ขั้วทางลบ	อิเล็กตรอน

ภาคผนวก ก

เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

Bragg ได้แสดงให้เห็นว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถเขียนเป็นสมการแบบง่าย ๆ ได้ โดยคิดว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบในแลตทิซ ซึ่งสมการของ Bragg พิจารณาได้จากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบในแลตทิซ P_1 และ P_2 ที่ขนานกันดังแสดงในรูปที่ 94



แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึก

ลำรังสีเอ็กซ์ที่ 1 และ 2 ตกทำมุม θ กับระนาบ P_1 และ P_2 อิเล็กตรอนที่สมมุติว่าอยู่ที่จุด O และ C จะถูกบังคับให้สั่นตาม oscillating field ของรังสีเอ็กซ์ที่เข้ามา ทำให้มีพลังงานแผ่มาทุกทิศทาง และพบว่าในทิศทางที่รังสีที่ 1 และ 2 ออกมาทำมุม θ ซึ่งเสมือนเกิดการสะท้อนออกมาของรังสีเอ็กซ์ จะทำให้ความเข้มข้นรังสีเอ็กซ์สูงสุด หรือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันขึ้น

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

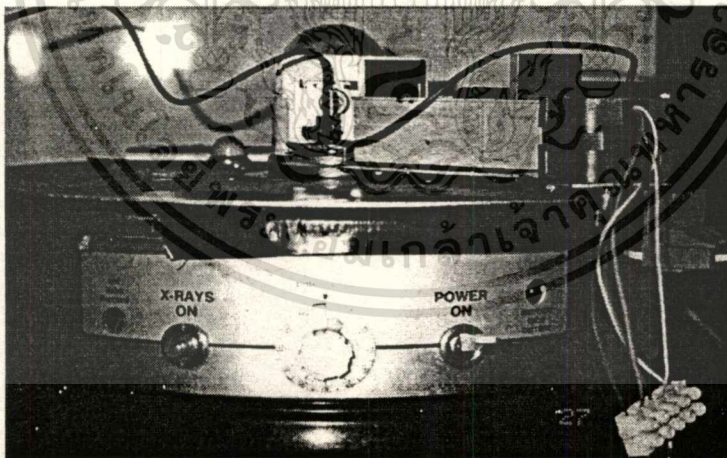
$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (1)$$

เรียกสมการ (1) Bragg's law และ n คือลำดับของการเลี้ยวเบน ($n = 1, 2, 3, \dots$) จะเห็นว่าการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ จะทำมุม θ เมื่อเทียบกับ ระนาบผลึก และจะทำมุม 2θ เมื่อเทียบกับ รังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ

เครื่อง X - ray diffractometer

เป็นการวัดที่ดัดแปลงมาจาก Debye-Scherrer แต่แทนที่จะใช้ฟิล์มก็ใช้ Geiger, Proportional Counter หรือ Scintillator รับสัญญาณที่รังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนมาโดยตัววัดต่าง ๆ นี้หมุนไปตามมุมต่าง ๆ ได้ เมื่อรับสัญญาณแล้วก็ขยายสัญญาณพร้อมทั้งแสดงผลออกมาเป็นกราฟหรือยอดของเส้นการเลี้ยวเบน ความเร็วที่ตัววัดนี้สามารถสแกนเลือกค่ามุมต่าง ๆ ได้จาก 1/8 องศาต่ออนาที ถึง 2 องศาต่ออนาที ส่วน specimen นั้นหมุนรับรังสีเอ็กซ์ได้ตามมุมต่าง ๆ จึงเลือกยอดที่ต้องการศึกษาจริง ๆ ได้ ความเร็วเลือกได้ 2 จังหวะ ความเร็วที่เร็วที่สุดคือ 2 องศาต่ออนาที ใช้ในการตรวจค่ายอดต่าง ๆ ส่วนความเร็วช้า ๆ นั้น ใช้ศึกษาค่ายอดสำคัญ ๆ ซึ่งนำไปสู่การหาขนาดของเม็ดผลึก และ strain ในผลึก

รูปที่ 95



แสดงระบบการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วย Diffractometer
เครื่องเล็ก TELTRON ขนาด 30 KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

เทคนิค Raman Spectroscopy

Raman Spectroscopy ใช้ในการศึกษาการสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสาร หรือ บริเวณพื้นผิวของผลึกการทำงานของ Raman Spectroscopy จะอาศัยปรากฏการณ์การกระเจิงของแสงเข้าช่วย คือ การวัดการลดลงของความเข้มของแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน ผลของ Raman จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การกระเจิงของโมเลกุลอยู่บนพื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้น เป็นผลจากการชนกันระหว่าง โฟตอน กับการสั่นของแลตทิซ หรือ โฟนอน การกระเจิง ของ Raman อาศัยเลเซอร์ที่มีความยาวเดียวในการกระตุ้น ทำให้เกิดคู่ของ โฟนอน กับ โฟตอน สนามไฟฟ้าของความเข้มลำแสงบังคับแสงให้มีคลื่นไปทางเดียวในผลึก เมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำแสงทำให้เกิดการสั่นของแลตทิซขึ้น โหมดการสั่นจะขึ้นอยู่กับพันธะของอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman Spectrum สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็งได้

การกระเจิงของ Raman มีประโยชน์ในการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของ คาร์บอน โดยเฉพาะฟิล์มเพชรที่สร้างจาก วิธีการ CVD ซึ่งจะมีความไวต่อธรรมชาติ ของพันธะ คาร์บอน ดังนั้น จึงสามารถแยกชนิดของคาร์บอน ออกเป็น เพชร , กราไฟท์ , อมอร์ฟัสคาร์บอน และ ไฮโดรจีเนตคาร์บอน

สำหรับเพชรแล้วความเข้มของยอด Raman อันดับที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} และ อันดับที่ 2 อยู่ที่ 2458 cm^{-1} ส่วนของกราฟท์ความเข้มอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 อยู่ที่ตำแหน่ง 1580 cm^{-1} และ 3240 cm^{-1} ตามลำดับ รวมทั้งยอดที่เกิดที่ตำแหน่ง 1355 cm^{-1} ที่เป็นของ microcrystalline graphite สำหรับในเทอมของอมอร์ฟัสคาร์บอน ยอดมีลักษณะกว้างออกที่ ตำแหน่งประมาณ 1550 cm^{-1} และ 1355 cm^{-1} ด้วยเหตุที่ประสิทธิภาพของการกระเจิง Raman สำหรับกราฟท์ มีค่ามากกว่าเพชร นอกจากนี้การที่ยอดของ Raman กว้างออกสามารถดูคุณสมบัติของโครงสร้างของผลึกได้ ซึ่งสามารถสรุปยอดหลักของ Raman จากเพชร ได้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8

แสดงยอดหลักของ Raman จากเพชร

ตำแหน่งของยอด (cm^{-1})	ชนิดของคาร์บอน	หมายเหตุ
~1140	เพชรรูปทรง cubic ขนาดเล็ก ($<0.1 \mu\text{m}$)	พบได้ทั่วไปในฟิล์มเพชรซึ่งมีขนาดเกรนเล็กมาก ($<0.1 \mu\text{m}$)
1315 -1326	เพชรรูปทรง hexagonal	มีความกว้างยอดมาก
1332	เพชรรูปทรง cubic	ยอดตำแหน่งที่ 1
1345	อะมอร์ฟัสคาร์บอน	มีความกว้างของยอดมาก
1355	microcrystalline graphite	พบในวัสดุที่มีลักษณะเกรนเล็ก
1550	อะมอร์ฟัส หรือ คาร์บอนที่มีลักษณะเหมือนเพชร(diamond-like-carbon)	มีความกว้างของยอดมาก
1580	กราไฟท์	ยอดตำแหน่งที่ 1
2458	เพชรรูปทรง cubic	ยอดตำแหน่งที่ 2
2710	microcrystalline graphite	ยอดตำแหน่งที่ 2
3240	กราไฟท์	ยอดตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

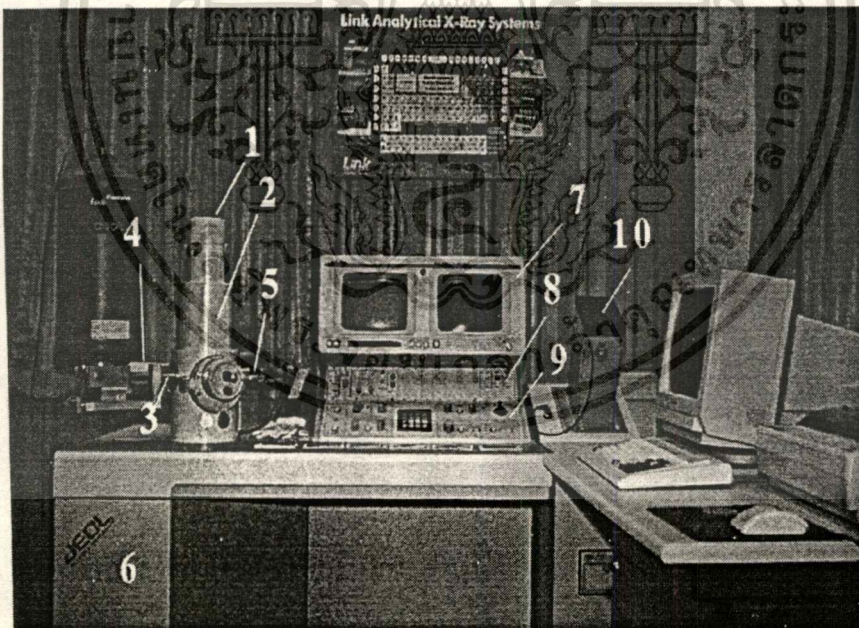
ภาคผนวก จ

เทคนิค Scanning Electron Microscopy

ลักษณะการทำงาน

การทำงานของ Scanning Electron Microscopy (SEM) ทำโดยการกวาดโฟกัสของลำแสงอิเล็กตรอนตลอดพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับสองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสง มีขนาด 10-20 นาโนเมตร โดยขนาดของลำแสงมีความสำคัญต่อความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มแสงของอิเล็กตรอน อันดับสองที่ปล่อยออกขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของลักษณะพื้นผิวเองซึ่งทำให้ตำแหน่งของตัวจับไม่สมดุล ลักษณะของผิวที่ได้จะแสดงบน cathode ray tube (CRT)

รูปที่ 96



แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM - 5200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อได้เปรียบ

SEM มีข้อได้เปรียบกว่า microscopes ทางแสงอื่น ๆ เนื่องจาก SEM มีกำลังขยายสูง (ปกติอยู่ในช่วง 50 ถึง 40,000 x) ความคมชัดของภาพ (2.5 - 10 นาโนเมตร) ความลึกของสนาม (มากกว่า 500 เท่า) และสามารถเห็นภาพได้สามมิติ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค TEM (transmission electron microscopy) ซึ่งต้องใช้สารตัวอย่างที่มีความบางมากๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านไปได้ จึงจะทำการวัดได้ แต่ SEMสามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นของแข็งได้เลย ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง SEM แสดงได้ดังรูปที่ 96

พิจารณาจากรูปเครื่อง SEM ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

- 1) อิเล็กตรอนกันน์ : ปล่อยอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งนี้
- 2) ระบบอิเล็กตรอนออปติคอล : ประกอบด้วย อาโนด เลนส์รวมแสง เลนส์ออบเจกทิฟ
- 3) ช่องใส่ชิ้นงานที่ต้องการวัด
- 4) ตัวตรวจจับสัญญาณ ทำหน้าที่ตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สอง และอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับ
- 5) ส่วนที่ยึดติดพอร์ต
- 6) ช่องเก็บอุปกรณ์
- 7) จอแสดงผล
- 8) ส่วนปุ่มปรับสัญญาณต่าง ๆ
- 9) ส่วนควบคุมการทำงาน
- 10) ส่วนฟิล์มโพลาไรซ์สำหรับแสดงผลเป็นรูปถ่าย

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายบัญชา กิตติรังสี
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2514
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2535
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	<ol style="list-style-type: none"> 1. ผลของอุณหภูมิฐานรองต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเพชร 2. ซอตติโคโฮโดที่สร้างจากฟิล์มบางเพชร 3. ผลของก๊าซในอากาศที่มีต่อการเกิดชั้นพื้นผิวนาไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ชนิดพีในระบบ CVD แบบความร้อน 4. แบคเวอริตโคโฮโดที่สร้างจากฟิล์มบางเพชร