

การศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD เพื่อใช้งานเป็น  
สิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำ

THE STUDY OF DIAMOND FILM SYNTHESIS BY HFCVD FOR  
SEMICONDUCTOR DEVICES APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ศึกษาเทคโนโลยีการผลิตฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD เพื่อใช้งานเป็น

สิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-043-072

การศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD เพื่อใช้งานเป็น  
สิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำ

THE STUDY OF DIAMOND FILM SYNTHESIS BY HFCVD FOR  
SEMICONDUCTOR DEVICES APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF DIAMOND FILM SYNTHESIS BY HFCVD FOR  
SEMICONDUCTOR DEVICES APPLICATION

WASIN PANYALERT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2016-EN-M-043-072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2016**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD เพื่อใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

Thesis Title The Study of Diamond Film Synthesis by HFCVD for Semiconductor Devices Application

นักศึกษา นายวศิน ปัญญาเลิศ

รหัสประจำตัว 56601476

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ รุติรุ่งเรือง

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-043-072

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
ดร.นรินทร์	อติวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.วิสุทธิ	รุติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 14.00-16.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD เพื่อใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
นักศึกษา	นายวศิน ปัญญาเลิศ
รหัสนักศึกษา	56601476
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) เพื่อใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยเริ่มจากการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD ซึ่งวิธีนี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากทั้งในด้านการวิจัยและการค้า เนื่องจากต้นทุนการปฏิบัติงานต่ำ และมีความปลอดภัยสูง ทั้งยังสามารถสังเคราะห์เพชรในรูปแบบของฟิล์มบนฐานรองซิลิกอนได้อีกด้วย จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์และภาพถ่ายจากเครื่อง SEM เพื่อดูลักษณะระนาบของฟิล์มเพชรที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิฐานรองขณะการสังเคราะห์ สำหรับคุณสมบัติของฟิล์มเพชรจะทำการศึกษากับเครื่อง Raman spectroscope เพื่อยืนยันความเป็นเพชรและสิ่งเจือปนมา การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD นั้นอาจเกิดการก่อตัวของอะตอมคาร์บอนในรูปแบบโครงสร้างอื่น ๆ เช่น แกรไฟต์ และอสัณฐานคาร์บอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการแอนนیلเพื่อลดข้อบกพร่องนั้น จากการเติมอะตอมโบรอนและอะตอมฟอสฟอรัสเข้าไปในฟิล์มเพชร พบว่าคุณสมบัติของฟิล์มเพชรจะแสดงเป็นฟิล์มเพชรชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดเอ็น ตามลำดับ ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยการตรวจสอบด้วยวิธีเข็มร้อน สุดท้ายเป็นการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เช่น รอยต่อพีเอ็น และห้วัดฮอลล์ เพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มการนำฟิล์มเพชรไปใช้งานทางด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	The Study of Diamond Film Synthesis by HFCVD for Semiconductor Devices Application
<b>Student</b>	Mr. Wasin Panyalert
<b>Student ID</b>	56601476
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

## ABSTRACT

This thesis proposes the diamond film synthesis for semiconductor devices application by Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD). This research started from the study of the synthesis of diamond film by HFCVD, which is of interested for both research and commercial scales due to its low operating cost and high safety level. In addition, it can be applied to synthesize synthetic diamond film on silicon substrate. After that, the synthetic diamond film was characterized its plane as a function of substrate temperature during synthesis by using microscope and scanning electron microscope (SEM). The quality of diamond film was analyzed to confirm the being of diamond and contaminants using Raman spectroscopy. The synthesis of diamond film by HFCVD may cause formation of carbon atom in other structures such as graphite and amorphous carbon; hence annealing is required to reduce such defects. When either boron or phosphorous atom was added into the diamond film, the diamond film shows properties of p-type and n-type diamond film, respectively. These properties can be confirmed using Hot-Point Probe measurement. Finally, the synthetic diamond film was applied to make semiconductor devices such as p-n junction and Hall sensor in order to present the tendency of applying diamond film for semiconductor devices.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ ตลอดจนอบรมสั่งสอน และความอนุเคราะห์ในทุกๆ ด้านจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โยธิน วงศ์ประเสริฐ, ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ จากภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สจล. และ ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรรค์ จากวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สจล. ที่ให้ความเมตตา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ตั้งใจให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร.จิรวัดน์ ปราบเขต, นักวิจัย และ เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองบางส่วน เครื่องมือวัดในการวิเคราะห์ชิ้นงาน และการให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ รวมทั้งอธิบายถึงกระบวนการในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ ดร.ลัดดาวัลย์ สุภาติ และ พนักงาน บริษัทเวสต์เทิร์นดีจิทัล (WD) ที่ให้ความอนุเคราะห์ สำหรับเครื่อง Raman spectroscope รวมไปถึงคำแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบคุณ ภาสภณ มโนสุกฤตกุล ที่ได้ช่วยถ่ายทอดความรู้ และเทคนิคในการค้นคว้าข้อมูลบางส่วน รวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคการวัดผลและมุมมองทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติ พี่ น้อง ที่ให้ความรักความเมตตา อบรมสั่งสอน และสนับสนุนทางการเรียนแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

วศิน ปัญญาเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อ.....	XI
รายการสัญลักษณ์.....	XII
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ต่างๆ.....	1
1.2.1 Thermal Enhanced CVD Methods.....	2
1.2.1.1 Filament-Assisted Thermal CVD.....	2
1.2.2 Plasma-Enhanced CVD Methods.....	3
1.2.2.1 DC-Plasma-Assisted CVD.....	3
1.2.2.2 DC-Plasma Jet CVD.....	4
1.2.2.3 RF-Plasma-Assisted CVD.....	5
1.2.2.4 Microwave-Plasma-Assisted CVD.....	6
1.2.2.5 Electron Cyclotron Resonance Microwave-Plasma-Assisted CVD.....	8
1.2.3 Combustion Flame-Assisted CVD.....	9
1.3 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร.....	10
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	12
1.5 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา.....	13
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	14
2.1 ลักษณะโครงสร้างของคาร์บอน.....	14
2.2 ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและชนิดพี.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 พิล์มเพชรชนิดพี.....	16
2.2.2 พิล์มเพชรชนิดเอ็น.....	17
2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร .....	18
2.4 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน .....	19
2.5 ทฤษฎีรอยต่อ พี เอ็น .....	20
2.5.1 ศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ (Built in Potential : $V_{bi}$ ).....	21
2.5.2 ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ.....	22
2.6 หลักการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM .....	23
2.7 หลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy .....	24
2.8 การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มด้วยวิธีเข็มร้อน.....	27
2.9 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กทรินซิค .....	28
บทที่ 3 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเพื่อประยุกต์ใช้งาน .....	32
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง .....	32
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร .....	33
3.3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี (p-type) และ ชนิดเอ็น (n-type) ด้วยวิธี HFCVD...	36
3.4 วิธีการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรด้วยวิธีแอนนัล .....	40
3.5 กระบวนการสร้างหัววัดฮอลล์ด้วยฟิล์มเพชร .....	41
3.5.1 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชร.....	43
3.6 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นรอยต่อพีเอ็น .....	46
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	48
4.1 เงื่อนไขที่สำคัญต่อการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD .....	48
4.2 เงื่อนไขที่สำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มเพชรด้วยวิธีแอนนัล.....	49
4.3 การวิเคราะห์ลักษณะของฟิล์มเพชรเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	50
4.4 การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่ายจาก SEM (Scanning Electron Microscope).....	51
4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Raman Spectroscope.....	53
4.6 การทดสอบการตอบสนองของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีและชนิดเอ็นต่อสนามแม่เหล็ก	57
4.7 การวิเคราะห์การนำไฟฟ้าของฟิล์มด้วยวิธีเข็มร้อน.....	69
4.7.1 การตรวจสอบฟิล์มเพชรชนิดพี.....	70
4.7.2 การตรวจสอบฟิล์มเพชรชนิดเอ็น.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพอร์.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
เอกสารอ้างอิง .....	75
ภาคผนวก ก. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	77
ภาคผนวก ข. ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	78
ประวัติผู้เขียน.....	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	18
2.2 ตารางแสดงค่ายอดของ Raman Spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอน..	26
2.3 ตารางแสดงการขึ้นของเข็มกลบ์วานอมิเตอร์.....	28
4.1 ตารางเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร .....	48
4.2 ตารางเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มเพชรด้วยวิธีแอนนัล .....	49
4.3 ตารางแสดงระนาบต่างๆของฟิล์มเพชรที่เกิดจากการให้อุณหภูมิฐานรองแต่ละค่า .....	49
4.4 ตารางวิเคราะห์กราฟ Raman Spectroscopy.....	53
4.5 ตารางผลการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4 (ขากระแสไฟฟ้า) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี.....	60
4.6 ตารางผลการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3 (ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี.....	61
4.7 ตารางผลการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4 (ขากระแสไฟฟ้า) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น.....	63
4.8 ตารางผลการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3 (ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น.....	64
4.9 ตารางแสดงผลของการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี ....	66
4.10 ตารางแสดงผลของการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น..	68
4.11 ตารางแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชร.....	71
ก.1 ตารางค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD ..... 3
1.2	แผนภาพระบบ DC-Plasma-Assisted CVD ..... 4
1.3	แผนภาพระบบ DC-Plasma Jet CVD ..... 5
1.4	แผนภาพระบบ RF-Plasma-Assisted CVD ..... 6
1.5	แผนภาพระบบ Microwave-Plasma-Assisted CVD ..... 7
1.6	แผนภาพระบบ Electron Cyclotron Resonance Microwave-Plasma-Assisted CVD ..... 8
1.7	แผนภาพระบบ Combustion Flame-Assisted CVD ..... 9
2.1	โครงสร้างของเพชร ..... 14
2.2	โครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์ ..... 15
2.3	พันธะระหว่างอะตอมสารเจือชนิดพีกับอะตอมของคาร์บอน..... 16
2.4	พันธะระหว่างอะตอมสารเจือชนิดเอ็นกับอะตอมของคาร์บอน..... 17
2.5	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD..... 19
2.6	โครงสร้างอย่างง่ายของรอยต่อพีเอ็น..... 21
2.7	แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าภายใน และศักย์ไฟฟ้าภายใน ที่บริเวณรอยต่อพีเอ็น..... 22
2.8	แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น ..... 25
2.9	แผนผังการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มด้วยวิธีเข็มร้อน ..... 28
2.10	ปรากฏการณ์ของฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี..... 29
3.1	ครีมเพชร (Diamond Paste)..... 33
3.2	แผนภาพของการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD ..... 34
3.3	แผนภาพการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี (p-type) ด้วยวิธี HFCVD ..... 37
3.4	แผนภาพการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็น (n-type) ด้วยวิธี HFCVD ..... 37
3.5	โบรอนไตรออกไซด์ (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) และ ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) ..... 38
3.6	แผนภาพการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรด้วยวิธีแอนนีส ..... 40
3.7	ขั้นตอนการสร้างหัววัดฮอลล์จากฟิล์มเพชรชนิดพี และชนิดเอ็นที่สังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD 42
3.8	ภาพหัววัดฮอลล์ที่สร้างจากฟิล์มเพชร ..... 42
3.9	เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กอิเล็กทรอนิกส์ ..... 43
3.10	แผนภาพการเตรียมทดสอบฟิล์มเพชรเพื่อใช้งานเป็นหัววัดฮอลล์ ..... 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) สำหรับหัววัดฮอลล์เพชร .....	44
3.12 มัลติมิเตอร์ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์ .....	45
3.13 เกาส์มิเตอร์ (Gauss Meter) สำหรับวัดความแรงสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
3.14 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มเพชรเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นรอยต่อพีเอ็น ด้วยวิธี HFCVD.....	47
4.1 ภาพของฟิล์มเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	50
4.2 ภาพของฟิล์มเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	50
4.3 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรสังเคราะห์อุณหภูมิฐานรอง 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบเป็นระนาบ (111).....	51
4.4 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรสังเคราะห์อุณหภูมิฐานรอง 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบเป็นระนาบ (111) และ (100).....	52
4.5 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรสังเคราะห์อุณหภูมิฐานรอง 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบเป็นระนาบ (100).....	52
4.6 กราฟจากการวัดด้วยเครื่อง Raman Spectroscope ของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยยังไม่ได้รับการแอนนีสล.....	54
4.7 กราฟจากการวัดด้วยเครื่อง Raman Spectroscope ของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการแอนนีสลภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน อุณหภูมิฐานรองขณะทำการแอนนีสล 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที.....	55
4.8 กราฟจากการวัดด้วยเครื่อง Raman Spectroscope ของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยยังไม่ได้รับการแอนนีสล.....	56
4.9 กราฟจากการวัดด้วยเครื่อง Raman Spectroscope ของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการแอนนีสลภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน อุณหภูมิฐานรองขณะทำการแอนนีสล 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที.....	57
4.10 แผนผังการเตรียมการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก .....	58
4.11 วงจรวัดความเป็นโอห์มมิคของหัววัดฮอลล์เพชร.....	59
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4 (ขาที่ให้กระแสไฟฟ้า) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี.....	61
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3 (ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี .....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4 (ขาที่ให้กระแสไฟฟ้า) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น .....	64
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3 (ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น .....	65
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (Gauss) และความต่างศักย์ฮอลล์ (V) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี.....	67
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (Gauss) และความต่างศักย์ฮอลล์ (V) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น.....	68
4.18 วิธีการหาชนิดของพาหะในการนำกระแสไฟฟ้าของฟิล์มเพชรด้วยวิธี เข้มร้อน.....	69
4.19 วงจรที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชร.....	71
4.20 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชร.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
SiO <sub>2</sub>	Silicon dioxide	ซิลิกอนไดออกไซด์
B	Boron	โบรอน
C	Carbon	คาร์บอน
P	Phosphorus	ฟอสฟอรัส
GaAs	Gallium arsenide	แกเลียมอะเซไนต์
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Boron trioxide	โบรอนไตรออกไซด์
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphorus pentaoxide	ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์
p-Diamond film	p type Diamond film	ฟิล์มเพชรชนิดพี
n-Diamond film	N type Diamond film	ฟิล์มเพชรชนิดเอ็น
H <sub>2</sub>	Hydrogen gas	ก๊าซไฮโดรเจน
Si	Silicon	ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$k$	คือ	ค่าคงที่โบสต์มันน์
$N_A$	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้รับ
$N_D$	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้ให้
$q$	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
$R_H$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์
$F$	คือ	แรงลอเรนซ์
$T$	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
$v$	คือ	ความเร็วของพาหะ
$V_{bi}$	คือ	แรงดันภายใน
$B$	คือ	ค่าสนามแม่เหล็ก
$V_H$	คือ	แรงดันฮอลล์
$I$	คือ	กระแส
$\mu$	คือ	สภาพคล่องของพาหะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
ความเร็วของอิเล็กตรอน	Thermal velocity
ค่าสภาพต้านทาน	Resistivity
รอยสัมผัส肖ตกี	Schottky contact
รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	Metal-semiconductor contact
รอยสัมผัสโอห์มมิก	Ohmic contact
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก	Extrinsic semiconductor
สารเจือ	Impurity
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	Light absorption coefficient
ศูนย์กลางการเกิดพาหะ	Generation center
อะซิโตน	Acetone
อัลตราโซนิค	Ultrasonic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เมื่อปีคริสตศักราช 1772 นักเคมีชาวฝรั่งเศส Antonie Laurent Lavoisier ได้ค้นพบเพชรในรูปผลึกของคาร์บอน โดยทดลองเผาเพชรในภาชนะที่ปิดสนิทด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านเลนส์ ผลที่ได้คือเกิดก๊าซ  $\text{CO}_2$  และผงถ่านเหลืออยู่ ต่อมา Sir. William Henry Bragg ได้ใช้ X-ray ศึกษาคาร์บอนและพบว่ามีความหลายรูปแบบคือ Cubic (เพชร), Hexagonal (แกรไฟต์) และ Amorphous นี่จึงเป็นจุดเริ่มต้นในการสังเคราะห์เพชรขึ้น กระทั่งเมื่อปีคริสตศักราช 1955 General Electric Research Laboratories (GE) ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี High-Pressure High-temperature (HPHT) เป็นผลสำเร็จ แต่วิธีนี้ต้องใช้อุณหภูมิและแรงดันสูง สำหรับการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำนั้นได้เริ่มต้นเมื่อปีคริสตศักราช 1949 โดย W.G. Eversole et al. ซึ่งประสบความสำเร็จในการสามารถสังเคราะห์บนผลึกเพชรได้จากก๊าซไฮโดรคาร์บอน ทำให้เริ่มมีการศึกษาการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำอย่างแพร่หลาย ต่อมาในปีคริสตศักราช 1956 Boris Spitsyn et al. ได้นำเสนอถึงการสร้างเพชรที่ความดันต่ำโดยใช้ความร้อนทำให้ก๊าซ  $\text{CCl}_4$  และ  $\text{CBr}_4$  แตกตัวเกิดเพชรบนผลึกเพชร พร้อมกันนั้นที่ Physical Chemistry Institute, Moscow ได้เริ่มทำการศึกษการสร้างเพชรที่ความดันต่ำเป็นครั้งแรกในโซเวียต กระทั่งปีคริสตศักราช 1971 Angus et al. ได้เสนอถึงการใช้อะตอมไฮโดรเจน ที่เกิดจากการแตกตัวบริเวณไส้หลอดทั้งสแตนด์ในการกำจัดแกรไฟต์ที่เกิดขึ้นขณะสังเคราะห์เพชร เพชรที่ได้จากการสังเคราะห์สามารถทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้โดยการผสมก๊าซ  $\text{B}_2\text{H}_6$  เข้าไปในก๊าซ  $\text{CH}_4$  ระหว่างการสร้าง วิธีนี้ถูกนำเสนอโดย Proferl et al. ในปีคริสตศักราช 1973 นับเป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาการใช้งานเพชรในทางอิเล็กทรอนิกส์

### 1.2 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ต่างๆ

ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธีสร้างที่มีผู้ให้ความสนใจแพร่หลาย มีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ

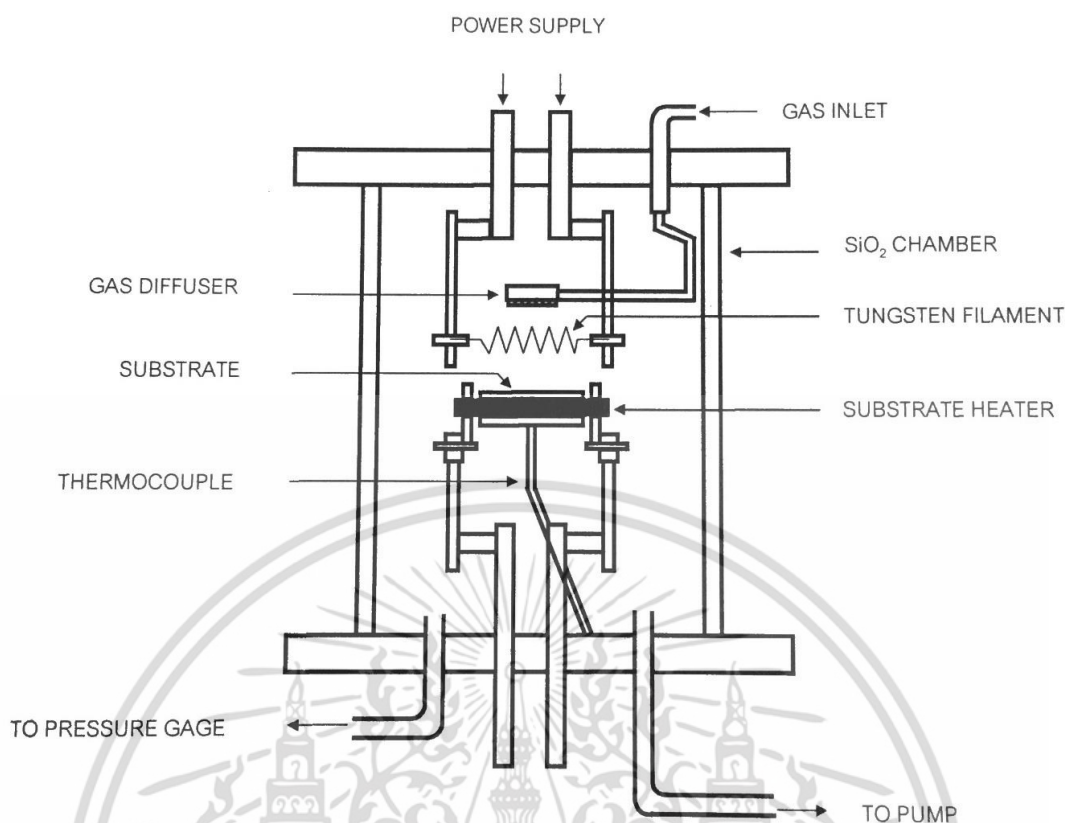
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CVD นี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม หลักๆได้ตามเทคนิคที่ใช้คือ Thermal-Enhanced CVD methods, Plasma-Enhanced CVD methods, Combustion Flame-Assisted CVD ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ อาทิเช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร อุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง อุณหภูมิของฐานรอง พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้ แต่ท้ายที่สุดฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีต่าง ๆ จากการตรวจสอบพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกันอันเป็นสิ่งที่ยืนยันได้ว่า แม้เทคนิคที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรต่างกันไป แต่ผลที่ได้คือฟิล์มเพชรเช่นเดียวกัน

## 1.2.1 Thermal Enhanced CVD Methods

### 1.2.1.1 Filament-Assisted Thermal CVD

วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Matsumoto et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผนภาพของวิธี Filament-Assisted Thermal CVD แสดงดังรูป 1.1 ภายใน Chamber มีไส้หลอดทั้งสแตนเลสที่ทำหน้าที่กำเนิดความร้อน อุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนเลสสูงถึง 2,000-2,300 °C ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดอุณหภูมิ 700-1,000 °C เมื่อก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปใน Chamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตนเลสจะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม ฐานรองสามารถเพิ่มแรงดันไบอัสเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวเคลียชัน และอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทน (0.5-2%) ต่อก๊าซไฮโดรเจน กระทำที่ความดัน 10-100 ทอร์ ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิด 1-10  $\mu\text{m/hr}$  วิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูง ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดี สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ในบริเวณกว้าง และมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอดทั้งสแตนเลส เนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดทั้งสแตนเลสเป็นเวลานาน ทั้งสแตนเลสจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็น  $\alpha\text{-W}_2\text{C}$  ทำให้ไส้หลอดเปราะและผิครูปได้ง่าย



รูปที่ 1.1 แผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD

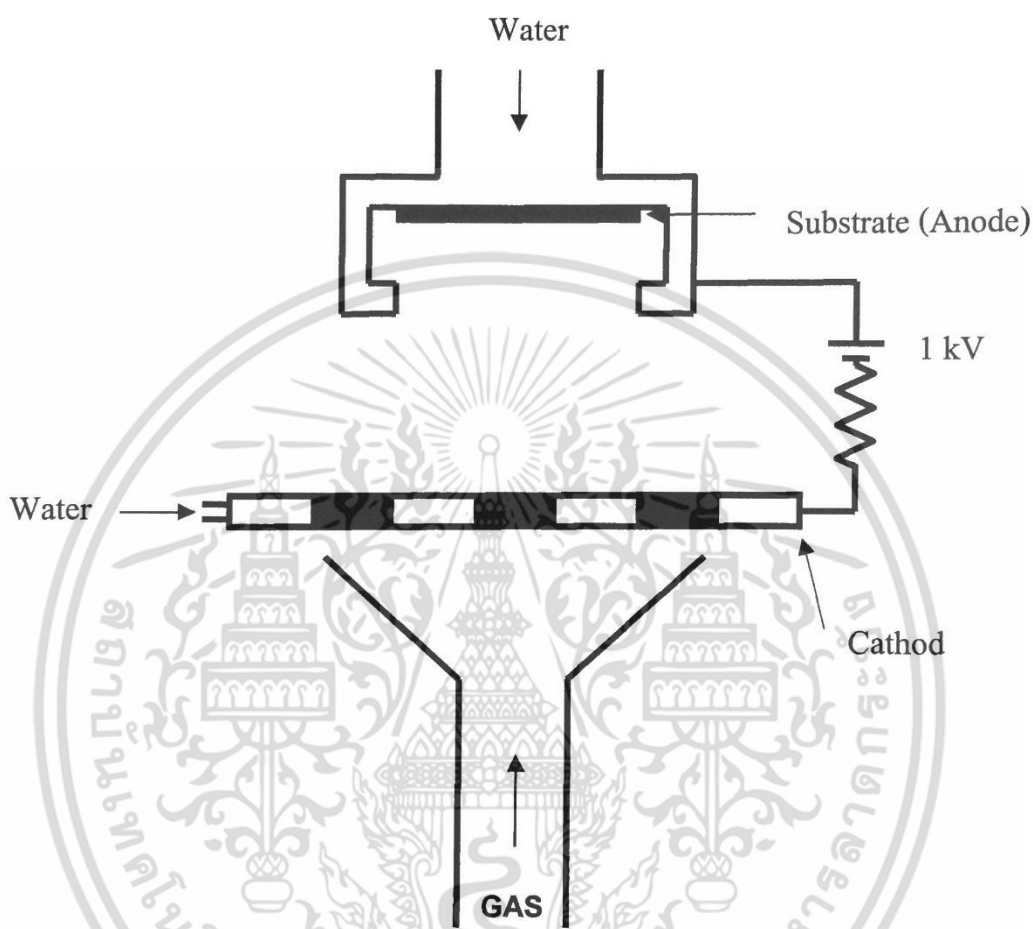
## 1.2.2 Plasma-Enhanced CVD Methods

### 1.2.2.1 DC-Plasma-Assisted CVD

วิธีนี้พลาสมาของก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนจะถูกกระตุ้นให้แตกตัวด้วยการไบอัสไฟ DC ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 อันที่วางขนานกันอยู่โดยฐานรองได้รับการไบอัสเป็นแอโนด ส่วนเพลทอีกอันหนึ่งที่เหนือถูกไบอัสเป็นแคโทด แผ่นอิเล็กโทรดจะถูกไบอัสด้วยแรงดัน 1 kV ความหนาแน่นกระแส  $4 \text{ A/cm}^2$  เมื่อก๊าซไหลผ่านบริเวณระหว่างแคโทดและแอโนด จะเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาขึ้น ฐานรองมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $600\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$  และด้านหลังจะมีน้ำไหลผ่านเพื่อระบายความร้อน ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทน (0.5-2%) ต่อก๊าซไฮโดรเจนกระทำที่ความดัน 200 ทอร์ วิธีนี้จะมียัตราการเกิดของฟิล์มเพชรและความหนาแน่นของการนิวเคลียชันสูง (Suzuki et al. รายงานว่าค่าอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรสูงถึง  $20 \text{ } \mu\text{m/hr}$  และความหนาแน่นของการนิวเคลียชัน  $10^8/\text{cm}^2$  บนฐานรอง Si และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยไม่ขึ้นอยู่กับการเตรียมพื้นผิวฐานรอง) ฟิล์มเพชรที่สร้างได้จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพดีสามารถสร้างได้ในบริเวณกว้าง (เส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 10 cm) แต่ในบางครั้งฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นพบว่ามีสารปนเปื้อนเนื่องจากแผ่นอิเล็กโทรดถูกกัดกร่อน



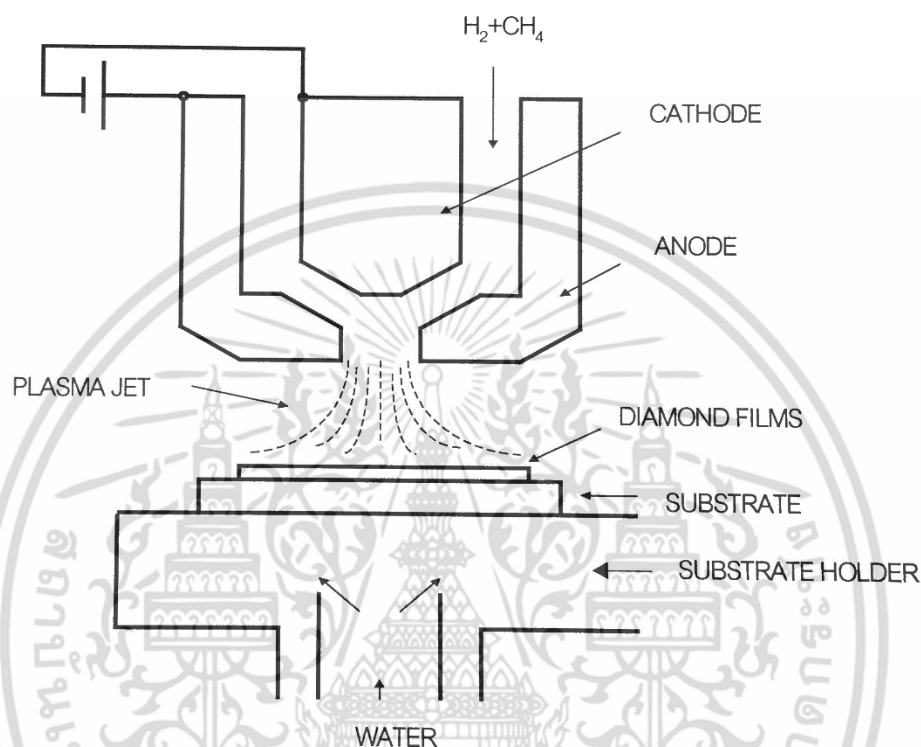
รูปที่ 1.2 แผนภาพระบบ DC Plasma-Assisted CVD

#### 1.2.2.2 DC-Plasma Jet CVD

วิธี DC-Plasma Jet CVD นี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Plasma Torch Activation เป็นวิธีที่มีอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรสูงกว่าทุกวิธีคือมีค่าถึง 60  $\mu\text{m/hr}$  (Ohtake et al. รายงานว่าอัตราการเกิดสูงสุดที่เคยสร้างได้ประมาณ 1,000  $\mu\text{m/hr}$ ) แต่ฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีนี้มีคุณสมบัติพอใช้ แผนภาพของวิธี DC-Plasma Jet CVD แสดงไว้ในรูปที่ 1.3 ระบบประกอบด้วยขั้วแคโทดวางอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วแอโนด ก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนถูกปล่อยให้ไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 4,000  $^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นก๊าซจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนเกิดการแตกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพลาสมาขึ้น ฐานรองจะวางอยู่ภายใต้ขั้วแอโนดและแคโทดห่างประมาณ 1-2 cm และมีอุณหภูมิประมาณ 1,000 °C ด้านล่างของฐานรองจะถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ วิธีนี้ฟิล์มเพชรจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ปัญหาที่พบคือ ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีขนาดพื้นที่เล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 mm.) และการควบคุมอุณหภูมิได้ยากเนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซมีค่าสูง



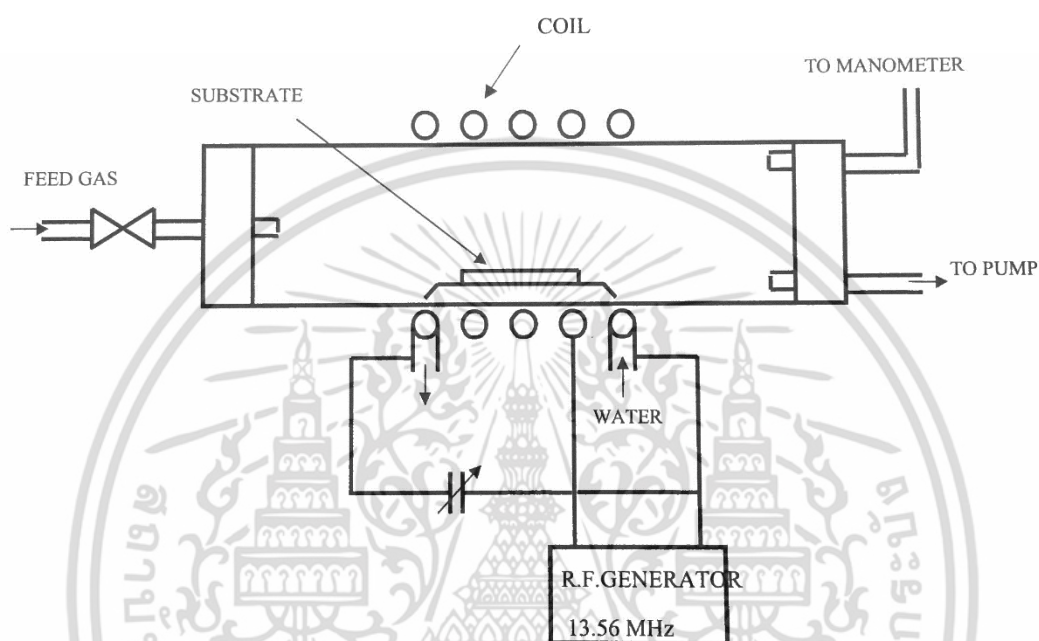
รูปที่ 1.3 แผนภาพระบบ DC-Plasma Jet CVD

### 1.2.2.3 RF-Plasma-Assisted CVD

วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Setaka et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผนภาพของวิธีนี้สามารถแสดงในรูปที่ 1.4 จากรูประบบประกอบด้วย ท่อควอตซ์ คอยล์ และ RF-Generator คลื่นวิทยุถูกสร้างขึ้นจาก RF-Generator ที่ความถี่ 13.56 MHz ส่งผ่านไปคอยล์ ทำให้เกิดพลาสมาของก๊าซขึ้นในบริเวณนั้น ฐานรองจะมีอุณหภูมิประมาณ 800 °C เนื่องจากผลของการเหนี่ยวนำความร้อนจากพลาสมา วิธีนี้จะใช้ High power ในการสร้างฟิล์มเพชรเนื่องจากพลังงานโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ความถี่วิทยุ 13.56 MHz ความดัน 1 ทอร์ มีค่าประมาณ 4 eV ซึ่งเพียงพอสำหรับการทำให้ไฮโดรเจนแตกตัว ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Power ในการ Discharge เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลจากการใช้ High power จะทำให้เกิดไอระเหยที่บริเวณผิวของท่อควอตซ์ ส่งผลให้ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีสารปนเปื้อนจำพวก SiC เกิดขึ้น วิธี RF-Plasma-  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญแต่เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Assisted CVD นี้จะได้ฟิล์มเพชรที่มีขนาดของผลึกเล็ก และมีการยึดเกาะกับฐานรองดี แต่คุณสมบัติของฟิล์มเพชรไม่มีมากนัก

โดยทั่วไปเงื่อนไขปกติในการสร้างด้วยวิธีนี้จะใช้อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทน (0.5-2%) ต่อก๊าซไฮโดรเจนกระทำที่ความดันระหว่าง 1-30 ทอร์ ค่า RF-power 500-1,000 W อุณหภูมิของฐานรอง 800-1,000 °C อัตราการเกิดฟิล์มเพชรประมาณ 1-2  $\mu\text{m/hr}$



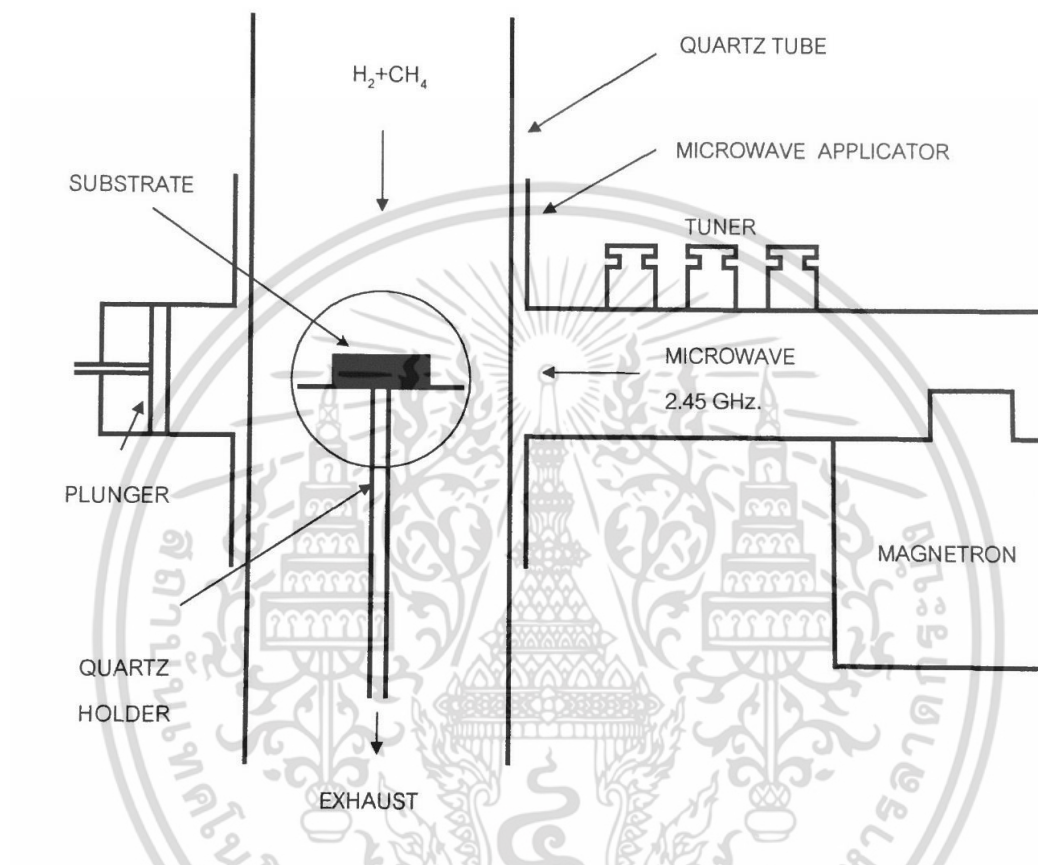
รูปที่ 1.4 แผนภาพระบบ RF-Plasma-Assisted CVD

#### 1.2.2.4 Microwave-Plasma-Assisted CVD

วิธีนี้ได้รับความนิยมมากในการสร้างฟิล์มเพชร โดย Setaka et al. ได้นำเสนอในปี ค.ศ. 1982 เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดปัญหาการเกิดสารปนเปื้อนในฟิล์มเพชรแผนภาพแสดงวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD แสดงได้ดังรูปที่ 1.5 ระบบประกอบไปด้วย Magnetron ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz (สังเกตว่าวิธีนี้จะใช้ความถี่สูงกว่าวิธี RF-Plasma-Assisted CVD) rectangular wave guide จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของคลื่นไมโครเวฟระหว่าง Generator และ Reaction chamber โดย Reaction chamber ซึ่งทำมาจากท่อควอตซ์ถูกวางในตำแหน่งที่ทิศทางของคลื่นไมโครเวฟจาก Reaction wave guide พุ่งผ่าน Three stub tuners ที่บริเวณ Wave guide ใช้เป็นตัวจำกัดพลังงานที่สะท้อนจาก Applicator ให้มีค่าน้อยที่สุด คลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดพลาสมาความหนาแน่นสูงพร้อมกับอิเล็กตรอนที่มีค่าพลังงานสูง ซึ่งเกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมกันของอนุมูลของอะตอมไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน พลาสมาที่เกิดขึ้นจะถูกบังคับให้อยู่ตรงกลาง Chamber บริเวณที่วางฐานรอง (เพื่อป้องกันการก่อดัวของคาร์บอนบนผิวภายใน Chamber) โดยฐานรองจะมีอุณหภูมิ 700-1,000 °C ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ถูกให้โดยพลาสมาและการแผ่รังสี



รูปที่ 1.5 แผนภาพระบบ Microwave-Plasma-Assisted CVD

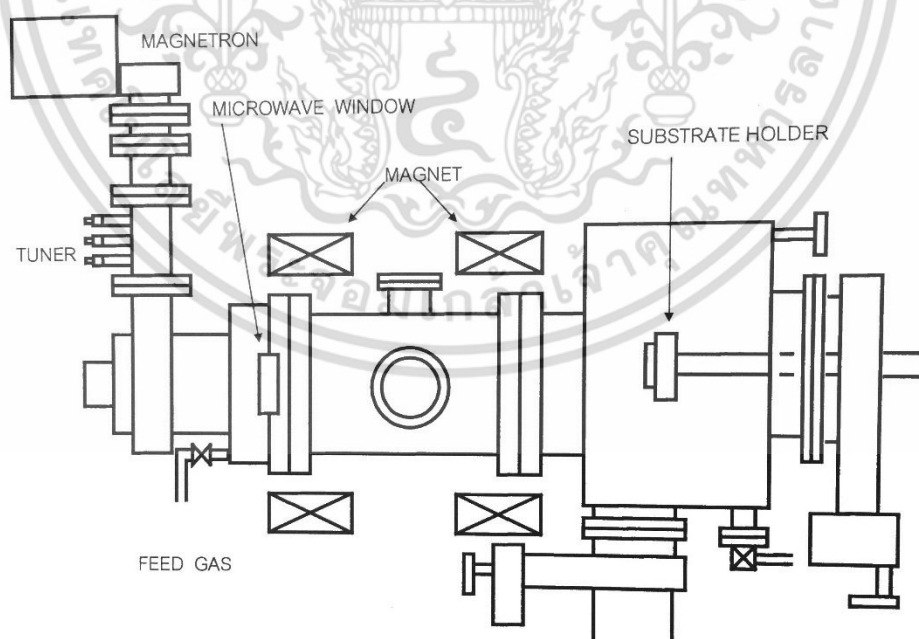
สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการก่อสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้โดยทั่วไปแล้วจะใช้อัตราส่วนของก๊าซมีเทน (0.5-2%) ต่อก๊าซไฮโดรเจนกระทำที่ความดัน 5-100 ทอร์ Microwave Power 100-700 W อัตราการเกิดฟิล์มเพชรประมาณ 1-5  $\mu\text{m}$  ฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีนี้จะมีคุณภาพดีกว่าวิธี RF-Plasma-Assisted CVD และสามารถสร้างให้เกิดในบริเวณกว้างได้ (เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 cm) เนื่องจากการที่ไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรองทำให้สะดวก และฟิล์มเพชรจะเกิดอย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งยังไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดสารปนเปื้อนในฟิล์มเพชรอันเกิดจากการสึกกร่อนของอิเล็กโทรดและผลจากไอระเหยของ Reaction Chamber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2.2.5 Electron Cyclotron Resonance Microwave-Plasma-Assisted CVD

วิธีนี้นำเสนอครั้งแรกโดย Kawarada et al. ในปี ค.ศ. 1987 โดยพัฒนามาจากวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD มีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่ในการเกิดฟิล์มเพชรให้มีขนาดกว้างขึ้นและลดอุณหภูมิการสร้างให้ต่ำลง แผนภาพวิธีนี้แสดงได้ในรูปที่ 1.6 พบว่าระบบประกอบไปด้วย Magnetron ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นไมโครเวฟ, Waveguide, Cylindrical cavity และ Electromagnet 2 คู่ วางอยู่รอบ Cylindrical cavity สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นจาก Electromagnet เพื่อใช้ควบคุมบริเวณการเกิดฟิล์มเพชร คลื่นไมโครเวฟถูกสร้างที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กค่า 875 Gauss อันเป็นเงื่อนไขของการเกิด Electron cyclotron resonance ความถี่ของ Electron gyration มีค่าเท่ากับ ความถี่ของไมโครเวฟที่ 2.45 GHz สนามแม่เหล็กจะเกิดโดยรอบ Cylindrical cavity และทำหน้าที่ควบคุมการกระจายของพลาสมาอย่างสม่ำเสมอ ผลของ Resonance ทำให้อิเล็กตรอนมีค่าพลังงานสูงเกิดการแตกตัวของอะตอมไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนอย่างสม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากพลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นสูง

ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้จะใช้ความดันต่ำคือน้อยกว่า 10 Torr อุณหภูมิของฐานรอง 400-600 °C ซึ่งน้อยกว่าวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD ฟิล์มเพชรที่ได้มีขนาดผลึกใหญ่ มีความสม่ำเสมอและคุณภาพดี

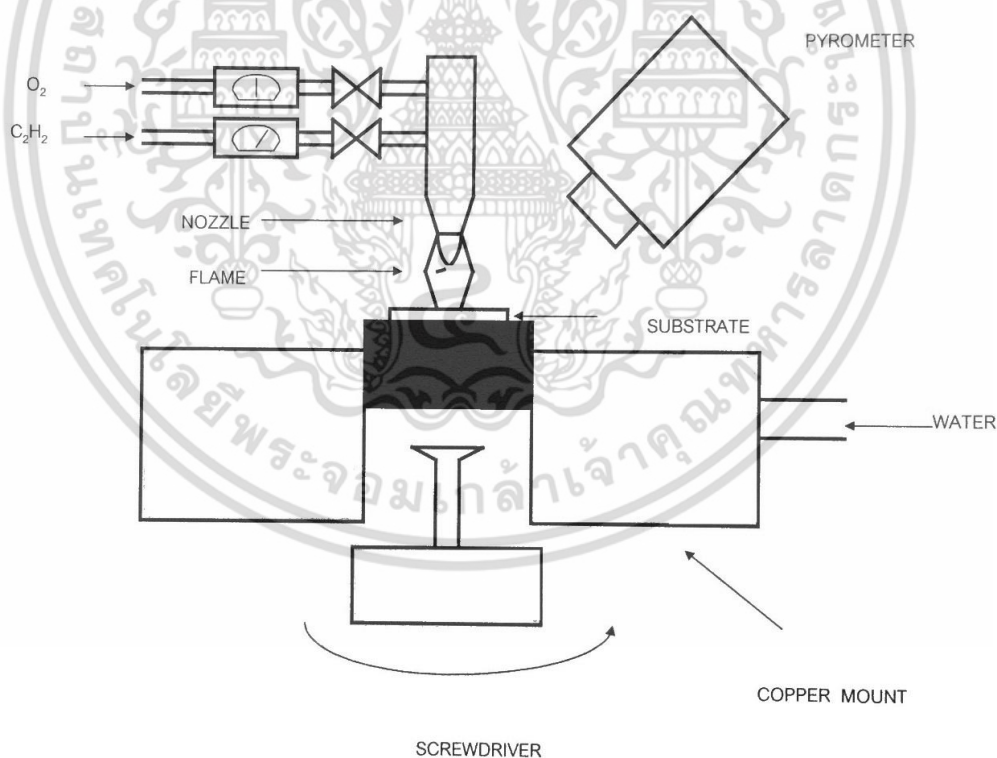


รูปที่ 1.6 แผนภาพระบบ Electron Cyclotron Resonance Microwave-Plasma-Assisted CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2.3 Combustion Flame-Assisted CVD

Hirose et al. รายงานถึงการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1988 ฟิล์มเพชรถูกสร้างขึ้นที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้เปลวไฟที่เกิดจากก๊าซผสมระหว่างอะเซทิลีนกับไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่เหมาะสม วิธีนี้ได้รับการตรวจสอบและยืนยันจากคณะทำงานของ Naval Research Laboratories ว่าสามารถสร้างฟิล์มเพชรได้จริง นับเป็นการกระตุ้นให้มีผู้สนใจจำนวนมากเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้หาได้ง่าย ต้นทุนการสร้างมีค่าต่ำมากและอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรที่ค่าสูง รูปที่ 1.7 แสดงแผนภาพวิธี Combustion Flame-Assisted CVD ก๊าซอะเซทิลีนและก๊าซออกซิเจน จะถูกควบคุมอัตราการไหลโดย Mass flow controller เพื่อให้ได้ส่วนผสมตามต้องการด้านหลังของฐานรองมีน้ำไหลผ่านเพื่อระบายความร้อน อุณหภูมิของฐานรองอยู่ในช่วง 800-1,000 °C อัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรมีค่าประมาณ 20  $\mu\text{m/hr}$  (Snail et al. จาก Naval Research Laboratories รายงานว่าค่าสูงสุดที่พบมีค่าถึง 150  $\mu\text{m/hr}$ ) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะมีปัญหาในการสร้างเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิของฐานรองทำได้ยาก



รูปที่ 1.7 แผนภาพระบบ Combustion Flame-Assisted CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ที่ความดันต่ำกว่าที่กล่าวข้างต้นแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันออกไปในเทอมของอัตราการเกิดฟิล์มเพชร พื้นที่ในการเกิดฟิล์มเพชรหรือคุณภาพของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นซึ่งการเลือกใช้เทคนิคการสร้างขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการนำฟิล์มเพชรไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ฟิล์มเพชรที่ใช้ต้องมีคุณภาพสูง มีความบริสุทธิ์ปราศจากสารเจือปน ดังนั้นควรใช้เทคนิคการสร้างวิธี Filament-Assisted Thermal CVD หรือวิธี Microwave-Plasma-Assisted CVD แต่ถ้าต้องการสร้างฟิล์มเพชรให้มีความหนาเพื่อใช้เคลือบป้องกันการสึกกร่อน เทคนิคการสร้างวิธี DC-Plasma-Assisted CVD หรือวิธี DC-Plasma Jet CVD ซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าอัตราการเกิดฟิล์มเพชรสูง จะถูกเลือกใช้งาน

### 1.3 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร

ฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นด้วยวิธี CVD ที่ความดันต่ำมีความเหมาะสมหลายอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในเชิงกล พบว่าเพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง ( $1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ ) ทำให้ทนต่อการสึกหรอ ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้งานหนัก อาทิเช่น ใบเรื้อย หัวเจาะ หรือ Gearboxes มักจะนิยมเคลือบฟิล์มเพชรบนอุปกรณ์ดังกล่าว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งาน

นอกจากนี้เพชรยังมีค่าสภาพนำความร้อนสูงมาก ( $20 \text{ W/cm.K}$ ) ทำให้ฟิล์มเพชรถูกนำไปประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูง เช่น นำมาใช้เป็นระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงหรือนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

สำหรับในส่วนของคุณสมบัติทางด้านอื่นๆ อาทิเช่น การที่เพชรมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามสูง ( $5.45 \text{ eV}$ ) มากกว่าสารกึ่งตัวนำหลักที่ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นซิลิกอน ( $1.12 \text{ eV}$ ) หรือแกลเลียมอาร์เซไนด์ ( $1.43 \text{ eV}$ ) อีกทั้งยังมีค่าความคล่องตัวของโฮลและอิเล็กตรอนสูง ( $1,800 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  และ  $2,000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  ตามลำดับ) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ ( $\epsilon = 5.7$ ) รวมถึงค่าสนามไฟฟ้าพังทลายสูง ( $10 \times 10^6 \text{ V/cm}$ ) และเพชรธรรมชาติมีความเป็นฉนวนสูงมาก (ความต้านทานประมาณ  $10^6 \text{ }\Omega\text{.cm}$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$ ) แต่ในการสร้างฟิล์มเพชรสามารถสามารถใส่อะตอมสารเจือลงไปเพื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานให้มีค่าตามความต้องการตั้งแต่  $10^{-2}$ - $10^6 \text{ }\Omega\text{.cm}$  จากคุณสมบัติที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้ฟิล์มเพชรถูกนำไปใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากฟิล์มเพชรนี้สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูง ความถี่สูงและทนต่อแรงดันพังทลายได้ดี

1. Thermal management เนื่องจากเพชรธรรมชาติมีค่าสภาพนำความร้อนสูงมากกว่าค่าสภาพนำความร้อนของทองแดงถึง 4 เท่า อีกทั้งยังมีค่าความเป็นฉนวนสูง ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงถูกใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น เลเซอร์ไดโอด, วงจรรวมไมโครเวฟขนาดเล็ก โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะติดตั้งบนฟิล์มเพชร ก่อนที่จะนำไปบรรจุเพื่อใช้งานต่อไป ข้อดีของการใช้ฟิล์มเพชรเป็นตัวระบายความร้อนคือความสามารถที่จะลดมวลและปริมาตรของการใช้ตัวระบายความร้อนเมื่อเทียบกับแบบเดิมได้มากกว่า 50% ทำให้ความหนาแน่นในการบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น และลดขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้งานจากเดิมลง ซึ่งปัจจุบันได้เริ่มมีการใช้งานฟิล์มเพชรเป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในยานอวกาศบ้างแล้ว

2. Wear resistant coating ฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นถูกนำไปใช้เคลือบอุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมหนัก ประเภทใบเรือหรือหัวเจาะต่างๆ แต่เดิมอุปกรณ์ดังกล่าวมักทำมาจากซิลิกอนคาร์ไบด์หรือทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นสารที่มีความแข็งน้อยกว่าเพชร ฟิล์มเพชรสามารถเคลือบบนวัสดุหลายชนิด อาทิเช่น Non-ferrous metal พลาสติก และสารประกอบต่างๆ จากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ใช้งานที่เคลือบด้วยฟิล์มเพชรจะมีประสิทธิภาพ อายุการใช้งานตลอดจนความเร็วในการขุดหรือเจาะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มเพชรยังสามารถนำไปเคลือบเพื่อป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนที่ใช้งานหนักเป็นพิเศษ เช่น Gearboxes หรืออุปกรณ์ภายในเครื่องยนต์ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

3. Electronic device ปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาการนำฟิล์มเพชรมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทั้งประเภทแอคทีฟและพาสซีฟ แม้ว่าโดยทั่วไปฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นจะแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก แต่สามารถเปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้โดยในการสร้างจะเติมอะตอมของธาตุในหมู่ 3 ลงไป (นิยมใช้  $B_2H_6$  หรือ  $B_2O_3$ ) สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนั้นทำได้โดยการเติมอะตอมของธาตุหมู่ 5 ได้แก่ P หรือ As ซึ่งเป็นธาตุมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของคาร์บอน จึงจำเป็นที่จะต้องหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเติมอะตอมสารเจือ

อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากฟิล์มเพชรมีอยู่หลายชนิด เช่น ไดโอด, FET, ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ และอื่นๆอีกมากมาย สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้ฟิล์มเพชรที่กล่าวถึงในที่นี้คือ ตัวเก็บประจุและจอภาพแบบแบน

ตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อนำมาใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม ใช้งานในการบิน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุโพลีเมอร์ซึ่งเป็นสารที่อดีต พบว่าตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรมีขนาดน้ำหนักและปริมาณลดลงถึง 50% อุณหภูมิในการใช้งานเพิ่มขึ้นจากเดิม 5 เท่า ความสามารถในการประจุพลังงานสูงถึง 7 เท่า และยังคงทำงานที่แรงดันสูงได้ดี

สำหรับการนำมาใช้ในจอภาพแบบแบนนั้นจะอาศัยสมบัติการเกิด “Negative Electron Affinity” ของเพชร คือเมื่อเพชรได้รับการไป้อสโฟลบที่สุญญากาศจะเกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวหน้าของเพชร ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งาน ฟิล์มเพชรถูกสร้างให้เกิดเป็นจุดเล็กๆลักษณะเหมือนกับตารางถึๆ โดยแต่ละจุดเรียกว่า “Pixel” แต่ละ Pixel เมื่อได้รับการไป้อสโฟลบจะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมา อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยกริดซึ่งถูกไป้อสด้วยไฟบวก พุ่งเข้าชนเป้าหรือจอภาพซึ่งมีสารเคลือบอยู่ (ตัวอย่างเช่น ฟอสฟอรัส) ทำให้เกิดแสงสว่างขึ้นบริเวณที่อิเล็กตรอนตกกระทบ ทั้งหมดนี้เป็นหลักการพื้นฐานของจอภาพแบบแบน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือ แบบ LCD (Liquid Crystal Display) พบว่าจอภาพชนิดใหม่นี้จะให้ความสว่างและมุมมองเพิ่มขึ้นจากเดิมตลอดจนสามารถขยายขนาดของจอภาพให้เพิ่มขึ้นได้ (อาจจะขยายได้ถึงหน่วยตารางเมตร)

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการนำเสนอการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD เพื่อใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาตามลำดับดังต่อไปนี้

1. ศึกษาเงื่อนไขที่สำคัญในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD
2. ศึกษาผลเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นและพี โดยใช้เงื่อนไข
  - สังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนในเอททิลแอลกอฮอล์
  - สังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในเอททิลแอลกอฮอล์
3. ศึกษาผลของการตอบสนองของฟิล์มเพชรที่มีต่อสนามแม่เหล็ก
4. ศึกษาลักษณะคุณสมบัติกระแส และแรงดัน ของรอยต่อของฟิล์มเพชรชนิดพีและเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

จากวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD เพื่อใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ การทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนแรกทำการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับสังเคราะห์ฟิล์มเพชร รวมไปถึงการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชร จากนั้นจึงทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยการเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นและชนิดพีลงไปในสารตั้งต้นของการสังเคราะห์

ส่วนที่สองทำการสร้างหัววัดฮอลล์ด้วยฟิล์มเพชรเพื่อทำการวิเคราะห์การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กได้ในช่วง  $-5,000$  ถึง  $+5,000$  เกาส์

ส่วนสุดท้าย ทำการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชรที่ได้จากการสร้างด้วยวิธี HFCVD

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

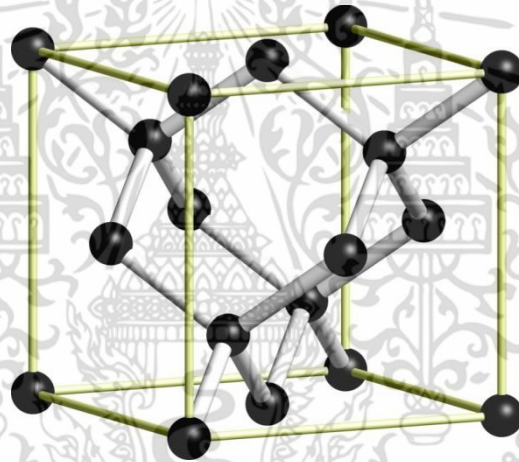
1. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร
2. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชร
3. ความรู้เกี่ยวกับผลของการเติมอะตอมสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็นในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร
4. ความรู้เกี่ยวกับความเข้าใจเกี่ยวกับใช้งานฟิล์มเพชรเป็นหัววัดฮอลล์
5. ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีและเอ็นที่ได้จากการสร้างด้วยวิธี HFCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

เพชร เป็นโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนซึ่งจัดอยู่ในธาตุหมู่ที่ 4 ในตารางธาตุ เมื่อพิจารณาที่หน่วยเซลล์ของเพชรจะเห็นว่า มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบ fcc (face-centered cubic structure) ซึ่งหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอนอยู่ 8 อะตอม โดยที่มุมทั้งแปดจะมีอะตอมคาร์บอนอยู่  $1/8$  อะตอม และแต่ละหน้าของหน่วยเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอนอยู่  $1/2$  อะตอม อีก 4 อะตอมจะฝังอยู่ในหน่วยเซลล์ โดยคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวกับอะตอมคาร์บอนรอบข้างทั้งสี่ตัวแบบโครงข่ายทรงสี่เหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral network) ด้วยพันธะโควาเลนต์ แบบ  $sp^3$  จึงทำให้เพชรมีความแข็งเป็นพิเศษ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพชร

#### 2.1 ลักษณะโครงสร้างของคาร์บอน

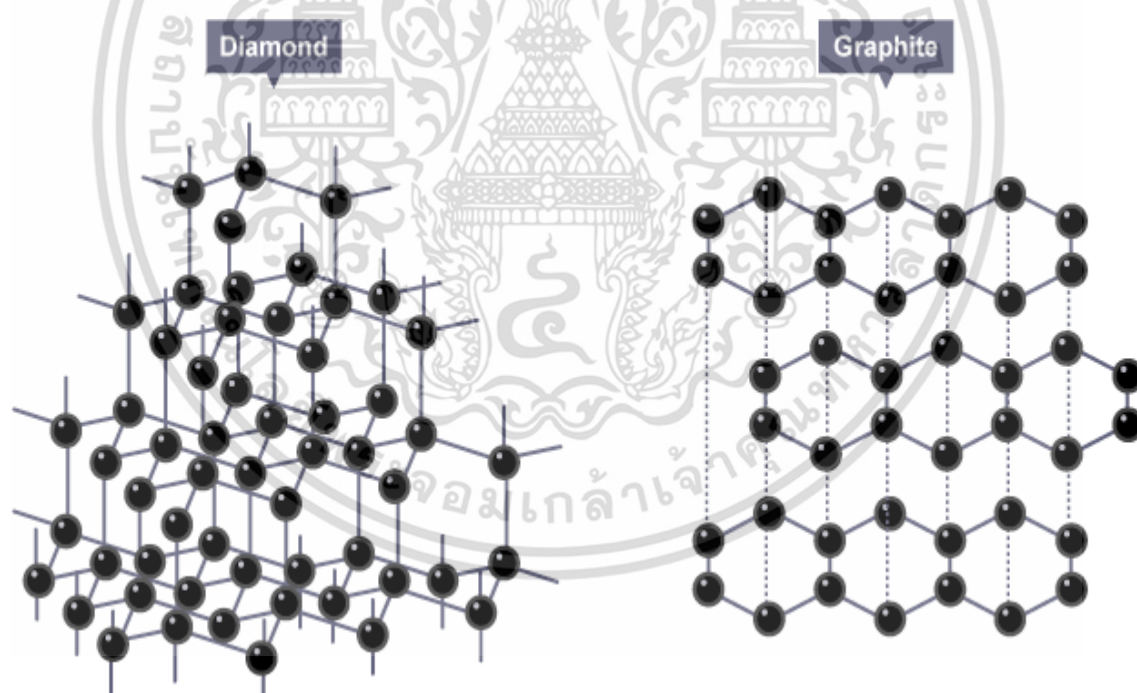
เพชร มีเป็นโครงสร้างสี่เหลี่ยมอะตอม โดยแต่ละอะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวกับอะตอมคาร์บอนรูป เตตราฮีดรอน (Tetrahedron) อีกสี่รูปที่อยู่รอบๆ ดังรูปที่ 2.2 ในระหว่างอะตอมจะมีโควาเลนต์คอมบิเนชันที่บริสุทธิ์ เหนียวแน่น ซึ่งทำให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีมาก เช่น มีจุดหลอมเหลวสูง ทนทานต่อสารเคมีได้สูง และมีความแข็งมาก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกรไฟต์ มีผลึกในรูปชั้นโครงสร้างหกเหลี่ยม (Hexagonal) ดังรูปที่ 2.2 ภายในระนาบพื้นอะตอมคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันดี ส่วนระหว่างชั้นต่างๆ กลับมีการยึดเหนี่ยวไม่ดี จึงทำให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้

- มีความสามารถนำกระแสไฟฟ้าขนานกับชั้นโครงสร้างอะตอม โดยมีค่าแฟกเตอร์ประมาณ  $5 \times 10^3$  มากกว่าในแนวตั้ง
- มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามความร้อนขนานกับแนวชั้นโครงสร้างอะตอม เป็นลบ มีการหดตัวน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ส่วนในแนวตั้งฉากกับโครงสร้างอะตอมของแกรไฟต์ จะมีอะตอมคาร์บอนไม่หนาแน่นเหมือนกับเพชร ค่าความเค้น ความแข็ง โมดูลัสความยืดหยุ่นก็น้อยกว่าเพชรมาก การยึดเหนี่ยวของโครงสร้างอะตอมแกรไฟต์จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 4,000 องศาเซลเซียส และภาคของเหลวจะเกิดขึ้นที่ ความดันสูงมากกว่า 10 bar ขึ้นไป



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเพชร และแกรไฟต์

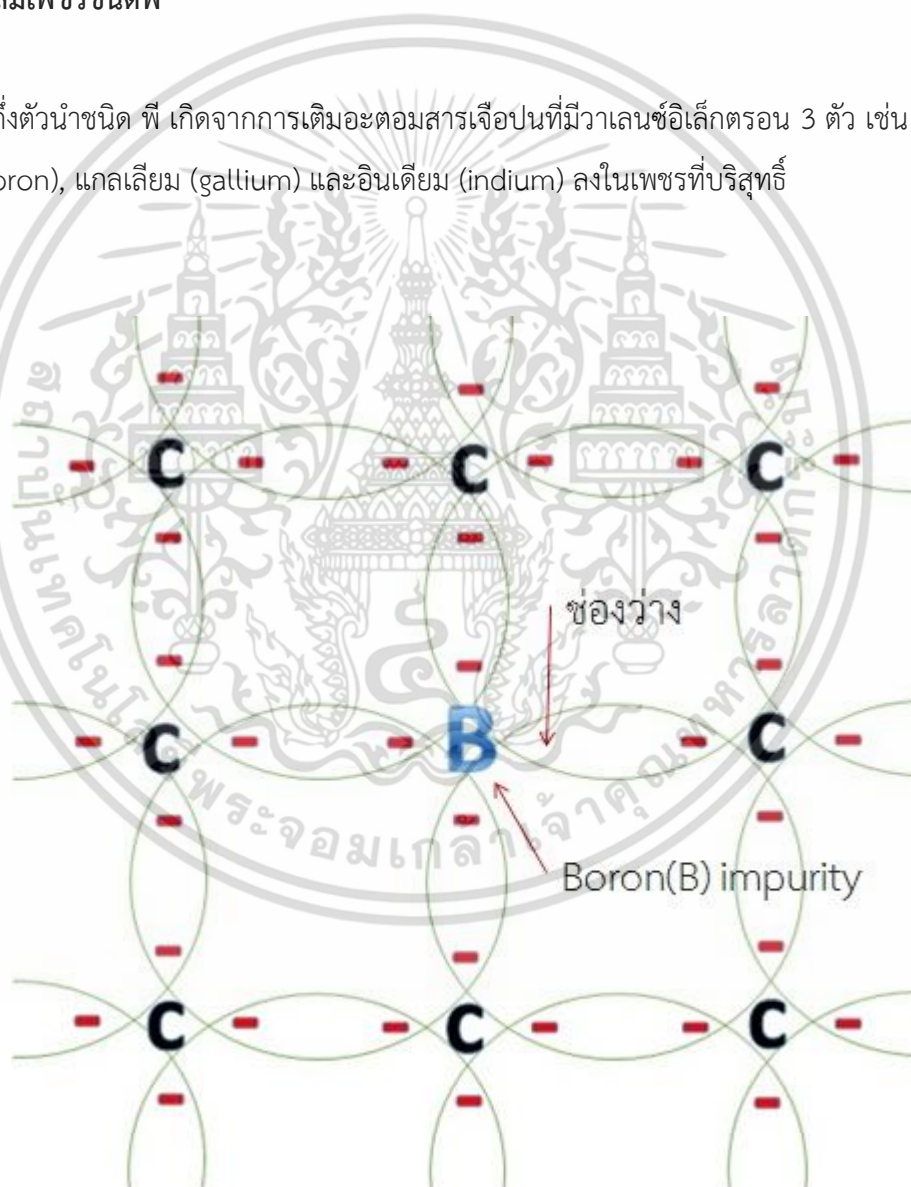
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และชนิด พี

คุณลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการเติมอะตอมสารเจือ (impurity atoms) [1] เข้าไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์เรียกว่า กระบวนการเติมสารเจือ (doping process) ถึงแม้ว่าจะเติมสารอะตอมเจือเข้าไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์เพียงเล็กน้อย ก็สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของแถบพลังงานและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้

### 2.2.1 ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

สารกึ่งตัวนำชนิด พี เกิดจากการเติมอะตอมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน (boron), แกลเลียม (gallium) และอินเดียม (indium) ลงในเพชรที่บริสุทธิ์



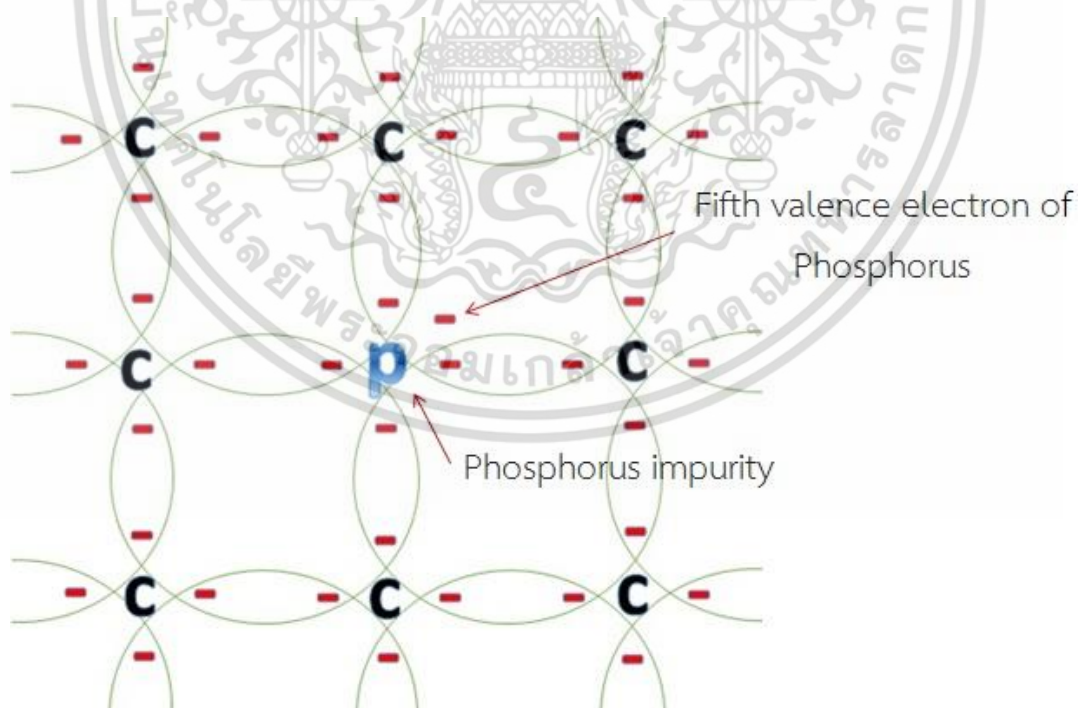
รูปที่ 2.3 พันธะระหว่างอะตอมสารเจือชนิดพี กับอะตอมของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.3 เป็นตัวอย่างการเติมอะตอมสารเจือปนโบรอน (boron impurity ; B) [2] ลงในคาร์บอนวาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 3 ตัวของ โบรอน จะจับคู่แบบโควาเลนซ์กับวาเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมคาร์บอนบริเวณรอบข้าง การจับคู่กันระหว่างวาเลนซ์อิเล็กตรอนนั้นเป็นไปตามกฎออกเตต ทำให้ขาดขาดไปอิเล็กตรอนไป 1 ตัว จึงจะครบ 8 ตัวตามกฎออกเตต ทำให้เกิดช่องว่างที่เรียกว่า วาแคนซี (vacancy) ขึ้น เมื่อมีพลังงานกระตุ้นเพียงเล็กน้อยอิเล็กตรอนของคาร์บอนที่อะตอมรอบ ๆ ก็จะหลุดออกเป็นอิสระ และจะเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ที่วาแคนซีของอะตอมโบรอน เมื่ออะตอมคาร์บอนสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับอะตอมโบรอนไปจึงทำให้เกิดที่ว่างขึ้น ที่ว่างนั้นเรียกว่า โฮล (hole) และสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก จึงทำให้สารชิ้นนี้มีโฮลเป็นพาหะส่วนมากจึงทำให้นำไฟฟ้าได้ด้วยโฮลซึ่งเป็นประจุบวก หรือที่เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type Diamond) เดิมทีโบรอนมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่อได้รับอิเล็กตรอนจากคาร์บอนมาจึงเกิดเป็นอ็อนลบ ( $N_A$ )

### 2.2.2 ฟิล์มเพชรชนิดเอ็น

ฟิล์มเพชรชนิด เอ็น เกิดจากการอะตอมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น ฟอสฟอรัส (Phosphorus) [3] ลงไปในเพชรบริสุทธิ์



รูปที่ 2.4 พันธะระหว่างอะตอมสารเจือปนชนิดเอ็นกับอะตอมของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการเติมสารเจือปนฟอสฟอรัส (phosphorus impurity ; P) ลงในคาร์บอน วาเลนซ์อิเล็กตรอนของฟอสฟอรัส (fifth valence electron of phosphorus) จะไม่มีคู่เนื่องจากเป็นไปตามกฎออกเตตซึ่งต้องการอิเล็กตรอนเพียง 8 ตัว แต่ฟอสฟอรัสเป็นฐานหมู่ที่ 5 ในตารางธาตุจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว โดยที่วาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัวของฟอสฟอรัสไปจับคู่กับอิเล็กตรอนของคาร์บอน ดังนั้นฟอสฟอรัสจึงเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ถ้ามีพลังงานเพียงเล็กน้อยมากกระตุ้น อิเล็กตรอนตัวที่ 5 ของ ฟอสฟอรัสจะหลุดออกจากอะตอม และกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ จึงทำให้สารชิ้นนี้มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมากและทำให้นำไฟฟ้าได้ด้วยอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบหรือที่เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Diamond) เติมที่ฟอสฟอรัส มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่อเสียอิเล็กตรอนไปจึงเกิดเป็นไอออนบวก ( $N_D^+$ )

### 2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร

ในงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ “เพชร” จัดว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ [4] ได้ โดยมีข้อได้เปรียบหลายข้อที่โดดเด่นกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ซึ่งสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชรกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ดังนี้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

คุณสมบัติทางไฟฟ้า	เพชร	ซิลิกอน	แกลเลียมอาร์เซไนต์
ความกว้างของช่องว่างพลังงาน (eV)	5.5	1.2	1.43
ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน ( $cm^2/V.sec$ )	2000	1500	8500
ค่าความคล่องตัวของโฮล ( $cm^2/V.sec$ )	1800	600	420
ค่าคงที่แลตทิส ( $A^\circ$ )	3.567	5.431	5.663
ความหนาแน่น ( $g/cm^3$ )	3.515	2.43	5.32
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	5.5	11.8	12.8

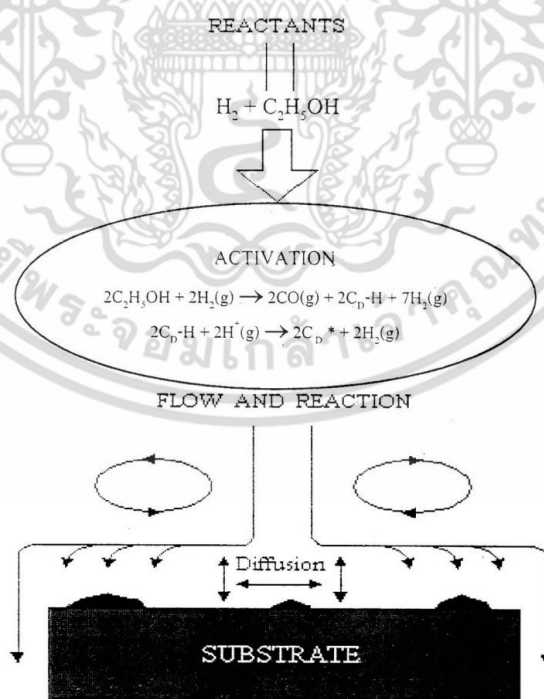
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเห็นได้ว่าเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ แล้วเพชรมีข้อได้เปรียบหลายประการในการถูกพิจารณาใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เห็นได้ชัดเจน เช่น เมื่อพิจารณาในแง่ของสารกึ่งตัวนำแล้วพบว่าเพชรมีความคล่องตัวของอิเล็กตรอนถึง  $2000 \text{ cm}^2/\text{vs}$  ส่วนของซิลิคอนมีความคล่องตัวของถึง  $1800 \text{ cm}^2/\text{vs}$  และยังพบว่าพบนั้นมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงถึง  $10^{16}$  โอห์ม-เซน

เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของเพชรแล้วจะเห็นได้ว่า เพชร มีความโดดเด่นมากกว่าซิลิกอน และเยอรมันเนียม ในด้านขีดความสามารถในการนำไปใช้งานได้มากกว่าในบางสถานะ เช่น ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง หรือใช้งานที่ต้องการความถี่สูง เป็นต้น

## 2.4 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบความร้อน หรือที่เรียกว่า “Hot-Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD)” เป็นกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ใช้ระบบการสังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งไม่ยุ่งยากต่อการสังเคราะห์ และยังมีระบบที่ไม่ซับซ้อนจึงทำให้การสังเคราะห์มีต้นทุนที่ต่ำ



รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD ประกอบได้ด้วย

1. ระบบจะต้องเป็นบรรยากาศของไฮโดรเจน  $H_2$

อะตอมของไฮโดรเจนนั้นเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้อะตอมคาร์บอนในรูปแบบโครงสร้างเพชรที่มีพันธะ  $sp^3$  มีเสถียรภาพ โดยไฮโดรเจนจะมีส่วนช่วยเข้าไปปรับปรุงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนบริเวณพื้นผิวที่พันธะขาดอยู่ ซึ่งจะทำให้พันธะแบบ  $sp^3$  ไม่เปลี่ยนไปเป็น  $sp^2$  หรือ  $sp^1$  กล่าวคือเป็นการลดปริมาณของแกรไฟต์ หรือเขม่า นั้นเอง

2. ระบบต้องมีการกระตุ้นการแตกตัวของอะตอมคาร์บอน

วิธี HFCVD นั้นอาศัยความร้อนในการแตกตัวของอะตอมคาร์บอนประมาณ 2,000 องศาเซลเซียส จากขดลวดความร้อนทั้งสแตน และจะส่งผ่านอะตอมคาร์บอนจากบริเวณกระตุ้นไปยังฐานรอง โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงเป่าของก๊าซเฟส

3. การเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ในกระบวนการสังเคราะห์เพชรนั้นการเตรียมพื้นผิวของฐานรองมีความสำคัญต่อลักษณะการก่อตัวของเพชร โดยเมื่อทำการขัดพื้นผิวของฐานรองให้เกิดความเสียหายที่บริเวณผิวหน้าการก่อตัวของเพชรจะเกิดขึ้นในรูปแบบของฟิล์ม และในทางกลับกัน ถ้าไม่ได้ทำการขัดบริเวณผิวหน้าของฐานรองให้เกิดความเสียหายการก่อตัวของเพชรจะเกิดขึ้นในรูปแบบของผลึก

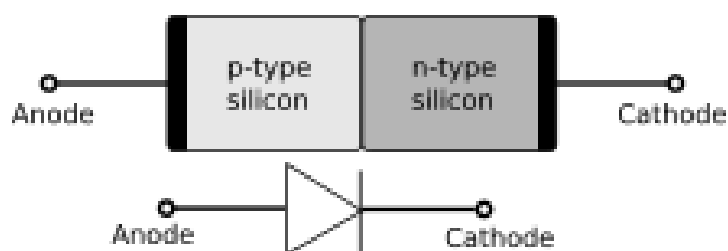
4. อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม

อุณหภูมิของฐานรองนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งอุณหภูมิของฐานรองนั้นจะเป็นตัวกำหนดระนาบของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้นด้วย อุณหภูมิที่เหมาะสมนั้นอยู่ในช่วง 700-900 องศาเซลเซียส

## 2.5 ทฤษฎีรอยต่อ พี เอ็น

ในบรรดาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด คือ อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็น (p-n Junction) [5] ซึ่งได้แก่ ไดโอดชนิดต่างๆซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำจำนวนสองส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ส่วนที่สองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วบวกของสารกึ่งตัวนำชนิดพี เรียกว่าแอโนด (Anode) และขั้วลบของสารชนิดเอ็น เรียกว่าแคโทด (Cathode) และที่บริเวณรอยต่อถูกเรียกรอยต่อพีเอ็นหรือ p-n Junction ซึ่งโครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์พื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ที่มีรอยต่อพีเอ็นมากกว่าหนึ่งรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างอย่างง่ายของรอยต่อพีเอ็น

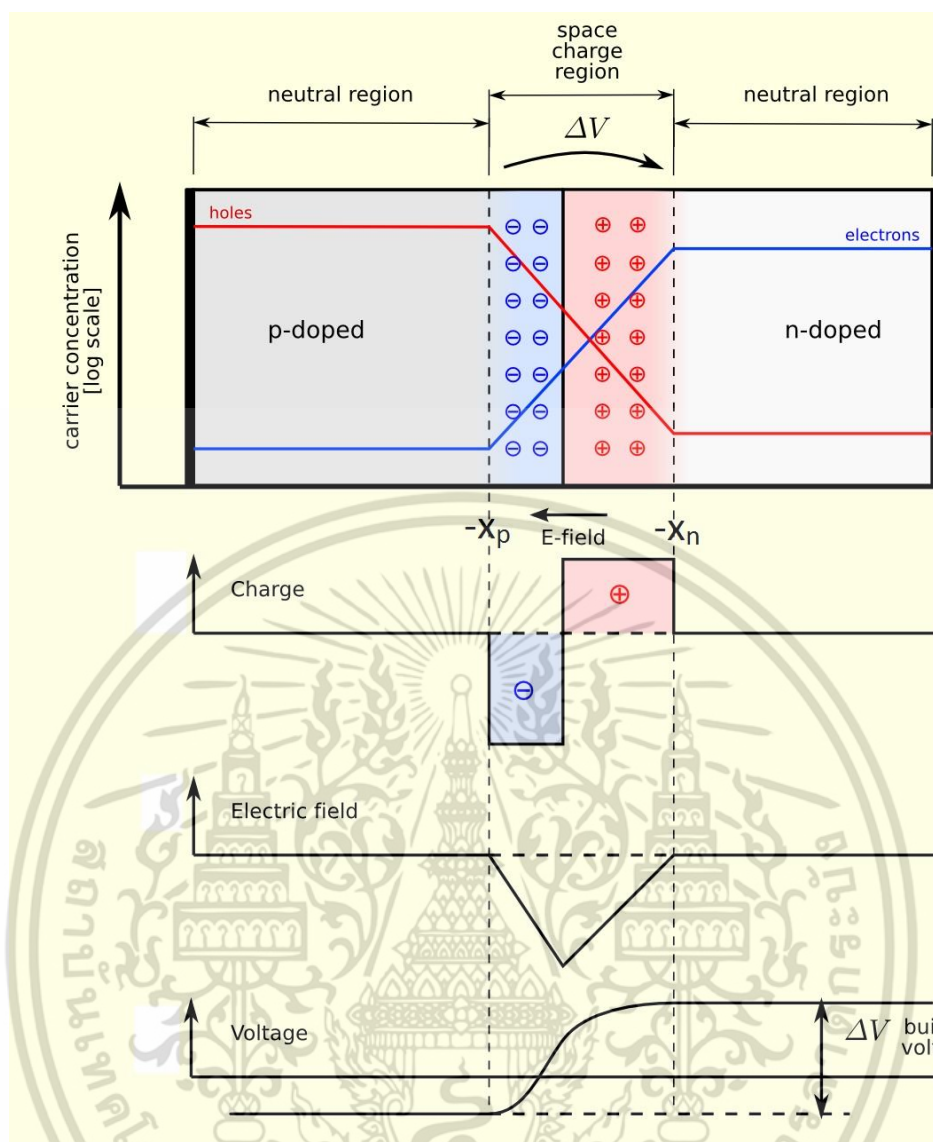
### 2.5.1 ศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ (Built in Potential : $V_{bi}$ )

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะหรือบริเวณรอยต่อที่ถูกเรียกว่าศักย์ภายใน หรือแรงดันภายใน (Built in Voltage :  $V_{bi}$ ) ในขณะที่รอยต่อพีเอ็นเข้าสู่สภาวะสมดุล สามารถถูกพิจารณาและหาสมการแสดงศักย์ภายในที่ปรากฏในบริเวณปลอดพาหะในช่วงจากด้านพีที่ตำแหน่ง  $-x_p$  ถึงด้านเอ็นที่ตำแหน่ง  $-x_n$  โดยที่  $x=0$  เป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงกลางของรอยต่อ เนื่องจากเมื่อรอยต่อเข้าสู่สภาวะสมดุลกระแสดริฟท์ และกระแสแพร่จะเท่ากัน ทำให้กระแสสุทธิเป็นศูนย์ เป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right] \quad (2.1)$$

โดย $V_{bi}$	คือ	ค่าแรงดันภายใน
$k$	คือ	ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์
$T$	คือ	อุณหภูมิเคลวิน
$N_A$	คือ	ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ
$N_D$	คือ	ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้
$n_i$	คือ	ความหนาแน่นของประจุพาหะ
$q$	คือ	ประจุอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าภายใน และ ศักย์ไฟฟ้าภายใน ที่บริเวณรอยต่อพีเอ็น

### 2.5.2 ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

โดยปกติแล้วในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือชนิดพีจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้ารวมเท่ากับศูนย์ ในกรณีของรอยต่อพีเอ็น ที่บริเวณรอยต่ออิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็นจะแพร่เข้ามาทางด้านพีและโฮลทางด้านพีจะแพร่เข้ามาทางด้านเอ็น ทั้งให้เกิดไอออนบวกทางด้านเอ็นและไอออนลบทางด้านพี เป็นตามสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_A \cdot x_p = N_D \cdot x_n \quad (2.2)$$

## 2.6 หลักการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM

SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโพกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโพกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-ray tube) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่นๆ คือ SEM มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ 50-40,000X) ความคมชัดของภาพสูง (2.5-10 nm) ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นสามมิติและหากเปรียบเทียบกับ TEM (Transmission electron microscopy) ซึ่งสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบต้องมีความบางมากๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อที่เป็นของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อน แต่หากสารตัวอย่างที่ไม่มีความนำไฟฟ้า ก่อนการใช้งานต้องนำไปเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าก่อน (นิยมใช้ทองคำหรือคาร์บอน) ตัวอย่างเช่น ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง Si สามารถที่จะวัดด้วย SEM ได้เลย ในขณะที่ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง  $\text{SiO}_2$  ต้องทำการเคลือบทองคำก่อนนำไปวัดด้วย SEM อย่างไรก็ตามในการใช้งานลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Raman spectroscopy

นอกจากนี้เทคนิคต่างๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีต่างๆ CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรอง Si) บริเวณผิวน้ำจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่พบส่วนมากจะมี 4 แบบคือ ระบาย (111), ระบาย (100), ระบายรวม (Polycrystalline) และ Cauliflower-like หรือ Microcrystalline

ลักษณะการทำงาน Scanning Electron Microscopy (SEM) ทำโดยการกวาดโฟกัสของลำแสงอิเล็กตรอนตลอดพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดเว้าผ่าศูนย์กลางของลำแสงมีขนาด 10-20 นาโนเมตร โดยขนาดของลำแสงมีความสำคัญต่อความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มข้นแสงของอิเล็กตรอน อันดับสองที่ปล่อยออกขึ้นอยู่กับผิวที่จะแสดงบน Cathode ray tube (CRT)

## 2.7 หลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและแกรไฟต์สูง แม้ว่าจะมีแกรไฟต์เพียงเล็กน้อยก็ตามเนื่องจากประสิทธิภาพการกระเจิงของแกรไฟต์มีค่ามากกว่าของเพชรมาก ตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman spectrum จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตรวจสอบได้

หลักการพื้นฐานของ Raman spectroscopy คือใช้การสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสารหรือผิวหน้าของผลึก ทำให้สามารถแยกความแตกต่างของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนได้ การทำงานของ Raman spectroscopy อาศัยปรากฏการณ์การกระเจิงทางแสงโดยหลักการของปรากฏการณ์ดังกล่าวคือการวัดการลดลงของความเข้มของลำแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน ผลของ Raman จะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์การกระเจิงแสงของโมเลกุล ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการชนกันระหว่างโฟตอนกับการสั่นของแลตทิซหรือโฟนอน ทำให้เกิดคู่ของโฟตอนและโฟนอน สนามไฟฟ้าของความเข้มลำแสงเป็นตัวบังคับให้แสงมีคลื่นไปทางเดียวในผลึก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Polarizability ดังสมการ

$$P = \alpha E \quad (2.3)$$

โดยที่ P คือ โมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

E คือ สนามไฟฟ้า

$\alpha$  คือ Polarizability

เมื่อมีการสั่นของแลตทิซเกิดขึ้นอันเป็นภาวะการกระตุ้นของ Raman ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Polarizability Raman จะปล่อยโฟตอนบางส่วนออกมา โดยโฟตอนนี้เกิดจากการสั่นของไดโพล ซึ่งมีทั้งที่ความถี่เหมือนกับลำแสงตกกระทบ (Elastic rayleigh scattering) หรือมีการเลื่อนไปของความถี่ ซึ่งมีค่าเท่ากับความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (Inelastic stokes or anti-stokers scattering)

$$P = E_0 \alpha_0 \cos(2\pi V_0 t) + \frac{1}{2} E_0 \sum \alpha_n \{ \cos 2\pi(V_0 - V_n)t + \cos 2\pi(V_0 + V_n)t \} \quad (2.2)$$

โดยที่  $E_0$  คือ สนามแม่เหล็กของลำแสงที่ตกกระทบ

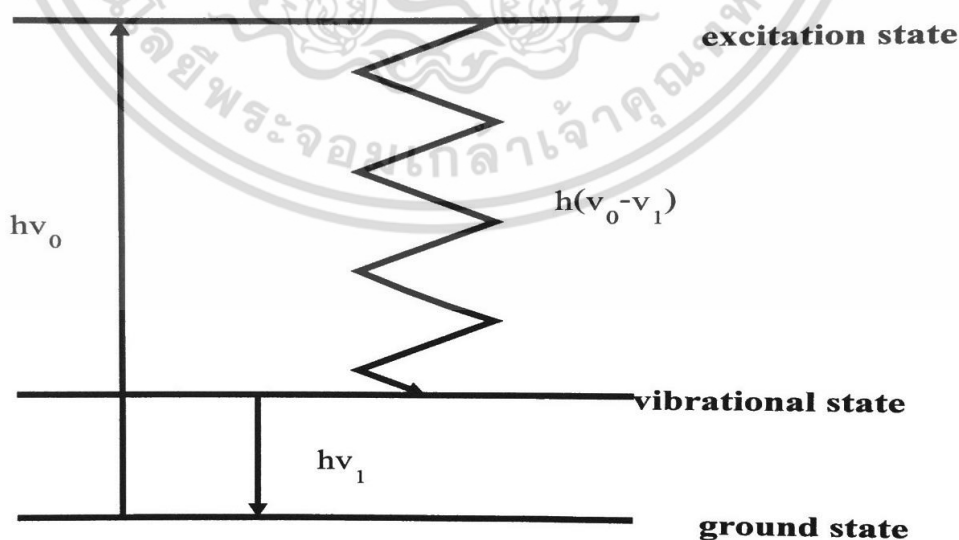
$t$  คือ เวลา

$V_0$  คือ ความถี่ของลำแสงที่ตกกระทบ

$V_n$  คือ ความถี่ของโฟนอน

$\alpha_n$  คือ Polarizability ในฟังก์ชันของโหมดการสั่น

ปรากฏการณ์นี้ “Stokes scattering” เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำแสง ทำให้เกิดการสั่นของแลตทิซขึ้น ขณะที่ปรากฏการณ์ “Anti-Stokes scattering” เกิดจากการทำลายของความร้อนที่กระตุ้นการสั่น โหมดของการสั่นจะขึ้นอยู่กัพันธะระหว่างอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman spectrum สามารถใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็งได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงการเกิดปรากฏการณ์ Raman scattering เมื่อยิงแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในสารตัวอย่าง โฟตอนจากลำแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน  $h\nu_0$  จะเข้าไปอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมสารตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานไปบางส่วน ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเกิดการกระโดดข้ามไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า "สถานะกระตุ้น" (Excitation state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร ดังนั้น อิเล็กตรอนจึงตกลงกลับมาสู่สถานะเดิม โดยมีการคายพลังงานออกมามีค่า  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ส่วนพลังงานที่สูญเสียไปก็คือ  $h\nu_1$  ถูกใช้สำหรับทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงสร้างผลึก โดยพลังงาน  $h\nu_1$  ที่สูญเสียไปนี้อยู่ในย่านอินฟราเรด พลังงานที่เหลือ  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ก็คือ พลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั่นเอง สำหรับสเปกตรัมของแสง  $h(\nu_0 - \nu_1)$  จะถูกเรียกว่า "Stoke line"

จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร แกรไฟต์ อะมอร์ฟัสคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอน

Peak position	Type of carbon	Description
$\sim 1140 \text{ cm}^{-1}$	Small size ( $< 0.1 \mu\text{m}$ ) cubic diamond	Occasionally observed in diamond film with very small grain size ( $< 0.1 \mu\text{m}$ )
$1315\text{-}1326 \text{ cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	Broad band, observed in shock wave produced diamond
$1332 \text{ cm}^{-1}$	Cubic diamond	First order peak with FWHM of $1.9 \text{ cm}^{-1}$ for natural diamond
$1345 \text{ cm}^{-1}$	Amorphous carbon	Broad band, It become a shoulder of the $1550 \text{ cm}^{-1}$ band when the material is hydrogenated
$1355 \text{ cm}^{-1}$	Microcrystalline graphite	Observed in material with small grain sizes
$1550 \text{ cm}^{-1}$	Amorphous or diamond-like carbon	Broad band
$1580 \text{ cm}^{-1}$	Graphite	First order peak
$2458 \text{ cm}^{-1}$	Cubic diamond	Second order peak
$2710 \text{ cm}^{-1}$	Microcrystalline graphite	Second order peak
$3240 \text{ cm}^{-1}$	Graphite	Second order peak

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

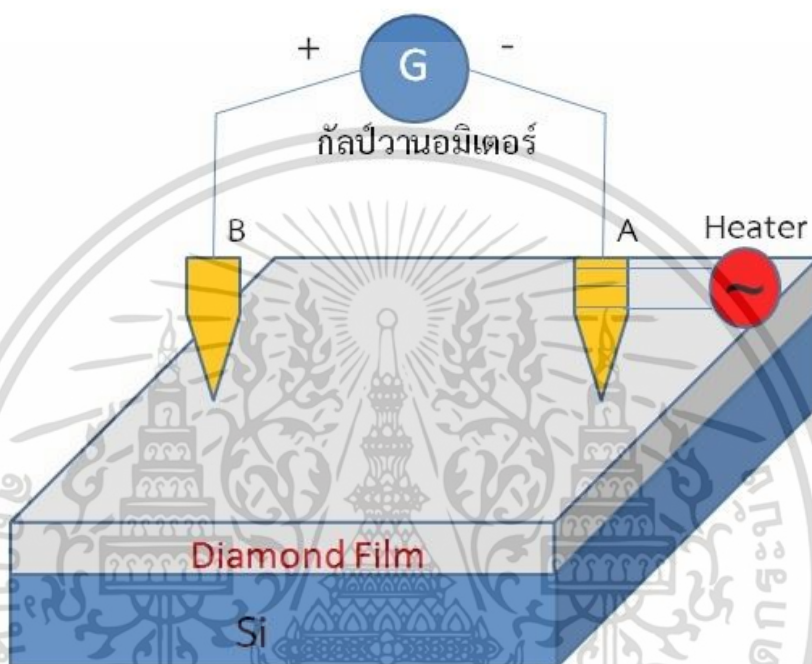
นอกจากนี้ Raman spectroscopy ยังมีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์หาปริมาณความสัมพันธ์ของพันธะ  $sp^3$  กับพันธะ  $sp^2$  โดยหากทราบความแรงของการกระเจิงแสงสัมพันธ์ก็สามารถพิจารณาหาจำนวนสัมพันธ์ขององค์ประกอบของเพชรและแกรไฟต์ในฟิล์มเพชรที่ได้จากการสร้างด้วยวิธี CVD ได้ หรืออีกทางหนึ่งแกรไฟต์จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีขาวยาวสูง แต่ในเพชรจะไม่ดูดกลืน ทำให้แสงสามารถผ่านเพชรได้ตลอด ดังนั้นถ้าหากฟิล์มมีแกรไฟต์เจือปนอยู่ แสงที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารจะไม่เป็นระเบียบ ปกติแล้วบริเวณที่มีการดูดกลืนจะวัดได้เฉพาะผิวหน้าเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นและขนาดของผลึกมีผลสำคัญต่อ Raman spectrum ที่ได้ สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ผลจากขนาดของผลึกสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบของ Microcrystalline graphite เจือปน แต่ถ้าฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างที่ไม่เหมาะสม (เช่น ความเข้มข้นของ  $CH_4/H_2$  มีค่ามากกว่า 20%) ขนาดของผลึกเพชรจะมีผลต่อการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์ม สรุปได้ว่าการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มเพชรจากเปอร์เซ็นต์สัมพันธ์ของพันธะแบบ  $sp^3$  กับพันธะ  $sp^2$  จึงมีความสำคัญและยังรวมไปถึงขนาดของผลึกเพชรที่บริเวณ  $sp^2$  ก็มีความสำคัญเช่นกัน

## 2.8 การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ด้วยวิธีเข็มร้อน

เทคนิคการวัดแบบเข็มร้อน เป็นการทำให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่ปลายด้านหนึ่งซึ่งทำให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามแนววัสดุ และพบว่ามีปรากฏการณ์เกิดขึ้นตามมา คือ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ความเข้มข้นของประจุพาหะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะในแนววัสดุขึ้น จากหลักการดังกล่าวจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชนิดความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรว่ามีพาหะหลักในการนำกระแสชนิดใด การทดลองเพื่อหาคุณสมบัติดังกล่าว จะใช้อุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากรูปจะเห็นว่าชุดอุปกรณ์ ประกอบด้วย เข็ม 2 เข็ม จัดบนฟิล์มเพชรโดยเข็ม A ทำหน้าที่เป็น เข็มความร้อน มีลวดทั้งสแตนพีนอยู่โดยรอบ ส่วนเข็ม B จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง นำกัลป์วานอมิเตอร์มาต่อระหว่างเข็มทั้งสอง โดยใช้ขั้วบวกของกัลป์วานอมิเตอร์ต่อกับเข็ม B และที่ขั้วลบต่อที่เข็ม A เข็มให้ความร้อนแก่เข็ม A ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการชี้ของเข็มกัลป์วานอมิเตอร์

เข็มกัลป์วานอมิเตอร์	ชนิดพาหะ
ชี้ทางบวก	โฮล
ชี้ทางลบ	อิเล็กตรอน

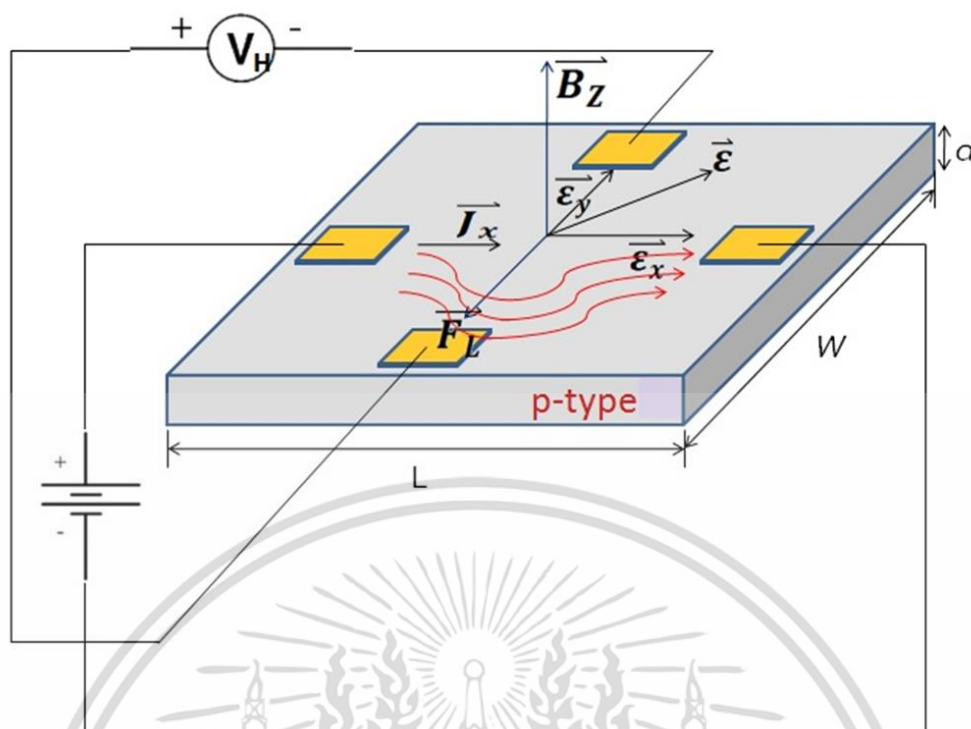


รูปที่ 2.9 แผนผังการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มด้วยวิธีเข็มร้อน

## 2.9 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็ทรินซิก

จากปรากฏการณ์ฮอลล์ สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ เช่น ความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดและสภาพคล่องของพาหะ กล่าวถึงหลักการนี้คือ ขณะกระแส  $J_x$  ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทางหนึ่ง (+x) เมื่อให้สนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านในทิศ Z โดยตั้งฉากกับทิศของกระแส  $J_x$  จะทำให้มีสนามไฟฟ้าด้านขวางเกิดขึ้น โดยมีทิศทาง Y ซึ่งตั้งฉากกับทิศของกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) ซึ่งวิธีการนี้สามารถบ่งบอกถึงชนิดของสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ ได้ และยังหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย ซึ่งปรากฏการณ์ที่จะถูกแสดงดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

จากรูปที่ 2.10 สารกึ่งตัวนำชนิดพีมีพาหะส่วนมากคือโฮล และภายในแท่งสารมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า  $E_x$  จะเกิดแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_x$  ในทิศทาง  $+x$  และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านโดยมีทิศตั้งฉากกับกระแส ทำให้เกิด แรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำต่อโฮล โดย

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.5)$$

ซึ่ง  $F_L$  คือแรงลอเรนซ์และมีขนาดเป็น

$$|F| = qv_x B_z \quad (2.6)$$

ทิศทางของแรงลอเรนซ์ คือ  $-y$  ดังนั้นจึงทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนจากแกน  $x$  มาทางแกน  $-y$  และมาอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของสารกึ่งตัวนำ ผังตรงข้ามของแท่งสารกึ่งตัวนำจึงเกิดเป็นประจุลบ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $E_y$  มีทิศ  $+y$  ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะต้านการเคลื่อนที่ของโฮลที่ถูกกระทำจากแรงลอเรนซ์ ซึ่งแรงลอเรนซ์ ( $F_y$ ) และสนามไฟฟ้าภายในจะมีค่าเท่ากัน

จาก 
$$F = qE_y = F_L = qv_x \cdot B_z \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q\varepsilon_y = qv_x \cdot B_z \quad (2.8)$$

จาก

$$J_x = pqv_x \quad v_x = \frac{J_x}{pq} \quad (2.9)$$

แทนค่า  $v_x$  ลงในสมการที่ 2.8

$$\varepsilon_y = \frac{J_x B_z}{pq} \quad (2.10)$$

ดังนั้น

$$\frac{\varepsilon_y}{J_x B_z} = \frac{1}{pq} = R_H \quad (2.11)$$

โดย  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

$$V_y = V_H = \varepsilon_y \cdot w \quad (2.12)$$

โดย  $V_H$  คือ แรงดันฮอลล์ (Hall voltage) หรือ คือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ เมื่อแทนค่า

$$J_x = \frac{I}{wd} \quad \text{และ} \quad \varepsilon_y = \frac{V_H}{w} \quad \text{ลงในสมการที่ 2.11}$$

$$R_H = \frac{V_H \cdot d}{I \cdot B_z} = \frac{1}{pq} \quad (2.13)$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = p_0 = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x B_z}{qd \cdot V_H} \quad (2.14)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า

$$\rho = R \frac{w \cdot d}{L} = \frac{V \cdot w \cdot d}{I_x \cdot L} \quad (2.15)$$

โดย  $R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสาร

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{pq\mu_p} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu_p = \frac{1}{\rho \cdot p \cdot q} = \frac{1}{\rho} \cdot R_H \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.15, 2.16 และ 2.17 แสดงให้เห็น จะเห็นว่าจากปรากฏการณ์ฮอลล์เราสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ได้แก่ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเพื่อประยุกต์ใช้งาน

ในบทนี้เริ่มที่การกล่าวถึงกระบวนการเตรียมฐานรองที่จะใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD จากนั้นจึงนำฐานรองที่ได้ไปเข้ากระบวนการสังเคราะห์ซึ่งจะมีเงื่อนไขต่าง ๆ ที่สำคัญ รวมไปถึงวิธีการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชร เมื่อได้ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและพีแล้วจึงทำการออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดฮอลล์เพชรทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น จากนั้นจึงหัววัดฮอลล์เพชรที่สร้างเป็นที่เรียบร้อยแล้วไปทำการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และสุดท้ายจะทำการออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD สร้างเป็นรอยต่อ พีเอ็น เพื่อศึกษาคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

### 3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

การเตรียมฐานรองก่อนที่จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้นมีความสำคัญต่อการก่อตัวของอะตอมคาร์บอน ในที่นี้เลือกใช้ซิลิกอน (Si) มาเป็นฐานรองในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ซึ่งการเตรียมฐานรองนั้นจะต้องทำความสะอาดฐานรองก่อน โดยเริ่มจากการทำความสะอาดผิวหน้าของซิลิกอนด้วยน้ำ DI (Deionized Water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaning) จากนั้นจึงทำการล้างสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้าออกด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) แล้วจึงทำการล้างไตรคลอโรเอทิลีนออกด้วยอะซิโตน (Acetone) จากนั้นจึงทำการล้างซ้ำด้วยน้ำ DI แล้วจึงเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน หลังจากทำความสะอาดผิวหน้าของฐานรองเรียบร้อยแล้ว จึงขัดบริเวณผิวหน้าของฐานรองซิลิกอนให้เกิดความเสียหาย เพื่อเป็นการกระตุ้นทำให้เกิดการก่อตัวของคาร์บอนบนฐานรองมากขึ้น ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ครีมเพชรขนาดเม็ดผลึก 0.25 ไมครอน และใช้เวลาในการขัดประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำความสะอาดแผ่นฐานรองอีกครั้งด้วยวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น จากนั้นจึงนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมเป็นที่เรียบร้อยแล้วไปใช้งานเพื่อเป็นฐานรองภายในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

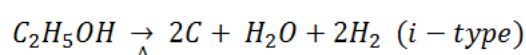


รูปที่ 3.1 ครีมเพชร (Diamond Paste)

### 3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

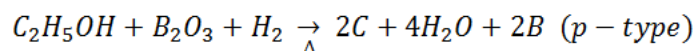
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้วิธี HFCVD เพื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เนื่องจากวิธีนี้เตรียมอุปกรณ์ได้ง่าย และการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้ยังใช้เพียงความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งทำให้ไม่ต้องกังวลในการออกแบบระบบในการสังเคราะห์มากนัก ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ที่ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรนั้นจะเริ่มจากการใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในเอทิลแอลกอฮอล์ไหลผ่านเข้าไปในหลอดทดลอง วิธีนี้อาศัยการแตกตัวด้วยพลังงานความร้อนที่ได้จากขดลวดให้ความร้อนชนิดทั้งสแตนเลสซึ่งที่ขณะเวลาการสังเคราะห์จะให้อุณหภูมิประมาณ 2,000 องศาเซลเซียสที่ขดลวด จากนั้นความร้อนที่ขดลวดจะแผ่รังสีความร้อนไปยังฐานรองที่ปรับระดับได้และมีตัววัดอุณหภูมิฐานรองติดอยู่เพื่อที่จะควบคุมอุณหภูมิฐานรอง ซึ่งอุณหภูมิฐานรองนั้นมีความสำคัญต่อการเกิดระนาบต่าง ๆ ของฟิล์มเพชร จากปฏิกิริยาดังกล่าวทำได้อะตอมของคาร์บอนตกลงไปก่อตัวยังฐานรอง เหลือเพียงแต่อะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจนไหลออกจากระบบ วิธีสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD นั้นสามารถแบ่งชนิดของฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ดังนี้

- 1) ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก (i-type Diamond film) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD สมการของปฏิกิริยา คือ

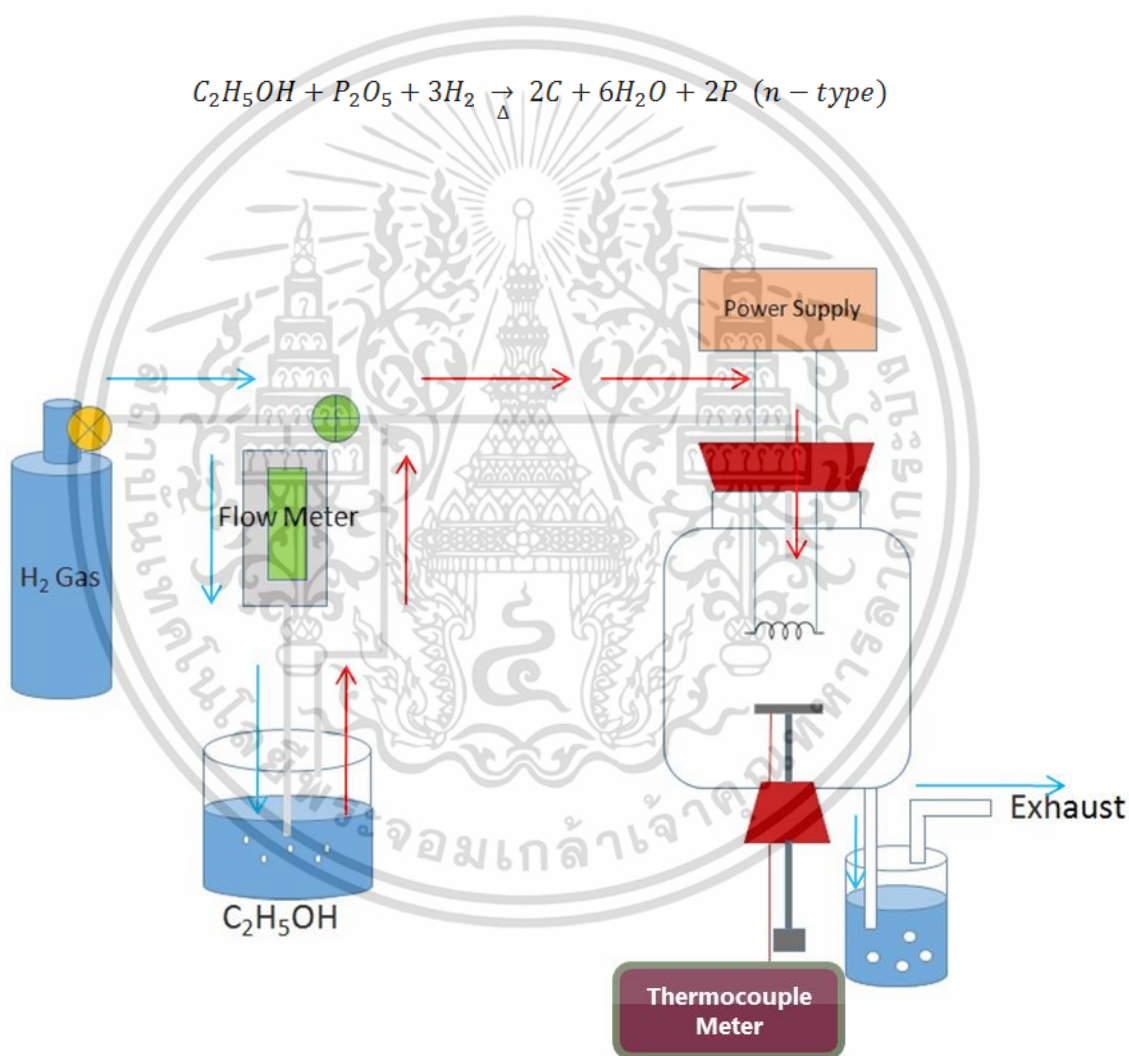


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) फिल्मเพชรชนิดพี (p- type Diamond film) ที่ได้จาก การสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD สมการของปฏิกิริยา คือ



3) फिल्मเพชรชนิดเอ็น (n- type Diamond film) ที่ได้จาก การสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD สมการของปฏิกิริยา คือ



รูปที่ 3.2 แผนภาพของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 แผนภาพของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD จะเห็นได้ว่าสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ เอทิลแอลกอฮอล์ ซึ่งไม่มีการเติมอะตอมสารเจือลงไป จึงทำให้ฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD ตามรูปนี้เป็นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก (i-type Diamond film) โดยอุปกรณ์ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรประกอบด้วย

- 1) ถังบรรจุก๊าซไฮโดรเจนพร้อมเรกกูเรเตอร์
- 2) Flow Meter ขนาด 20 ml/min.
- 3) หลอดจ่ายเอทิลแอลกอฮอล์
- 4) ชุดแหล่งจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อน
- 5) ขดลวดทั้งสแตน
- 6) ชุดแท่งตั้งฐานรอง
- 7) จุกยางทนความร้อน
- 8) ชุดวัดอุณหภูมิฐานรอง
- 9) ชุดขวดน้ำสำหรับขจัดก๊าซออกจากหลอดทดลอง

จากแผนภาพของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD มีขั้นตอนในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก (i-type Diamond film) ดังนี้

- 1) เตรียมฐานรองตามที่ได้กล่าวมา จากนั้นนำเข้าไปวางในระบบบนแท่งตั้งฐานรอง พร้อมกับต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สมบูรณ์ตามรูปโดยะแกรมของวิธีการ HFCVD
- 2) เมื่อระบบถูกต้องอย่างสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว เปิดวาล์ว 1 ปล่องก๊าซไฮโดรเจนให้ไหลเข้าไปยังหลอดทดลองโดยตรงให้ได้อัตราการไหล 200 ml/min. เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บรรยากาศภายในหลอดทดลองกลายเป็นบรรยากาศของไฮโดรเจน
- 3) ระหว่างนั้นตรวจสอบว่ามีก๊าซที่ถูกขจัดไหลออกจากระบบผ่านทางชุดขวดน้ำสำหรับขจัดก๊าซหรือไม่ เพื่อเป็นการตรวจสอบก๊าซรั่ว
- 4) หลังจากภายในหลอดทดลองกลายเป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนแล้วจึงทำการปิดวาล์ว 1 และปรับ Flow Meter ให้ได้อัตราการไหล 14 ml/min. พร้อมทั้งลดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนให้เหลือเพียง 100 ml/min. เพื่อปล่องก๊าซไฮโดรเจนให้เป็นตัวนำพาไอระเหยของเอทิลแอลกอฮอล์ไปยังหลอดทดลอง เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) เปิดชุดแหล่งจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อน พร้อมทั้งเปิดชุดวัตต์อุณหภูมิฐานรอง ค่อย ๆ ปรับแหล่งจ่ายไฟให้เพิ่มขึ้น เพื่อให้ขดลวดเกิดความร้อนจนกระทั่งได้รับความร้อนตามที่ต้องการ

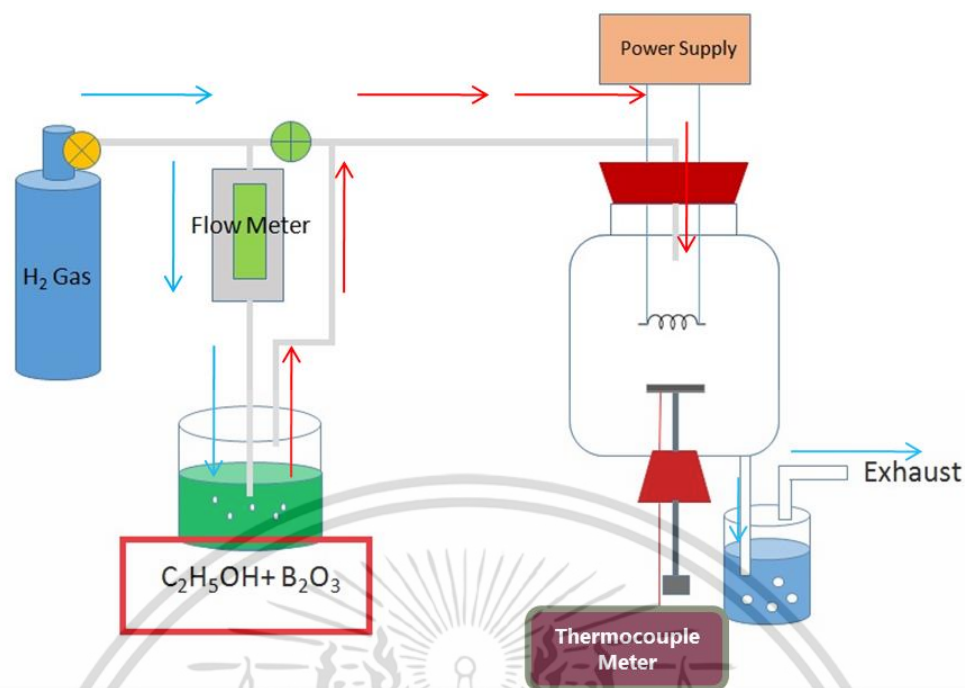
6) เริ่มทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรตามเวลาที่ต้องการ

7) หลังจากทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ตามที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว จึงปิด Flow Meter พร้อมกับเปิดวาล์ว 1 จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดการจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนลงจนกระทั่งปิด Power Supply แล้วจึงทำการปิดก๊าซไฮโดรเจน รอจนไม่พบฟองอากาศที่ไหลออกจากระบบผ่านชุดขุดน้ำสำหรับขจัดก๊าซ จึงถือเป็นการสิ้นสุดการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ทิ้งไว้ให้ระบบเย็นตัวลงแล้วจึงสามารถนำฟิล์มเพชรออกมาทดสอบคุณสมบัติในขั้นตอนต่อไป

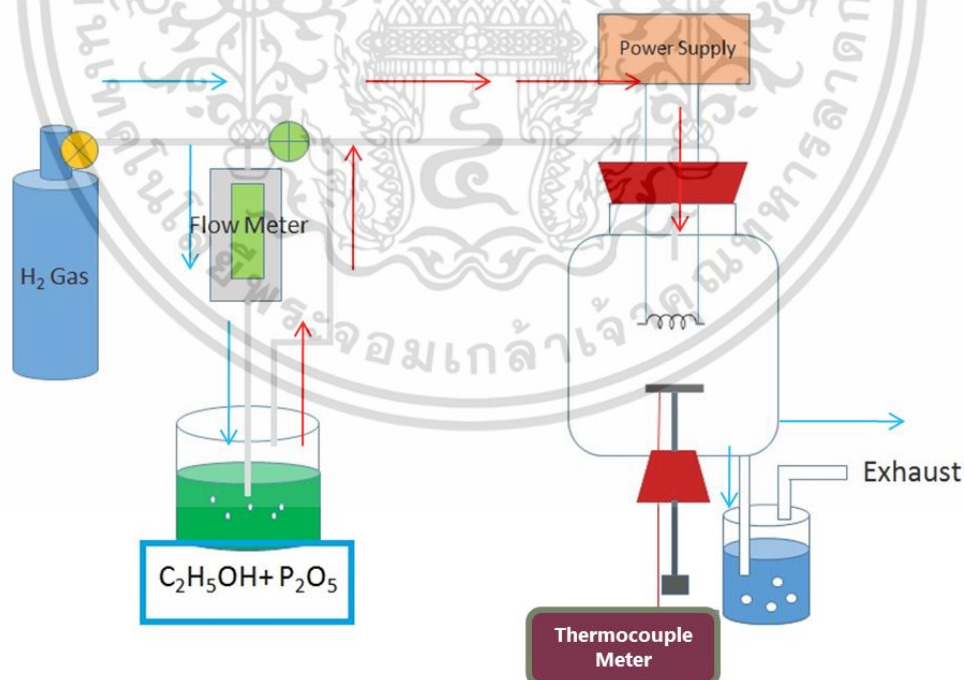
### 3.3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ชนิดพี (p-type) และชนิดเอ็น (n-type) ด้วยวิธี HFCVD

ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี และชนิดเอ็น ด้วยวิธี HFCVD นั้นจะต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมฐานรองเช่นเดียวกับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคซึ่งใช้แผ่นซิลิกอนเป็นฐานรอง หลังจากการเตรียมพื้นผิวของฐานรองซิลิกอนเรียบร้อยแล้วต้องนำฐานรองซิลิกอนไปทำความสะอาดอีกครั้งเพื่อไม่ให้ฐานรองซิลิกอนสกปรก จากนั้นจึงทำการตัดฐานรองซิลิกอนให้เป็นชิ้นขนาด 5x5 ตารางมิลลิเมตร และกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี และชนิดเอ็น ด้วยวิธี HFCVD มีขั้นตอนเช่นเดียวกับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค แต่แตกต่างตรงที่การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีจะมีการเติมอะตอมสารเจือโบรอน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) เติมลงในเอทิลแอลกอฮอล์ แสดงแผนผังการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธี HFCVD ดังรูปที่ 3.3 และสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นจะมีการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส จะใช้ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ ( $P_2O_5$ ) เติมลงในเอทิลแอลกอฮอล์ แสดงแผนผังการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธี HFCVD ดังรูปที่ 3.4 โดยการเติมอะตอมสารเจือของโบรอน และฟอสฟอรัส ลงไปในเอทิลแอลกอฮอล์นั้นจะต้องได้รับการคำนวณอัตราส่วนการเติมสารเจือต่อคาร์บอน ในหน่วยของ ppm (part per million) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้อัตราส่วนการเติมอะตอมสารเจือโบรอนต่ออะตอมคาร์บอน และอัตราส่วนการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสต่ออะตอมคาร์บอน เท่ากับ 10,000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

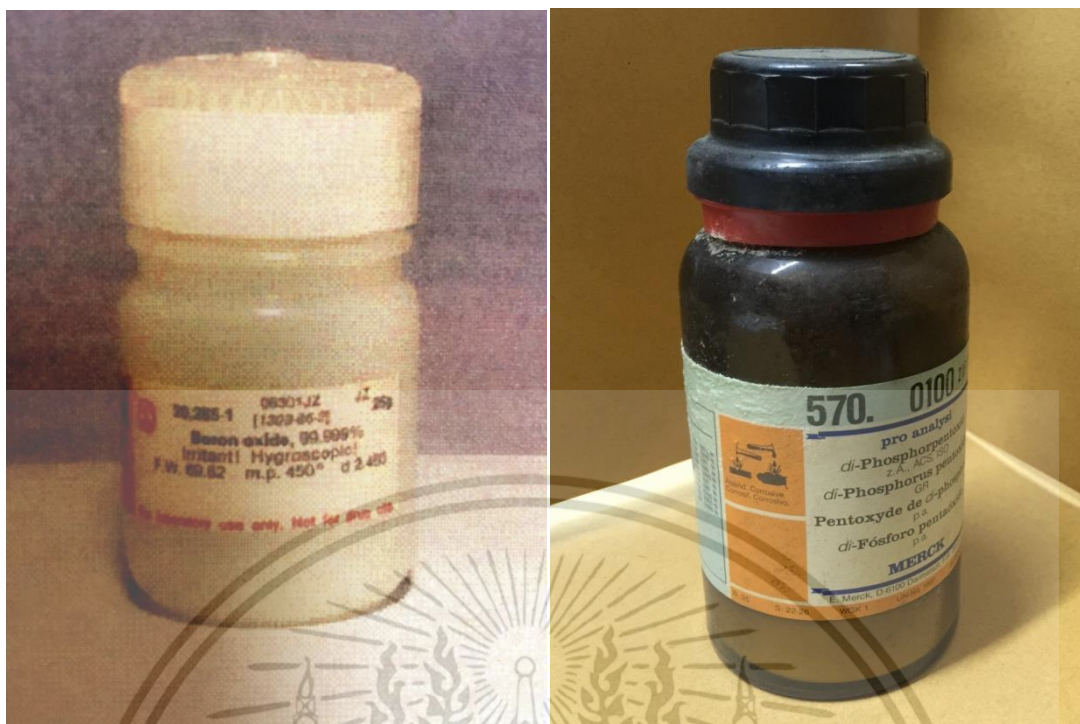


รูปที่ 3.3 แผนภาพของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ชนิดพี (p-type) ด้วยวิธี HFCVD



รูปที่ 3.4 แผนภาพของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็น (n-type) ด้วยวิธี HFCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 โบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) และ ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ ( $P_2O_5$ )

ตัวอย่างการคำนวณอัตราส่วนในการเติมอะตอมสารเจือ

มวลโมเลกุล และมวลอะตอม

$$C = 12.01115$$

$$B = 10.811$$

$$O = 15.9994$$

$$H = 1.00797$$

$$C_2H_5OH = 46.0695$$

$$B_2O_3 = 69.6202$$

ถ้าต้องการ อัตราส่วน B/C = 1 ppm ในสารละลาย 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จาก  $C_2H_5OH$  1 ลูกบาศก์เซนติเมตรหนัก 0.796 กรัม

$$C_2H_5OH \text{ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรหนัก } 0.796 \times 50 = 39.8 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่าโมเลกุลของโบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ )

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุล } (B_2O_3) &= (\text{น้ำหนักอะตอมโบรอน} \times 2) + (\text{น้ำหนักอะตอมออกซิเจน} \times 3) \\ &= (10.811 \times 2) + (15.9994 \times 3) \\ &= 69.6202 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าน้ำหนักโมเลกุลของเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ )

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุล } (C_2H_5OH) &= (\text{น้ำหนักอะตอมคาร์บอน} \times 2) + (\text{น้ำหนักอะตอมไฮโดรเจน} \times 6) \\ &\quad + (\text{น้ำหนักอะตอมออกซิเจน} \times 1) \\ &= (12.01115 \times 2) + (1.00797 \times 6) + (15.9994 \times 1) \\ &= 46.0095 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์โบรอนและคาร์บอน

1) โบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) น้ำหนัก 69.6202

ดังนั้น  $B_2O_3$  1 โมล จะมีโบรอน  $2 \times 10.81 = 21.622$  กรัม

2) เอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) น้ำหนัก 46.0223 กรัม/โมล

ดังนั้น  $C_2H_5OH$  1 โมล จะมีคาร์บอน  $2 \times 12.01115 = 24.0223$  กรัม

ดังนั้น  $C_2H_5OH$  50 ลูกบาศก์เซนติเมตรจะมีปริมาณ  $39.80/46.0695 = 0.8639$  โมล

เพราะ ฉะนั้น  $C_2H_5OH$  0.8639 โมล จะมีคาร์บอน  $0.8639 \times 24.023 = 20.7535$  กรัม

จาก  $B/C = 1 \text{ ppm} = 1 \times 10^{-6}$

คือ คาร์บอน  $10^6$  กรัม จะมีโบรอนอยู่ 1 กรัม

ถ้า คาร์บอน 20.7535 กรัม จะมีโบรอนอยู่  $2.07535 \times 10^{-5}$  กรัม

ดังนั้น จะมีโบรอน 21.622 กรัม อยู่ในโบรอนไตรออกไซด์ 1 โมล

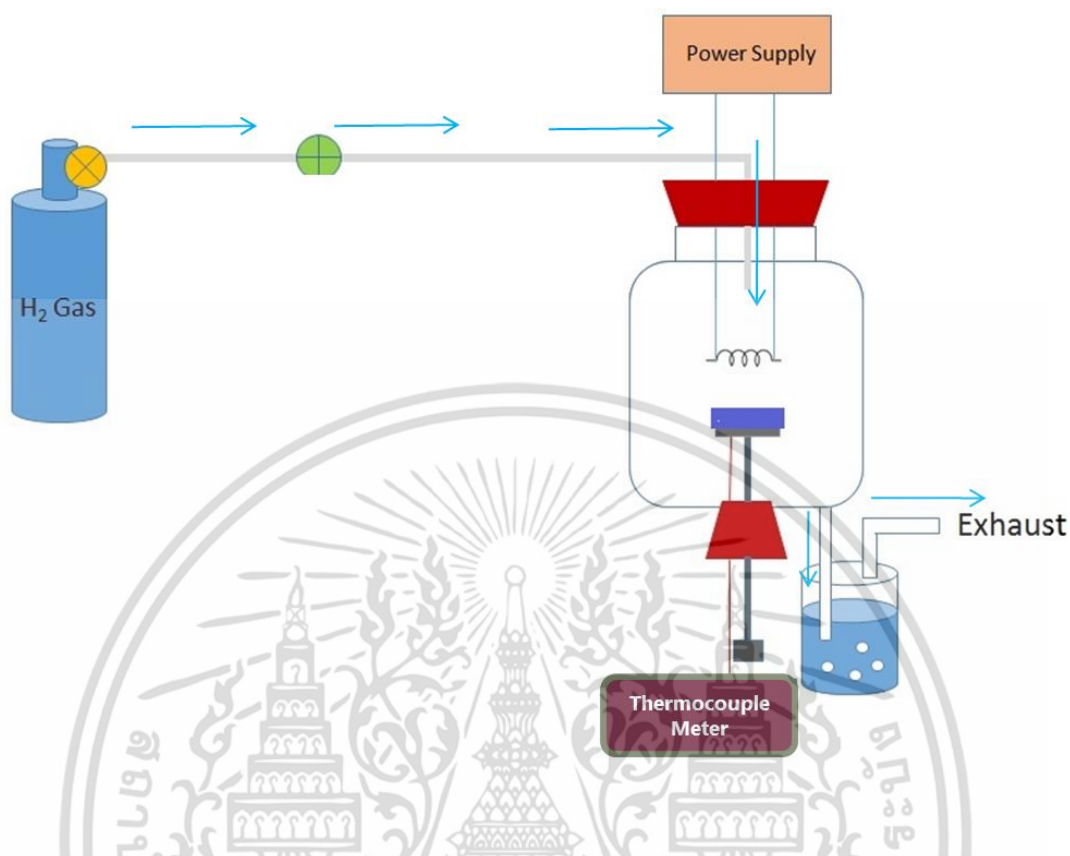
จะมีโบรอน  $2.07535 \times 10^{-5}$  กรัม อยู่ในโบรอนไตรออกไซด์  $9.5983 \times 10^{-7}$  โมล

เพราะนั้นจะต้องใช้โบรอนไตรออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) น้ำหนัก  $(9.5983 \times 10^{-7}) \times (69.6202)$

$= 6.68235 \times 10^{-5}$  กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรด้วยวิธี แอนนีสล



รูปที่ 3.6 แผนภาพการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรด้วยวิธี แอนนีสล

จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD จะพบความไม่สมบูรณ์ของฟิล์ม ไม่ว่าจะเป็นการก่อตัวของอะตอมคาร์บอนที่ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้เกิดแกรไฟต์ และเขม่า หรือความไม่สมบูรณ์ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มเพชร จึงจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชร ในงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มด้วยวิธีแอนนีสล ซึ่งมีระบบใกล้เคียงกับระบบการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD โดยระบบเป็นไปตามรูปที่ 3.6 แผนภาพการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรด้วยวิธี แอนนีสล และมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำฟิล์มเพชรที่มีความไม่สมบูรณ์เข้าไปวางในระบบบนแท่งตั้งฐานรอง พร้อมกับต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สมบูรณ์ตามรูปไดอะแกรมการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรด้วยวิธี แอนนีสล
- 2) เมื่อระบบถูกต้องอย่างสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว เปิดวาล์ว 1 ปล่องก๊าซไฮโดรเจนให้ไหลเข้าไปยังหลอดทดลองโดยตรงให้ได้อัตราการไหล 200 ml/min. เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บรรยากาศภายในหลอดทดลองกลายเป็นบรรยากาศของไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

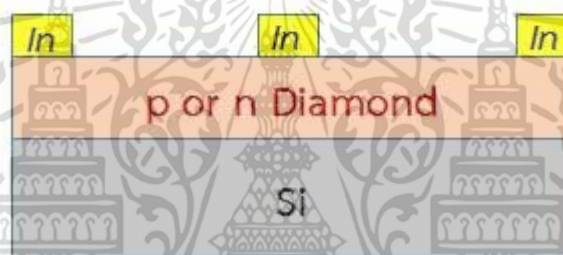
- 3) ระหว่างนั้นตรวจสอบว่ามีก๊าซที่ถูกขจัดไหลออกจากระบบผ่านทางชุดขูดน้ำสำหรับขจัดก๊าซหรือไม่ เพื่อเป็นการตรวจสอบก๊าซรั่ว
- 4) เปิดชุดแหล่งจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อน พร้อมทั้งเปิดชุดวัดอุณหภูมิฐานรอง ค่อย ๆ ปรับแหล่งจ่ายไฟให้เพิ่มขึ้น เพื่อให้ขดลวดเกิดความร้อนจนกระทั่งได้ความร้อนตามที่ต้องการ
- 5) เริ่มทำการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรตามเวลาที่ต้องการ
- 6) หลังจากทำการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรได้ตามที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว จึงลดการจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนลงจนกระทั่งปิด Power Supply แล้วจึงทำการปิดก๊าซไฮโดรเจน รอจนไม่พบฟองอากาศที่ไหลออกจากระบบผ่านทางชุดขูดน้ำสำหรับขจัดก๊าซ จึงถือเป็นการสิ้นสุดการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชร ทิ้งไว้ให้ระบบเย็นตัวลงแล้วจึงสามารถนำฟิล์มเพชรออกมาทดสอบคุณสมบัติในขั้นตอนต่อไป

### 3.5 กระบวนการสร้างหัววัดฮอลล์ด้วยฟิล์มเพชร

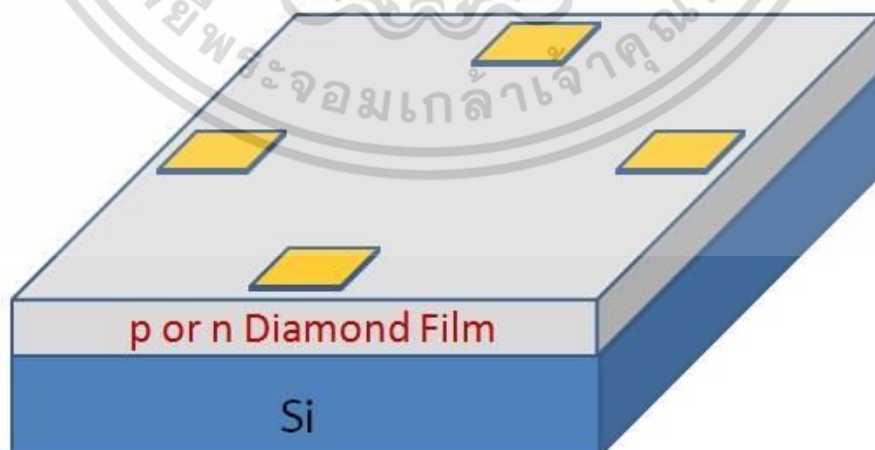
จากกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD สามารถนำฟิล์มเพชรที่ได้ทั้งฟิล์มเพชรชนิดพี และชนิดเอ็น มาประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดฮอลล์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น และการใช้งานเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กเป่าหมายที่สำคัญ คือ ต้องมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการนำไปใช้งาน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอเสนอการใช้ฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD และผ่านการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มด้วยวิธีการแอนนัลเพื่อทำการทดสอบโดยเริ่มจากการทำความสะอาดสิ่งสกปรกบริเวณผิวหน้าของฟิล์มเพชรด้วยไตรคลอโรเอธิลีนเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันออก จากนั้นล้างไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซีโตนแล้วจึงล้างด้วยน้ำ DI สุดท้ายเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน เมื่อได้ฟิล์มเพชรที่สะอาดแล้วจึงทำการออกแบบเพื่อนำไปใช้เป็นหัววัดฮอลล์ โดยจำเป็นที่จะต้องต่อขั้วโลหะเพื่อใช้ในการวัดค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ต่อขั้วโลหะด้วยโลหะอินเดียม (In) และอาศัยเครื่องอัลตราโซนิกในการเชื่อมต่อ ซึ่งการสร้างหัววัดฮอลล์เพชรมีการออกแบบดังรูปที่ 3.7



or



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการสร้างหัววัดฮอลล์จากฟิล์มเพชรชนิดพี และชนิดเอ็น  
ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD



รูปที่ 3.8 ภาพหัววัดฮอลล์ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบจำเป็นที่จะต้องทำให้บริเวณขั้วโลหะที่ต่อออกมาจากฟิล์มเพชรเพื่อใช้งานในการทดสอบมีรอยสัมผัสเป็นโอห์มมิก (Ohmic contact) เพื่อลดปัญหาความต้านทานระหว่างผิวสัมผัสและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณรอยสัมผัส ซึ่งจะส่งผลทำให้การทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบขั้วโลหะทั้งหมดก่อนการทดสอบการประยุกต์ใช้งานเพื่อเป็นหัววัดฮอลล์ ว่าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกหรือไม่

### 3.5.1 การทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชร

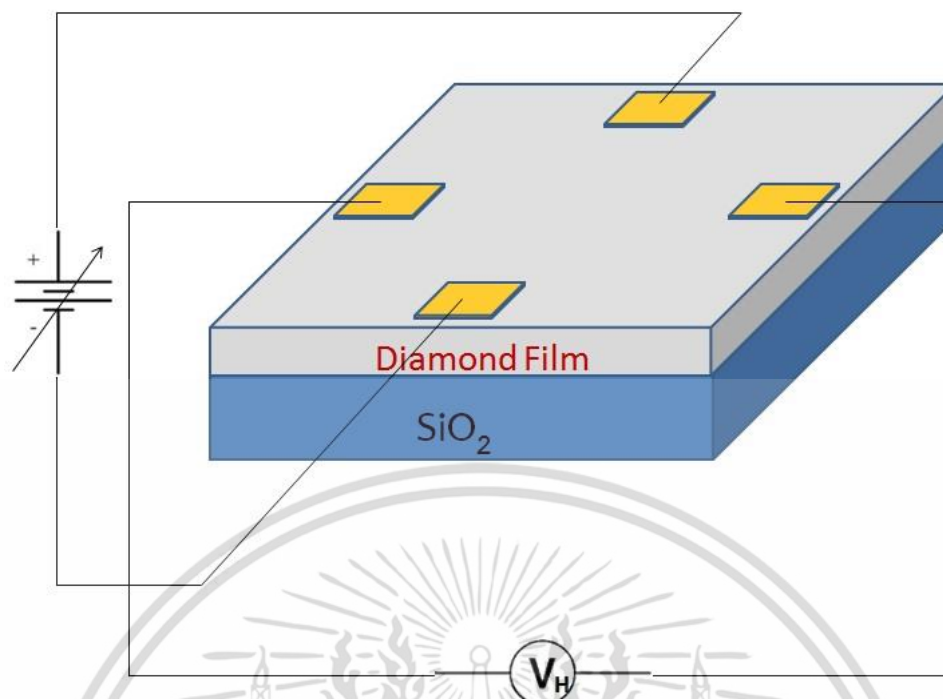
หัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของฟิล์มเพชรทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD เมื่อถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดฮอลล์ โดยการทดสอบจะอาศัยเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ในช่วง  $-5000$  ถึง  $+5000$  เกาส์ ในการให้สนามแม่เหล็กแก่หัววัดฮอลล์เพชร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อทำการต่อขั้วของฟิล์มเพชรเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงทำการออกแบบวิธีการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของฟิล์มเพชรโดยต่อขั้วของฟิล์มเพชรดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แผนภาพการเตรียมทดสอบฟิล์มเพชรเพื่อใช้งานเป็นหัววัดฮอลล์



รูปที่ 3.11 แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) สำหรับหัววัดฮอลล์เพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 มัลติมิเตอร์ ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์



รูปที่ 3.13 เกาส์มิเตอร์ (Gauss Meter) สำหรับวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นรอยต่อพีเอ็น

สำหรับการสร้างรอยต่อ พี และเอ็น ของฟิล์มเพชรนั้น สามารถใช้วิธี HFCVD ในการสร้างได้ ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ฐานรองซิลิกอนขนาด  $5 \times 5$  ตารางมิลลิเมตร และจะทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็นโดยการเติมอะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสลงไป เป็นอันดับแรกโดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ฟิล์ม 12 ชั่วโมง ให้อุณหภูมิฐานรอง 800 องศาเซลเซียส และทำการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มด้วยวิธีแอนนัลภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน ใช้อุณหภูมิฐานรองในการแอนนัล 900 องศาเซลเซียส เวลา 9 นาที จากนั้นจึงใช้แผ่นโมลิตินัมขนาด  $3 \times 5$  ตารางมิลลิเมตร มาเป็นหน้ากาก (Mask) เพื่อจะสร้างรอยต่อพีเอ็นโดยชั้นพีนั้นจะสร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีที่เติมอะตอมสารเจือของโบรอนลงไปและใช้เงื่อนไขการสังเคราะห์เช่นเดียวกับฟิล์มเพชรชนิดเอ็น กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรทั้งชนิดเอ็นและพี นั้นใช้อัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน และฟอสฟอรัสต่อคาร์บอนเท่ากับ 10,000 ppm ซึ่งขั้นตอนในการสร้างรอยต่อ พี และเอ็นจะถูกแสดงดังรูปที่ 3.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มเพชรเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นรอยต่อพีเอ็น ด้วยวิธี HFCVD

หลังจากทำการสร้างรอยต่อพีเอ็น ระหว่างฟิล์มเพชรเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำไปตรวจวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันเพื่อศึกษาคุณสมบัติที่สำคัญของไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรให้ได้ขนาดต่าง ๆ ตามการกำหนดอุณหภูมิฐานรอง โดยเริ่มตั้งแต่การค้นหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร รวมไปถึงผลของการเจืออะตอมของสารเจือลงไปเพื่อให้ได้ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและชนิดพี โดยลักษณะทางกายภาพของฟิล์มจะถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ และ SEM ส่วนการยืนยันความเป็นเพชรจะถูกวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy จากนั้นฟิล์มเพชรจะถูกนำมาสร้างเป็นหัววัดฮอลล์เพื่อทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และสุดท้ายจะทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีกับเอ็นที่ถูกสร้างจากฟิล์มเพชร

#### 4.1 เงื่อนไขที่สำคัญต่อการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้นหากต้องการฟิล์มที่มีคุณภาพดีนั้น จำเป็นต้องพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อคุณภาพฟิล์มเพชร ได้แก่ อุณหภูมิฐานรอง อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนผ่านเอทิลแอลกอฮอล์ จำนวนรอบของขดลวดความร้อน ระยะห่างระหว่างขดลวดความร้อนกับฐานรอง จากการทดลองซ้ำ ๆ หลายครั้งและทดลองเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หลาย ๆ ตัวแปร จึงทำให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ดังนี้

##### ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	
1) ชนิดของฐานรอง	ซิลิกอน (Si)
2) ชนิดของขดลวดความร้อน	ทั้งสแตน
3) จำนวนรอบการพันขดลวดความร้อน	30 รอบ/1.5 เซนติเมตร
4) ระยะห่างระหว่างขดลวดความร้อนกับฐานรอง	2 มิลลิเมตร
5) ขนาดของฐานรองซิลิกอน	5x5 ตารางมิลลิเมตร
6) อัตราการไหลของไฮโดรเจนผ่านเอทิล-แอลกอฮอล์	14 มิลลิลิตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 เงื่อนไขที่สำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มเพชรด้วยวิธีแอนนีส

จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมพบว่ายังมีความไม่สมบูรณ์ของฟิล์มเพชรอยู่บ้าง เช่นการจัดเรียงตัวไม่สม่ำเสมอของอะตอมคาร์บอนจึงทำให้ก่อตัวเป็นแกรไฟต์ หรือเขม่า ในสถานะ  $sp^2$  ซึ่งไม่ใช่สถานะของเพชรจึงจำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรเหล่านั้น ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการแอนนีส จากการทดลองหลายครั้งจึงได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการแอนนีส ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มเพชรด้วยวิธีแอนนีส

เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มเพชรด้วยวิธีแอนนีส	
ชนิดของก๊าซที่ใช้ในการแอนนีส	ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ )
จำนวนรอบการพันขดลวดความร้อนสำหรับการแอนนีส	30 รอบ/1.5 เซนติเมตร
ระยะห่างระหว่างขดลวดความร้อนกับฐานวางฟิล์ม	2 มิลลิเมตร
อุณหภูมิที่ฟิล์ม	900 องศาเซลเซียส
อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปยังหลอดทดลอง	15 มิลลิลิตร/นาที
ระยะเวลาในการแอนนีส	9 นาที

จากการปรับปรุงชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์โดยแก้ไขจุดบกพร่องทางด้านอุณหภูมิ เนื่องจากชุดอุปกรณ์ที่เคยทำการสร้างมาพบปัญหาความร้อนสะสมสูงจึงส่งผลโดยตรงกับจุกยางซึ่งทำหน้าที่ปิดหลอดทดลองเพื่อให้ระบบการสังเคราะห์เป็นระบบปิด จึงเป็นที่มาของการออกแบบหลอดทดลองใหม่ให้มีความยาวและกว้างกว่าหลอดทดลองเดิม [6] ทำให้เห็นได้ว่า ข้อจำกัดทางด้านเวลาในการสังเคราะห์ที่ส่งผลทางด้านอุณหภูมิสูงนั้นถูกกำจัดไป และได้มีการติดตั้งชุดวัดอุณหภูมิฐานรองเพิ่มเพื่อศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อระนาบฟิล์มเพชร จากการทดลองจึงทำให้เห็นถึงระนาบต่าง ๆ ของฟิล์มเพชรที่เกิดจากการให้อุณหภูมิฐานรองแต่ละค่า แสดงดังตารางที่ 4.3

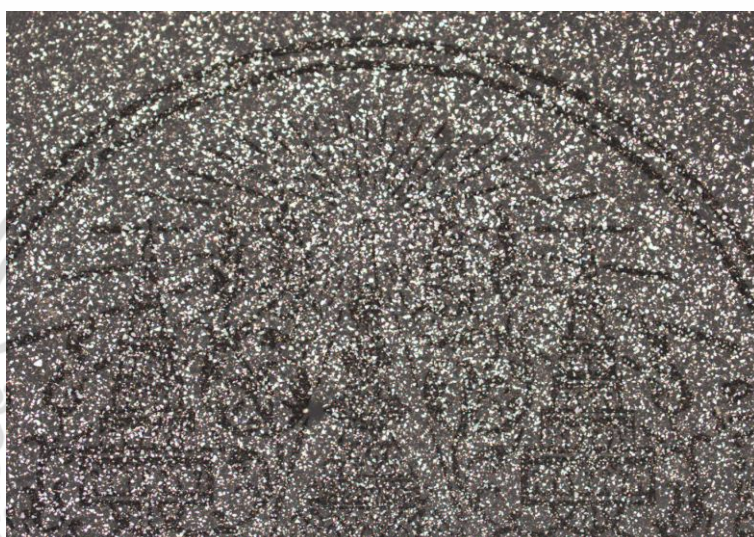
ตารางที่ 4.3 แสดงระนาบต่าง ๆ ของฟิล์มเพชรที่เกิดจากการให้อุณหภูมิฐานรองแต่ละค่า

อุณหภูมิฐานรอง (องศาเซลเซียส)	ระนาบของฟิล์มเพชร
600-800	(111)
800-900	(111) และ (100)
900-1000	(100)

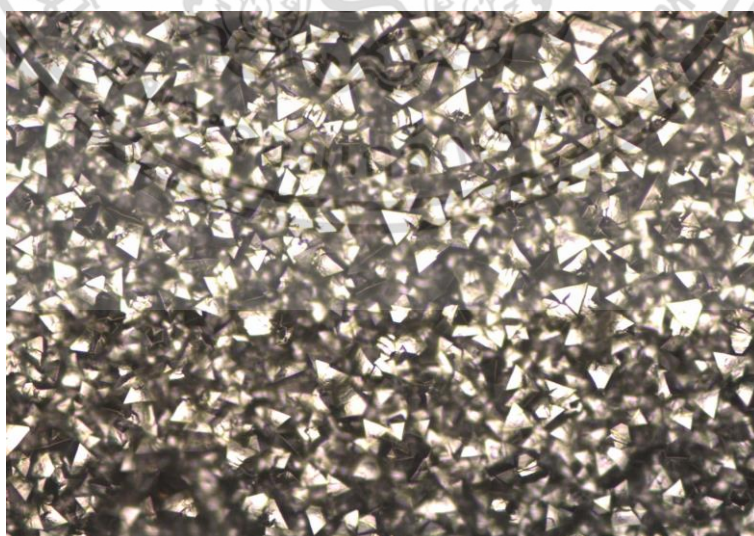
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มเพชรเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์

จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD นั้นเราสามารถตรวจสอบลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นได้จากการถ่ายภาพของกล้องจุลทรรศน์ดูแนวโน้มการเกิดของฟิล์มเพชร เพื่อที่จะนำมาพิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ซึ่งวิธีนี้ถือว่าสะดวกต่อการใช้งานมากที่สุด ซึ่งลักษณะพื้นผิวฟิล์มที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์จะถูกแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.2



รูปที่ 4.1 ภาพของฟิล์มเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.2 ภาพของฟิล์มเพชรด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพลักษณะของฟิล์มเพชรที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์นั้นบอกได้เพียงคร่าว ๆ ถึงการก่อตัวของเพชร ซึ่งไม่สามารถบอกลักษณะระนาบได้ จึงต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงจึงจะยืนยันได้ถึงระนาบของฟิล์มเพชร ซึ่งในหัวข้อต่อไปจะใช้เครื่องมือที่มีคุณภาพสูงกว่าในการวิเคราะห์ระนาบของฟิล์มเพชร

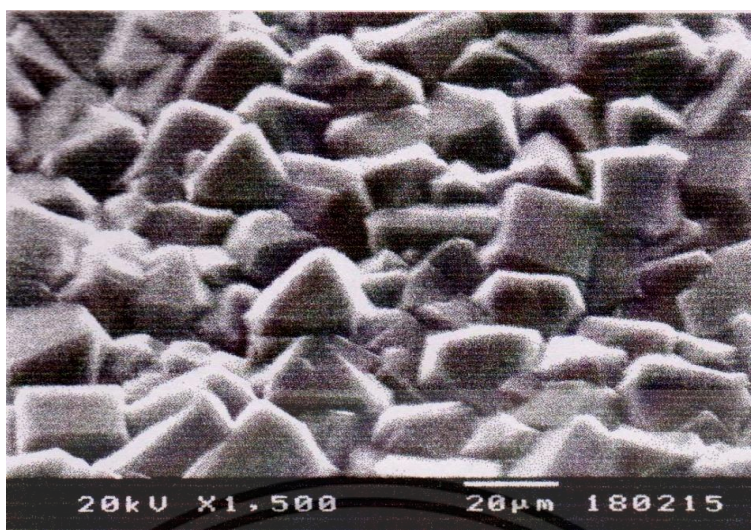
#### 4.4 การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่ายจาก SEM (Scanning Electron Microscope)

จากหัวข้อที่ผ่านมาภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์สามารถชี้วัดลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรเพียงเบื้องต้นเท่านั้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่เวลาการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และได้ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองขณะการสังเคราะห์ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยจะทำการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มหลังจากการสังเคราะห์แล้วทุกครั้ง ด้วยวิธีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน ใช้อุณหภูมิฐานรองขณะการแอนนัล 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที มาทำการถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร ซึ่งภาพที่ถ่ายด้วยเครื่อง SEM นั้นจะแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.5

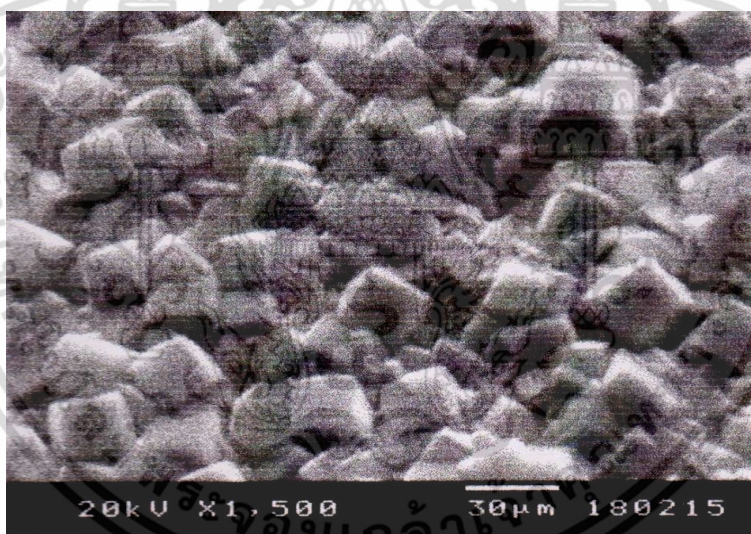


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรอง 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบเป็นระนาบ (111)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรอง 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบเป็นระนาบ (111) และ (100)



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรสังเคราะห์ที่อุณหภูมิฐานรอง 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบเป็นระนาบ (100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

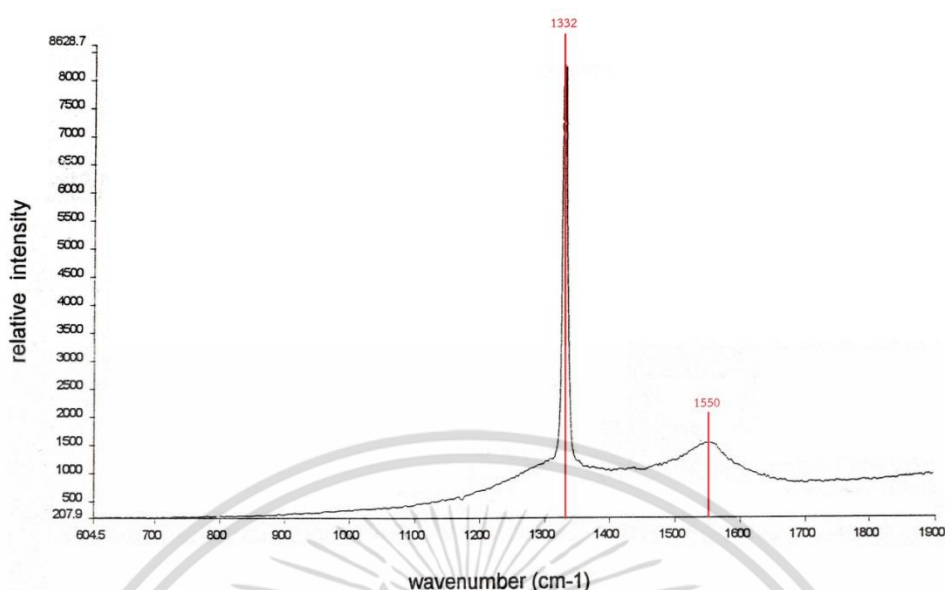
#### 4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy

เมื่อต้องการยืนยันความเป็นเพชรของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์นั้น สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy และการแปลค่าจากกราฟรามานจะบอกถึงสิ่งที่เจือปนอยู่กับฟิล์ม เช่น แกรไฟต์ หรือ อสัณฐานคาร์บอน ได้ ซึ่งสามารถเทียบค่ามาตรฐานได้จากตารางวิเคราะห์กราฟ Raman Spectroscopy

ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์กราฟ Raman Spectroscopy

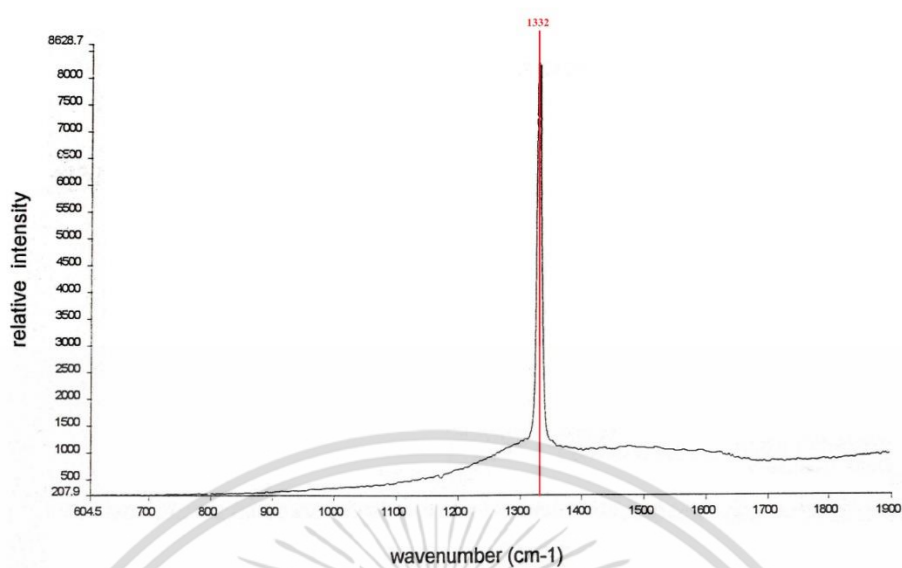
ตำแหน่งของยอด ( $\text{cm}^{-1}$ )	ชนิดของคาร์บอน	หมายเหตุ
~1140	เพชรรูปทรง cubic ขนาดเล็ก ( $<0.1 \mu\text{m}$ )	พบได้ทั่วไปในฟิล์มเพชรซึ่งมีเกรนขนาดเล็กมาก
1315-1326	เพชรรูปทรง Hexagonal	มีความกว้างของยอดมาก
1332	เพชรรูปทรง Cubic	ยอดตำแหน่งที่ 1
1345	อะมอร์ฟัสคาร์บอน	มีความกว้างของยอดมาก
1355	แกรไฟต์ ไมโครคริสตัลไลน์	พบในวัสดุที่มีเกรนเล็ก
1550	อสัณฐานคาร์บอน หรือคาร์บอนที่มีลักษณะเหมือนเพชร	มีความกว้างของยอดมาก
1580	แกรไฟต์	ยอดตำแหน่งที่ 1
2458	เพชรรูปทรง Cubic	ยอดตำแหน่งที่ 2
2710	แกรไฟต์ ไมโครคริสตัลไลน์	ยอดตำแหน่งที่ 2
3240	แกรไฟต์	ยอดตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



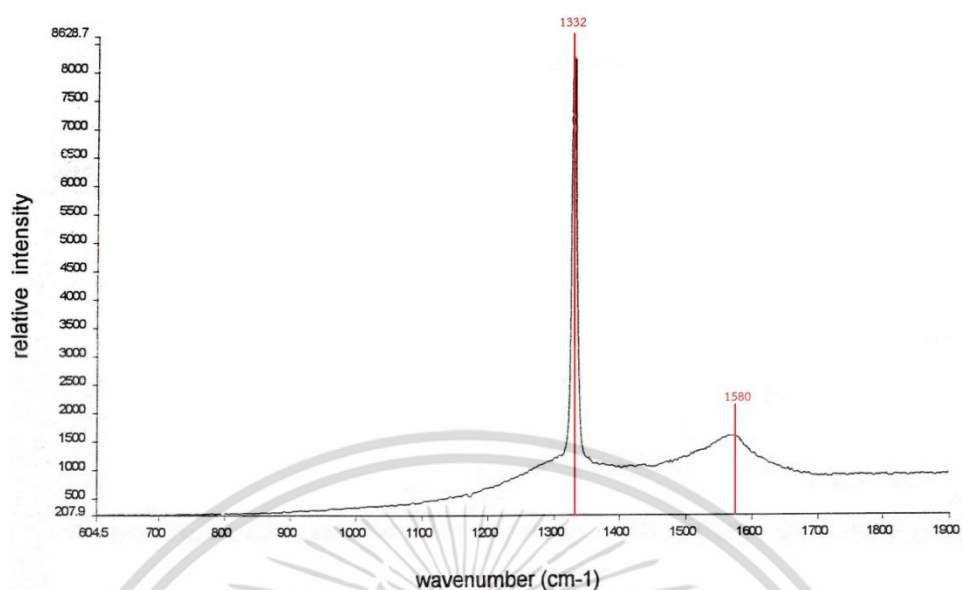
รูปที่ 4.6 กราฟจากเครื่อง Raman Spectroscopy ของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยยังไม่ได้รับการแอนนัล

จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟที่ได้จากเครื่อง Raman Spectroscopy ยืนยันให้เห็นว่าฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นั้นเป็นฟิล์มเพชร ซึ่งกราฟแสดงค่าพีคของเพชรที่ตำแหน่ง  $1332\text{ cm}^{-1}$  แต่พบว่ากราฟไม่ได้มีแค่พีคเดียว แต่ยังปรากฏพีคขนาดเล็กที่เห็นได้ชัดอีกหนึ่งพีคที่ตำแหน่ง  $1550\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเมื่อเทียบค่าตำแหน่งของพีคนี้กับตารางวิเคราะห์กราฟ Raman Spectroscopy พบว่าเป็นตำแหน่งพีคแสดงค่าของ อัญฐานคาร์บอน ทั้งนี้การพบสิ่งเจือปนที่ปรากฏบนฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้นั้น อาจเป็นเพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการก่อตัวของอะตอมคาร์บอนภายในหลอดทดลองมีความแตกต่างกันจึงทำให้อะตอมคาร์บอนบางอะตอมเย็นตัวลงและหยุดสั้นก่อนที่จะก่อตัวลงบนฐานรองเนื่องจากมีพลังความร้อนมากกระตุ้นไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงอาจจะเกิดการก่อตัวของคาร์บอนบนฐานรองที่ไม่ใช่การจัดเรียงตัวแบบ  $sp^3$  ทั้งหมด ปะปนกันในฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงฟิล์มที่มีข้อบกพร่องนั้น ให้มีความสมบูรณ์ของฟิล์มที่ดีขึ้น โดยอาศัยวิธีการแอนนัลในการลดจำนวนอะตอมคาร์บอนที่ไม่ได้จัดเรียงตัวกันในรูปแบบ  $sp^3$  ที่ปรากฏดังรูปที่ 4.6 นั่นก็คือ อัญฐานคาร์บอน นั่นเอง



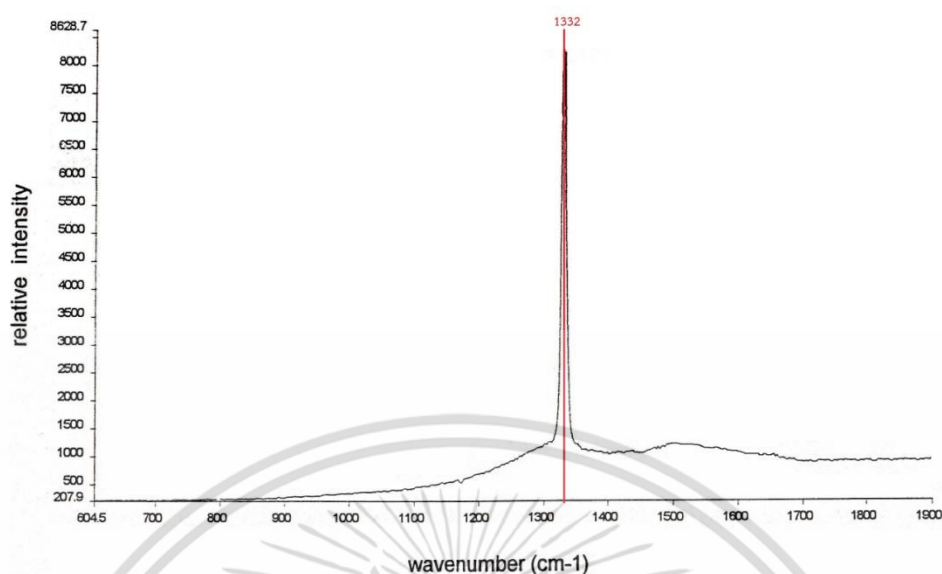
รูปที่ 4.7 กราฟจากเครื่อง Raman Spectroscope ของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน อุณหภูมิฐานรองขณะทำการแอนนัล 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที

ผลของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมงหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรด้วยวิธีแอนนัลภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน อุณหภูมิฐานรองขณะทำการแอนนัล 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที แสดงให้เห็นได้ชัดดังรูปที่ 4.7 ถึงคุณภาพของฟิล์มเพชรที่ดีขึ้น และจากการพิจารณาได้กราฟที่ได้จะเห็นว่าพีคที่แสดงค่าของสิ่งเจือปนบนฟิล์มเพชรที่เรียกว่า อัสฐานคาร์บอน ซึ่งแสดงพีคที่ตำแหน่ง  $1550\text{ cm}^{-1}$  ได้ถูกขจัดออกไปแทบไม่ปรากฏให้เห็นบนกราฟเลย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวิธีการแอนนัลสามารถปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรได้



รูปที่ 4.8 กราฟจากเครื่อง Raman Spectroscopy ของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยยังไม่ได้รับการแอนนีส

จากรูปที่ 4.8 เป็นกราฟปรมาณที่ได้จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แต่ฟิล์มเพชรนี้ตรวจพบสิ่งที่ปะปนมาที่ค่าตำแหน่งพีคเท่ากับ  $1580\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเมื่อเทียบกับตารางการวิเคราะห์กราฟ Raman Spectroscopy พบว่าตำแหน่งพีคที่  $1580\text{ cm}^{-1}$  นั้นคือ คาร์บอนในรูปแบบของแกรไฟต์ปะปนอยู่กับฟิล์มเพชร จึงได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรด้วยวิธีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน อุณหภูมิฐานรองขณะทำการแอนนีส  $900$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา  $9$  นาที แล้วจึงนำฟิล์มที่ปรับปรุงคุณภาพเรียบร้อยแล้วมาทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy อีกครั้ง เพื่อเป็นการยืนยันว่าวิธีการแอนนีสนั้นสามารถทำให้แกรไฟต์ลดลงโดยผลของการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรนั้นแสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งทำให้เห็นถึงการลดลงของแกรไฟต์อย่างชัดเจน และเหลือเพียงตำแหน่งพีคที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  ปรากฏอยู่เพียงแคंपีกเดียว เมื่อเปรียบเทียบค่าตำแหน่งพีคนี้กับตารางการวิเคราะห์กราฟ Raman Spectroscopy จึงยืนยันได้ว่าเป็นตำแหน่งพีคของเพชร ซึ่งนั่นก็เป็นการยืนยันถึงวิธีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิฐานรองขณะทำการแอนนีส  $900$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา  $9$  นาที ว่ามีความเหมาะสมกับการใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชรได้โดยที่ฟิล์มนั้นยังคงสภาพความเป็นฟิล์มเพชรดั้งเดิม

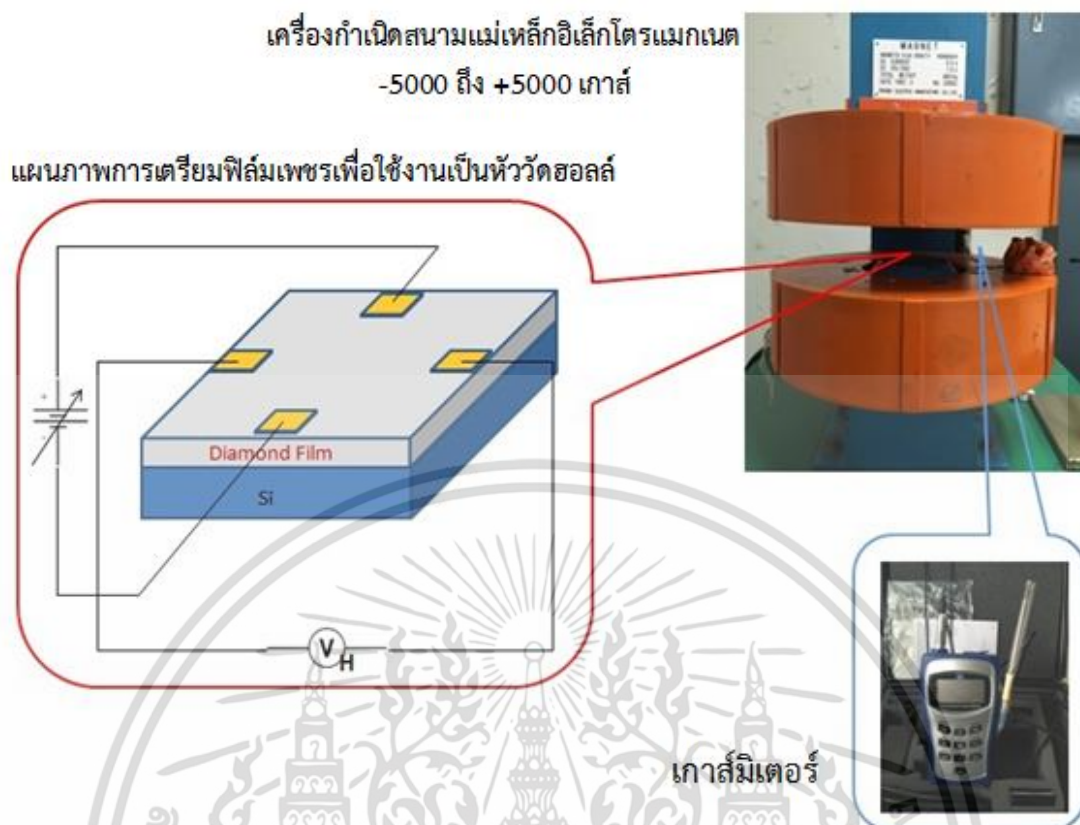


รูปที่ 4.9 กราฟจากเครื่อง Raman Spectroscope ของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน อุณหภูมิฐานรองขณะทำการแอนนัล 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที

#### 4.6 การทดสอบการตอบสนองของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีและชนิดเอ็นต่อสนามแม่เหล็ก

จากกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเพื่อใช้งานเป็นหัววัดฮอลล์ งานวิจัยนี้ได้นำฟิล์มเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น ที่เวลาการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง และได้ทำการแอนนัลเป็นภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน อุณหภูมิฐานรองขณะทำการแอนนัล 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที ได้ความหนาของฟิล์มประมาณ 100  $\mu\text{m}$  มาทำการตรวจสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กนอกจากนั้นวิธีการตรวจสอบนี้ยังสามารถบอกถึงพาหะส่วนใหญ่ของฟิล์มได้อีกด้วย โดยทำการต่อรูปแบบวงจรวัดจากรูปที่ 3.10 ที่แสดงในบทที่ 3 จากนั้นนำหัววัดฮอลล์ที่สร้างด้วยฟิล์มเพชรมาทำการติดตั้งเพื่อทำการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กอเล็กโตรแมกเนตดังรูปที่ 3.9 ในบทที่ 3 วางตัวหัววัดในแนวตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ -5,000 ถึง +5,000 เกาส์ ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.10

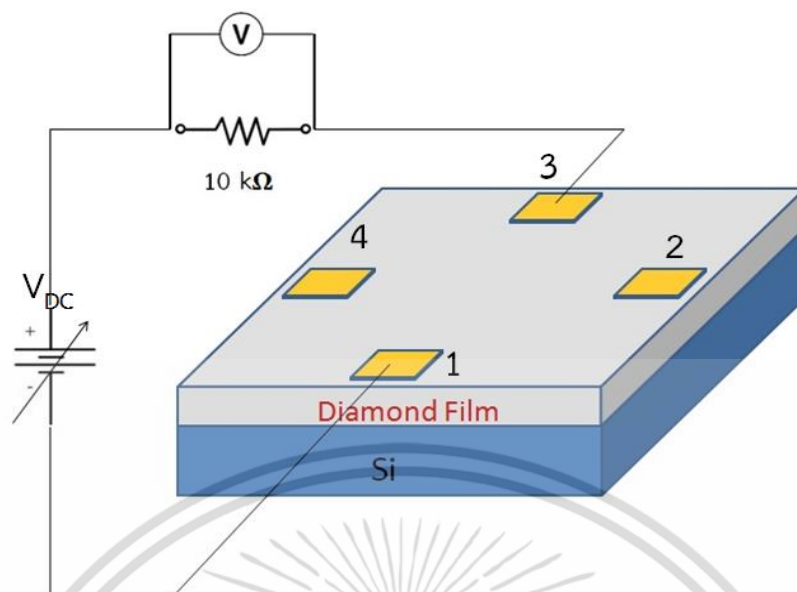
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แผนผังการเตรียมการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

ก่อนที่จะทำการทดสอบการตอบสนองของหัววัดฮอลล์ต่อสนามแม่เหล็กจำเป็นต้องตรวจสอบบริเวณขั้วของหัววัดฮอลล์ว่าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกหรือไม่ เพื่อไม่ให้เกิดแรงดันตกคร่อมระหว่างรอยสัมผัส ซึ่งจะส่งผลต่อการวัดค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก การวัดความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกนั้นจะทำการต่อวงจรในการวัดดังรูปที่ 4.11 โดยใช้ตัวต้านทาน 10 กิโลโอห์มมาต่ออนุกรมกับวงจร ทำการวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างตัวต้านทานเพื่อนำไปคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าภายในวงจรซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าเท่ากับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัววัดฮอลล์เพชร เนื่องจากเป็นวงจรอนุกรม และนำค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ได้ลบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรซึ่งค่าที่ได้คือค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมหัววัดฮอลล์เพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



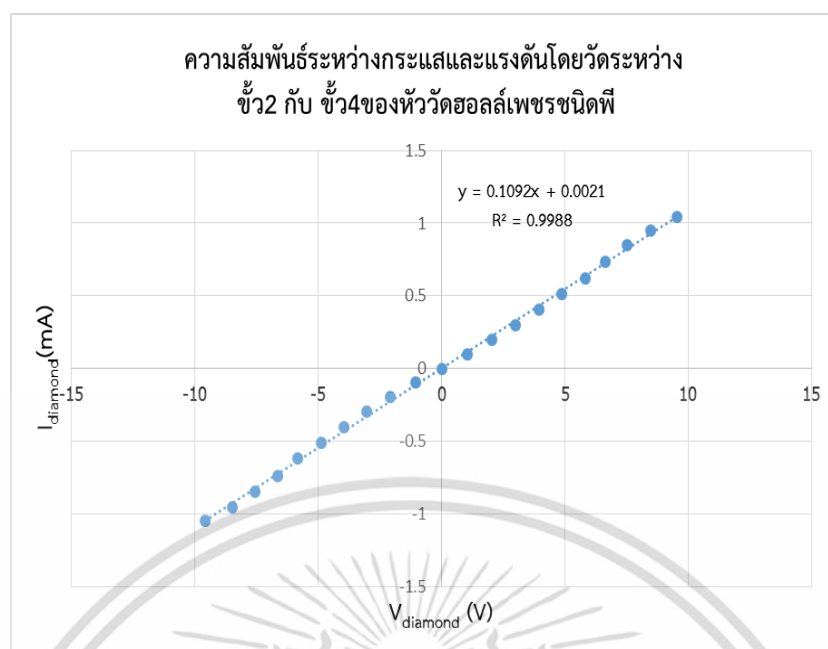
รูปที่ 4.11 วงจรวัดความเป็นโอห์มมิคของขั้วหัววัดฮอลล์เพชร

ทำการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคระหว่างขั้วทั้งสี่ของหัววัดฮอลล์เพชรทั้งชนิดพี และชนิดเอ็น โดยทดสอบระหว่างขั้ว 1 กับ 3 (ทดสอบระหว่างขั้วที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) และขั้ว 2 กับ 4 (ทดสอบระหว่างขั้วที่ให้กระแสไฟฟ้า) จากนั้นจึงทำการพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัววัดฮอลล์เพชรกับแรงดันที่ตกคร่อมหัววัดฮอลล์เพชร จากกราฟสามารถหาค่าความต้านทานของหัววัดฮอลล์เพชรนั้นได้จากส่วนกลับของความชันกราฟ โดยผลการทดสอบของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีจะแสดงข้อมูลในการวัดดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัววัดฮอลล์เพชรกับแรงดันที่ตกคร่อมหัววัดฮอลล์เพชรแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 และผลการทดสอบของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็นจะแสดงข้อมูลในการวัดดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัววัดฮอลล์เพชรกับแรงดันที่ตกคร่อมหัววัดฮอลล์เพชรดังรูปที่ 4.14 และ 4.15

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4  
(ขาที่ให้กระแสไฟฟ้า) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี

$V_{dc}$ (V)	$V_R$ (V)	$I_{diamond}=V_R/R$ (mA)	$V_{diamond}=V_{dc}-V_R$ (V)
-20	-10.431	-1.0431	-9.569
-18	-9.503	-0.9503	-8.497
-16	-8.45	-0.845	-7.55
-14	-7.362	-0.7362	-6.638
-12	-6.161	-0.6161	-5.839
-10	-5.124	-0.5124	-4.876
-8	-4.03	-0.403	-3.97
-6	-2.971	-0.2971	-3.029
-4	-1.933	-0.1933	-2.067
-2	-0.931	-0.0931	-1.069
0	0	0	0
2	0.952	0.0952	1.048
4	1.955	0.1955	2.045
6	2.992	0.2992	3.008
8	4.052	0.4052	3.948
10	5.148	0.5148	4.852
12	6.184	0.6184	5.816
14	7.38	0.738	6.62
16	8.472	0.8472	7.528
18	9.524	0.9524	8.476
20	10.452	1.0452	9.548

นำข้อมูลในตารางที่ 4.5 ซึ่งได้จากการวัดความเป็นโอห์มมิคของขั้วสัมผัสของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีและแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี เพื่อนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4.12



**รูปที่ 4.12** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4 (ขาที่ให้กระแสไฟฟ้า) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี

จากนั้นจึงทำการวัดเช่นเดิมแต่เปลี่ยนขั้วที่ทำกรวัด โดยทำการวัดระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3 (ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3 (ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) ของหัววัดฮอลล์ชนิดพี แสดงผลดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.13

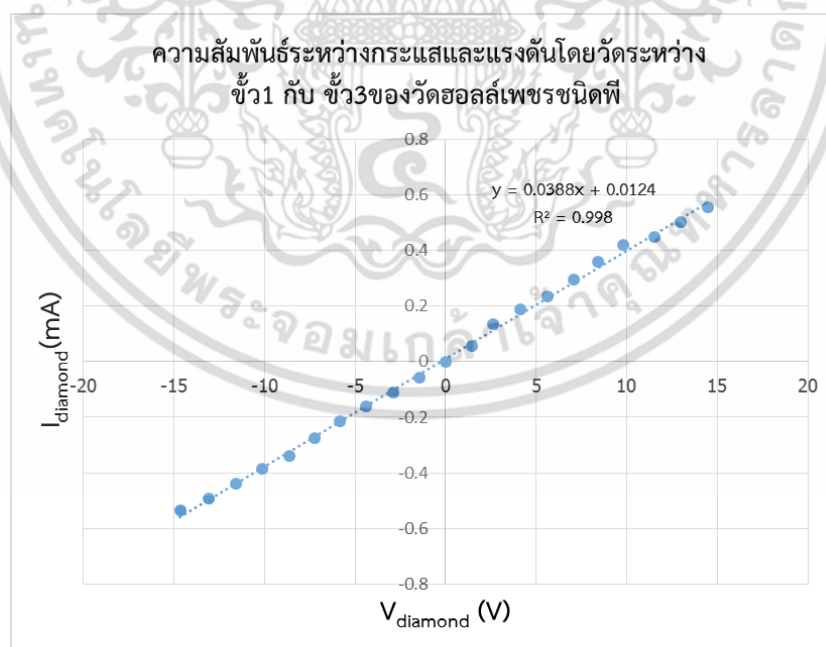
**ตารางที่ 4.6** ผลการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3 (ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี

$V_{\text{dc}} \text{ (V)}$	$V_{\text{R}} \text{ (V)}$	$I_{\text{diamond}} = V_{\text{R}} / R \text{ (mA)}$	$V_{\text{diamond}} = V_{\text{dc}} - V_{\text{R}} \text{ (V)}$
-20	-5.342	-0.5342	-14.658
-18	-4.921	-0.4921	-13.079
-16	-4.402	-0.4402	-11.598
-14	-3.871	-0.3871	-10.129
-12	-3.374	-0.3374	-8.626
-10	-2.748	-0.2748	-7.252
-8	-2.152	-0.2152	-5.848

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

-6	-1.602	-0.1602	-4.398
-4	-1.095	-0.1095	-2.905
-2	-0.572	-0.0572	-1.428
0	0	0	0
2	0.552	0.0552	1.448
4	1.355	0.1355	2.645
6	1.892	0.1892	4.108
8	2.352	0.2352	5.648
10	2.948	0.2948	7.052
12	3.584	0.3584	8.416
14	4.201	0.4201	9.799
16	4.492	0.4492	11.508
18	5.024	0.5024	12.976
20	5.552	0.5552	14.448



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3

(ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

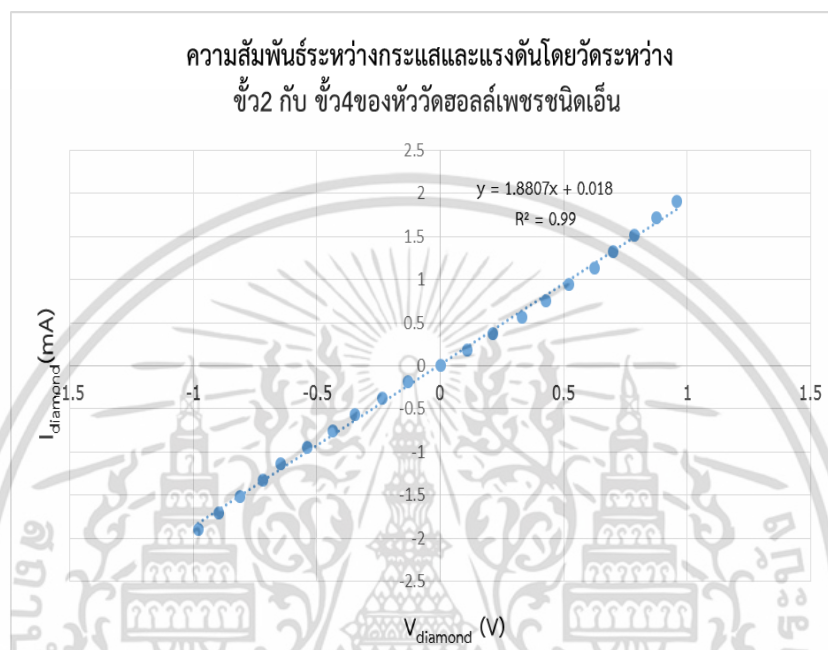
จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 สามารถบอกได้ว่าช่วงสี่ขั้วของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกเนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันมีลักษณะเป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก และยังสามารถหาความต้านทานของหัววัดฮอลล์เพชรได้โดยความต้านทานของหัววัดฮอลล์เพชรมีค่าเป็นส่วนกลับของความชันของกราฟทั้งสองซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.1575 k $\Omega$  และ 25.7732 k $\Omega$  ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการวัดเช่นเดียวกันกับหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4 (ขาที่ให้กระแสไฟฟ้า) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น

$V_{dc}$ (V)	$V_R$ (V)	$I_{diamond}=V_R/R$ (mA)	$V_{diamond}=V_{dc}-V_R$ (V)
-20	-19.02	-1.902	-0.98
-18	-17.104	-1.7104	-0.896
-16	-15.19	-1.519	-0.81
-14	-13.281	-1.3281	-0.719
-12	-11.352	-1.1352	-0.648
-10	-9.46	-0.946	-0.54
-8	-7.563	-0.7563	-0.437
-6	-5.655	-0.5655	-0.345
-4	-3.764	-0.3764	-0.236
-2	-1.87	-0.187	-0.13
0	0	0	0
2	1.892	0.1892	0.108
4	3.786	0.3786	0.214
6	5.667	0.5667	0.333
8	7.571	0.7571	0.429
10	9.48	0.948	0.52
12	11.375	1.1375	0.625
14	13.301	1.3301	0.699
16	15.212	1.5212	0.788
18	17.123	1.7123	0.877
20	19.043	1.9043	0.957

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำข้อมูลในตารางที่ 4.7 ซึ่งได้จากการวัดความเป็นโอห์มมิคของขั้วสัมผัสของหัววัดฮอลล์ เพชรชนิดเอ็นระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมหัววัดฮอลล์ เพชรชนิดเอ็นและแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น เพื่อนำไปพล็อตกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 4 (ขาที่ให้กระแสไฟฟ้า) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น

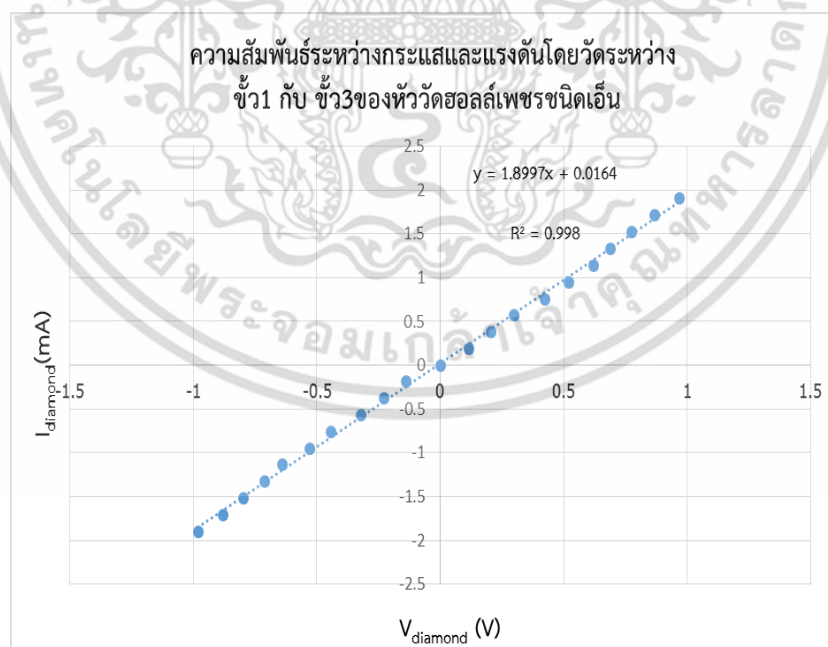
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3 (ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น

$V_{dc}$ (V)	$V_R$ (V)	$I_{diamond} = V_R/R$ (mA)	$V_{diamond} = V_{dc} - V_R$ (V)
-20	-19.02	-1.902	-0.98
-18	-17.12	-1.712	-0.88
-16	-15.202	-1.5202	-0.798
-14	-13.29	-1.329	-0.71
-12	-11.36	-1.136	-0.64
-10	-9.47	-0.947	-0.53
-8	-7.557	-0.7557	-0.443

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

-6	-5.679	-0.5679	-0.321
-4	-3.772	-0.3772	-0.228
-2	-1.863	-0.1863	-0.137
0	0	0	0
2	1.882	0.1873	0.118
4	3.794	0.3794	0.206
6	5.7001	0.57001	0.2999
8	7.576	0.7569	0.424
10	9.478	0.9475	0.522
12	11.379	1.1374	0.621
14	13.312	1.3312	0.688
16	15.223	1.5223	0.777
18	17.131	1.7131	0.869
20	19.031	1.9031	0.969



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันระหว่างขั้ว 1 กับขั้ว 3

(ขาที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลล์) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น

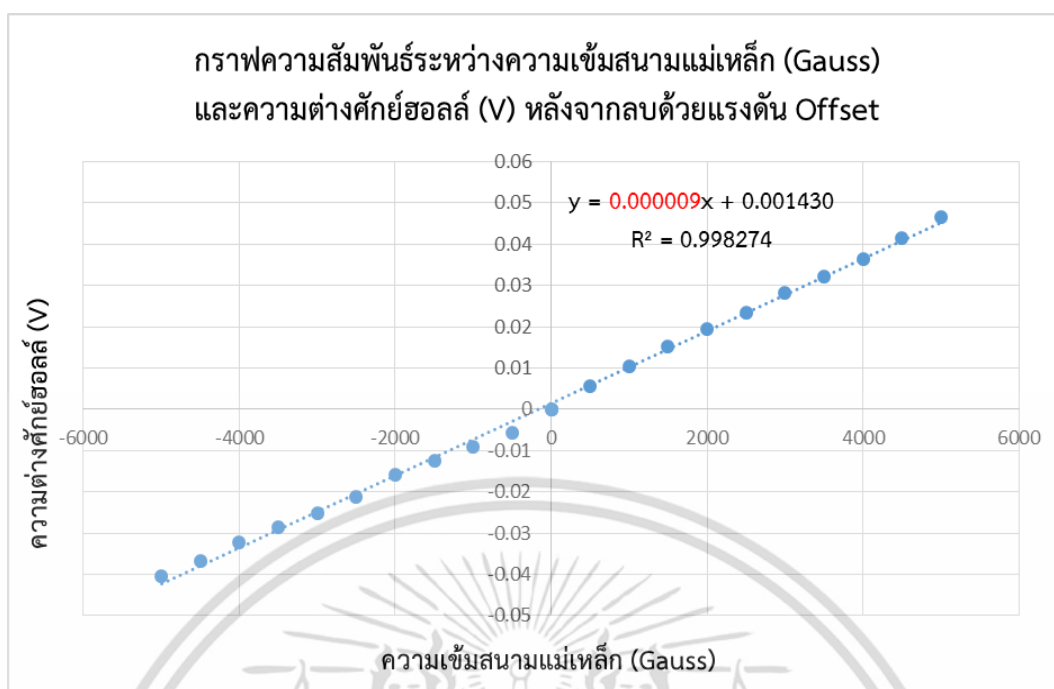
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 สามารถบอกได้ว่าช่วงสี่ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็นเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกเนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันมีลักษณะเป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก และยังสามารถหาความต้านทานของหัววัดฮอลล์เพชรได้โดยความต้านทานของหัววัดฮอลล์เพชรมีค่าเป็นส่วนกลับของความชันของกราฟทั้งสองซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.532 \text{ k}\Omega$  และ  $0.526 \text{ k}\Omega$  ตามลำดับ

เมื่อตรวจสอบขั้วของหัววัดฮอลล์เพชรทั้งสองชนิดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองแล้วจึงทำการเริ่มต้นทำการทดลองจากการให้กระแสกับหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี 2.5 มิลลิแอมแปร์ จากนั้นจึงเริ่มทำการให้สนามแม่เหล็กโดยเริ่มต้นจาก 0 ซึ่งค่าความต่างศักย์ฮอลล์ที่วัดได้คือค่าแรงดันออฟเซต และเริ่มให้สนามแม่เหล็กตั้งแต่ -5,000 ถึง +5,000 เกาส์ ทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกับความต่างศักย์ฮอลล์ที่ลบด้วยค่าแรงดันออฟเซตเป็นที่เรียบร้อยแล้ว แสดงผลการทดลองของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีตามตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.16 และแสดงผลการทดลองของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็นตามตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.9 ผลของการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี

B (Gauss)	$V_H$ (V)	$V_H - V_{\text{offset}}$ (V)	B (Gauss)	$V_H$ (V)	$V_H - V_{\text{offset}}$ (V)
0	0.0293	0	0	-0.0302	0
500	0.0350	0.0056	-500	-0.0358	-0.0056
1000	0.0398	0.0104	-1000	-0.0393	-0.0091
1500	0.0445	0.0152	-1500	-0.0425	-0.0123
2000	0.0488	0.0195	-2000	-0.0460	-0.0158
2500	0.0528	0.0235	-2500	-0.0514	-0.0212
3000	0.0574	0.0281	-3000	-0.0555	-0.0253
3500	0.0614	0.0321	-3500	-0.0589	-0.0287
4000	0.0658	0.0365	-4000	-0.0626	-0.0324
4500	0.0707	0.0414	-4500	-0.0669	-0.0367
5000	0.0759	0.0466	-5000	-0.0707	-0.0405



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (Gauss) และความต่างศักย์ฮอลล์ (V) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี

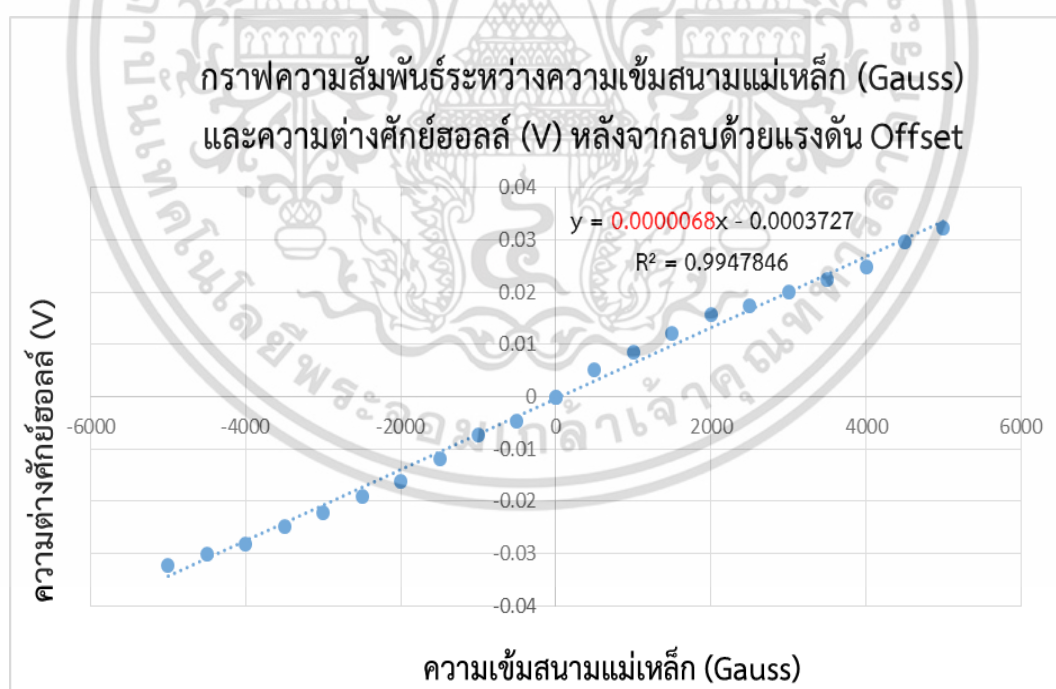
จากข้อมูลในตารางที่ 4.9 ที่ได้จากการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี โดยให้ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ -5,000 เกาส์ จนถึง +5,000 เกาส์ ในการทดสอบ แล้วจึงนำข้อมูลจากตารางที่ 4.9 มาพล็อตกราฟแสดงดังรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (Gauss) และค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี จากรูปที่ 4.16 พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และเมื่อคำนวณหาค่าความชันของกราฟนั้นจะบอกถึงความไวในการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.000009 V/Gauss และสามารถนำข้อมูลที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะส่วนใหญ่ในชนิดสารได้ ซึ่งกรณีหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีมีพาหะส่วนใหญ่คือ โฮล เมื่อคำนวณตามสมการที่ 2.14 ในบทที่ 2 จะมีค่าความหนาแน่นของโฮลเท่ากับ  $1.4962 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  จากสมการที่ 2.15 สามารถคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.526 \times 10^2 \text{ } \Omega\text{-cm}$  นำค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองไปทำการคำนวณหาค่าสภาพคล่องของพาหะตามสมการที่ 2.17 ผลที่ได้มีค่าเท่ากับ  $27.37 \text{ cm}^2/\text{V}\text{-sec}$ .

ทำการทดสอบผลการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น เช่นเดียวกับการทดสอบหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลของการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น

B (Gauss)	$V_H$ (V)	$V_H - V_{\text{offset}}$ (V)	B (Gauss)	$V_H$ (V)	$V_H - V_{\text{offset}}$ (V)
0	-0.3775	0	0	-0.3706	0
500	-0.3723	0.0052	-500	-0.3752	-0.0046
1000	-0.3689	0.0086	-1000	-0.3780	-0.0074
1500	-0.3654	0.0121	-1500	-0.3825	-0.0119
2000	-0.3618	0.0157	-2000	-0.3867	-0.0162
2500	-0.36	0.0175	-2500	-0.3896	-0.0190
3000	-0.3573	0.0202	-3000	-0.3927	-0.0222
3500	-0.3550	0.0225	-3500	-0.3955	-0.0249
4000	-0.3525	0.0250	-4000	-0.3987	-0.0282
4500	-0.3479	0.0296	-4500	-0.4006	-0.03
5000	-0.3452	0.0322	-5000	-0.4029	-0.0323



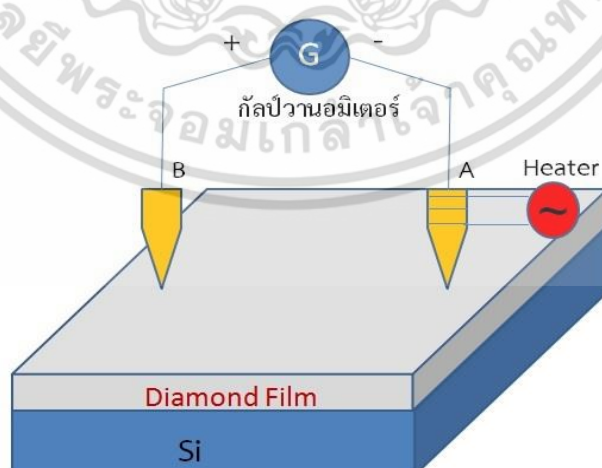
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (Gauss) และความต่างศักย์ฮอลล์ (V) ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการทดสอบหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็นเป็นที่เรียบร้อยแล้วนำข้อมูลที่ได้จากการวัดแสดงดังตารางที่ 4.10 มาทำการพล็อตกราฟระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (Gauss) และความต่างศักย์ฮอลล์ (V) ซึ่งจะพบว่ากราฟที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น จากสมการเส้นตรงสามารถคำนวณหาค่าความชันของกราฟนี้ได้ โดยค่าความชันก็คือค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดเอ็นนั่นเอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.0000068 \text{ V/Gauss}$  จากการคำนวณตามสมการที่ 2.14 จะให้ความหนาแน่นของพาหะส่วนใหญ่ในชั้นสาร ในที่นี้เป็นหัววัดฮอลล์ชนิดเอ็น พาหะส่วนใหญ่จึงเป็น อิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.821 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  จากนั้นจึงคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสมการที่ 2.15 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $5.32 \text{ } \Omega\text{-cm}$  จากการคำนวณได้ค่าที่สำคัญทั้งสองเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสภาพคล่องของพาหะจากสมการที่ 2.17 จะได้ค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $645.15 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ .

#### 4.7 การวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ด้วยวิธีเข็มร้อน

หลังจากสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ผ่านการเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นและชนิดพี ด้วยวิธี HFCVDเป็นที่เรียบร้อยแล้ว เพื่อการนำไปใช้งานให้ถูกชนิดและจำแนกฟิล์มที่ได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีหรือชนิดเอ็น การทดสอบหาชนิดการนำไฟฟ้าของพาหะส่วนใหญ่ในชั้นสารนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องระบุให้ชัดเจนว่าเป็นฟิล์มเพชรชนิดใด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ไปทำการวิเคราะห์หาชนิด ความนำไฟฟ้าของฟิล์ม ด้วยวิธี เข็มร้อน ดังรูปที่แสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.18 วิธีการหาชนิดของพาหะในการนำกระแสไฟฟ้าของฟิล์มเพชรด้วยวิธี เข็มร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.1 การตรวจสอบฟิล์มเพชร ชนิดพี

เริ่มจากการนำฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือโบรอน ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ชนิดพี มาทดสอบ ซึ่งผลการทดลองที่ได้หลังจากให้ความร้อนกับเข็มร้อน ปรากฏว่า เข็มของกัลป์วานอ มิเตอร์ ชี้เอนไปทางด้านบวก แสดงให้เห็นว่า พาหะหลักในการนำกระแสของฟิล์มเพชร ที่ทำการ วัด คือ โฮล จึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่า ฟิล์มเพชร ที่สร้างได้มีคุณสมบัติ เป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี

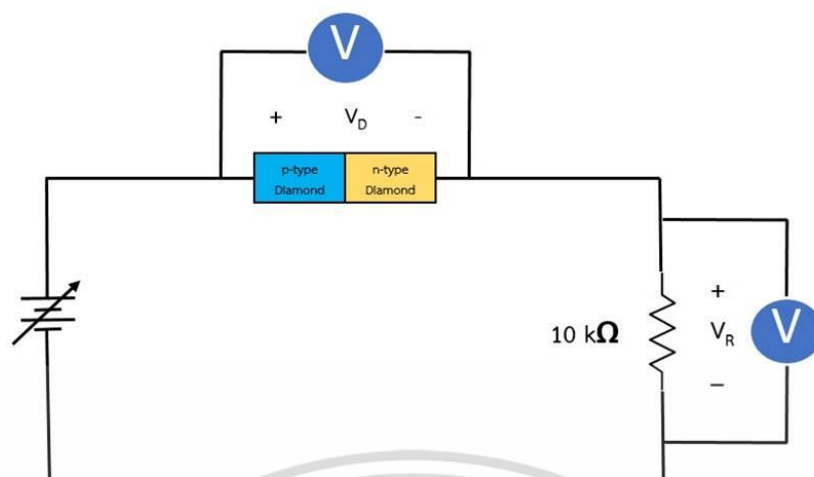
#### 4.7.2 การตรวจสอบฟิล์มเพชร ชนิดเอ็น

ทำการทดสอบเช่นเดียวกันกับการตรวจสอบฟิล์มเพชรชนิดพี โดยการนำฟิล์มเพชรชนิดเอ็น ที่สังเคราะห์ได้ในหัวข้อกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นมาทดสอบ พบว่าเข็มของกัลป์วานอ มิเตอร์ ชี้ไปทางด้านลบ ซึ่งแสดงว่าพาหะหลักในการนำกระแสของฟิล์มเพชร ที่ทำการวัด คือ อิเล็กตรอน จึงยืนยันได้ว่า ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น

### 4.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชร

หลังจากการสร้างรอยต่อพีเอ็นจากฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD ลงบน ฐานรองซิลิกอน ใช้อุณหภูมิฐานรองขณะการสังเคราะห์ 750 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการสร้าง ดังรูปที่ 3.13 ในบทที่ 3 ซึ่งแต่ละชั้นของฟิล์มเพชรใช้เวลาในการสังเคราะห์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ ทำการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน อุณหภูมิฐานรอง 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที เมื่อเสร็จกระบวนการสร้างแล้วนำรอยต่อพีเอ็นเพชรที่ได้มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งใช้วงจรใน การทดสอบคุณสมบัติดังรูปที่ 4.19 ทำการทดสอบทั้งไบอัสตรง และไบอัสย้อนกลับ ให้กับรอยต่อพี เอ็นเพชร โดยใช้ตัวต้านทานขนาด  $10\text{ k}\Omega$  มาทำการต่ออนุกรมกับตัวรอยต่อพีเอ็นเพชร วัดความต่าง ศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานและรอยต่อพีเอ็นเพชร นำค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานมา คำนวณหากระแสจากทฤษฎีของโอห์ม วงจรนี้เป็นวงจรอนุกรมดังนั้นจึงมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์ เท่ากันทั้งวงจร เช่นนั้นกระแสที่คำนวณได้จึงมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็นเพชร นำ ค่ากระแสและแรงดันของรอยต่อพีเอ็นเพชรที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและ แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

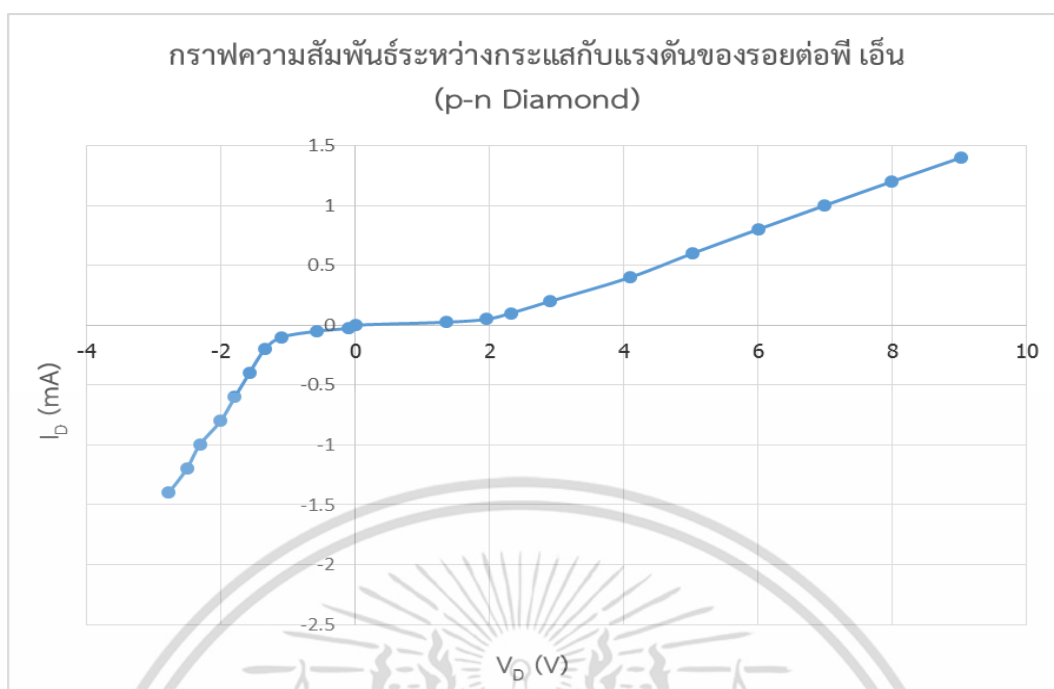


รูปที่ 4.19 วงจรที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชร

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชร

ไบอัสตรง			ไบอัสย้อนกลับ		
$V_R$ (V)	$V_D$ (V)	$I_D$ (mA)	$V_R$ (V)	$V_D$ (V)	$I_D$ (mA)
0	0	0	0	0	0
0.25	1.35	0.025	-0.25	-0.098	-0.025
0.5	1.95	0.05	-0.5	-0.578	-0.05
1	2.311	0.1	-1	-1.098	-0.1
2	2.902	0.2	-2	-1.349	-0.2
4	4.092	0.4	-4	-1.581	-0.4
6	5.02	0.6	-6	-1.798	-0.6
8	5.997	0.8	-8	-2.01	-0.8
10	6.989	1	-10	-2.321	-1
12	7.992	1.2	-12	-2.514	-1.2
14	9.023	1.4	-14	-2.783	-1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชร

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชรที่สร้างได้มีลักษณะใกล้เคียงกับแบ็กเวิร์ดไดโอด (backward diode) และเมื่อพิจารณาลักษณะของกราฟขณะให้ไบอัสตรงพบว่ามีความแรงดันภายใน (built in voltage:  $V_{bi}$ ) เท่ากับ 1.95 V

โดยธรรมชาติเพชรมีสภาพต้านทานไฟฟ้า  $10^{16} \Omega\text{-cm}$  โดยมีสภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอน และสภาพคล่องตัวของโฮลเป็น 2,000 และ  $1,800 \text{ cm}^2/\text{V}\text{-sec}$ . ตามลำดับ ดังนั้นความหนาแน่นพาหะอินทรีนซิกของเพชรจึงมีค่าประมาณ  $1 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$  และจากการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสและอะตอมสารเจือโบรอนในเอททิลแอลกอฮอล์ชนิดละ 10,000 ppm สามารถคำนวณหาพาหะส่วนมากได้ โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.821 \times 10^{15}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และได้ความหนาแน่นของโฮลเท่ากับ  $1.4962 \times 10^{15}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในชั้นฟิล์มเพชรชนิดเอ็น และฟิล์มเพชรชนิดพีตามลำดับ เราจึงสามารถคำนวณหาความแรงดันภายใน ( $V_{bi}$ ) ได้จากสมการที่ 2.1 แสดงในบทที่ 2 ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 1.934 V และเมื่อนำไปเทียบกับค่าแรงดันภายในที่ได้จากการทดลองจะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน จากผลดังกล่าวทำให้เห็นถึงแนวโน้มความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD เพื่อใช้งานเป็นรอยต่อพีเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยเริ่มจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD แล้วจึงนำฟิล์มเพชรที่ได้ไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า และใช้งานเป็นหัววัดฮอลล์ ซึ่งจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD การเติมอะตอมสารเจือชนิดพีและเอ็นลงไปในเอทิลแอลกอฮอล์ โดยใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นฐานรอง ภายใต้เงื่อนไขในการสังเคราะห์ที่เหมาะสม ได้แก่ ให้อุณหภูมิฐานรองที่ 600 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส โดยพบว่า ที่อุณหภูมิฐานรองเป็น 750 องศาเซลเซียส ฟิล์มเพชรที่ได้มีระนาบ (111) ที่อุณหภูมิฐานรองเป็น 850 องศาเซลเซียส ฟิล์มเพชรที่ได้มีระนาบ (111) และ (100) หรือที่เรียกว่าระนาบผสม ที่อุณหภูมิฐานรองเป็น 950 ฟิล์มเพชรที่ได้มีระนาบ (100) แต่ฟิล์มเพชรที่ได้มานั้นตรวจสอบพบความไม่สมบูรณ์ของผลึกไม่ว่าจะเป็น ฟิล์มที่มีเขม่าหรือแกรไฟต์ปนอยู่ และพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงฟิล์มด้วยวิธี แอนนิล ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกที่สุดสำหรับการปรับปรุง แต่ต้องทำการปรับปรุงภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม เมื่อทำการปรับปรุงฟิล์มเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำฟิล์มนั้นมาทำการตรวจยืนยันความสมบูรณ์ของฟิล์มด้วยเทคนิค SEM ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าพีคของแกรไฟต์หรือสัณฐานคาร์บอนที่ปรากฏในกราฟรามานได้ลดลงอย่างชัดเจนนั้นแสดงว่ากระบวนการปรับปรุงคุณภาพฟิล์มเพชรด้วยวิธีการแอนนิลนั้นมีความเหมาะสมที่จะลดข้อบกพร่องของฟิล์มเพชร และทำการวัดชนิดของฟิล์มด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ เมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมเกี่ยวกับกระบวนการสร้างฟิล์มแล้วจึงทำการนำฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและพีมาทำการสร้างเป็นหัววัดฮอลล์ จากการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเห็นได้ชัดว่าเมื่อให้ความเข้มข้นแม่เหล็กจาก -5,000 จนถึง +5,000 เกาส์ ความต่างศักย์ฮอลล์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็นแบบเชิงเส้น จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแม่เหล็กกับความต่างศักย์ฮอลล์แสดงถึงค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดฮอลล์เพชร ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $9 \mu\text{V}/\text{Gauss}$  และ  $6.8 \mu\text{V}/\text{Gauss}$  ของหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีและชนิดเอ็นตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของพาหะส่วนใหญ่ และค่าสภาพคล่องของพาหะได้ โดยหัววัดฮอลล์เพชรชนิดพีมีความหนาแน่นของโฮลเท่ากับ  $1.4962 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  และมีสภาพคล่องของพาหะเท่ากับ  $27.37 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ . หัววัดฮอลล์

เพชรชนิดเอ็นมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $1.821 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  และมีสภาพคล่องของพาหะเท่ากับ  $645.15 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ . ดังนั้นจึงเห็นแนวโน้มถึงความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาฟิล์มเพชรเพื่อใช้งานเป็นหัววัดฮอลล์ หลังจากนั้นจึงทำการสร้างฟิล์มเพชรให้เป็นรอยต่อพีเอ็นโดยชั้นพีเติมอะตอมสารเจือของโบรอนและชั้นเอ็นเติมอะตอมสารเจือของฟอสฟอรัส ทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันหาแรงดันภายในเพื่อเทียบกับการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งจากการคำนวณตามทฤษฎีแล้วค่าแรงดันภายในของฟิล์มเพชรที่เติมอะตอมสารเจือ 10,000 ppm ทำให้ได้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.821 \times 10^{15}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และได้ความหนาแน่นของโฮลเท่ากับ  $1.4962 \times 10^{15}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในชั้นฟิล์มเพชรชนิดเอ็น และฟิล์มเพชรชนิดพีตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 300 K สามารถคำนวณค่าแรงดันภายในได้ประมาณ 1.934 V ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแรงดันภายในที่ได้จากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็นเพชร คือ ประมาณ 1.95 V ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความเป็นไปได้ที่จะสร้างและพัฒนาระบบการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเพื่อใช้งานทางด้านเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 6, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [2] บัญชา กิตติรุ่งสี, นริศ จันทร์แดง, ผศ.วิสุทธิ์ ฐิตีรุ่งเรือง, รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, "ผลของอุณหภูมิฐานรองต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเพชร", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17, 2537
- [3] R.F.Davis,"Diamond Film and Coating",Noyes Publications,Park Ridge,New Jersey U.S.A,1993
- [4] ปิยชาติ สดงาม, วศิน ปัญญาเลิศ และวิสุทธิ์ ฐิตีรุ่งเรือง. "การสร้าง DIAMOND MESFET", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6, 2557, หน้า. 585-588
- [5] สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 4, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [6] ประภัสสร มีเคลือบ, ปิยชาติ สดงาม, วศิน ปัญญาเลิศ, ขบา สุริยาอมรานนท์, วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร, วิสุทธิ์ ฐิตีรุ่งเรือง "การสังเคราะห์ผลึกเพชรขนาดใหญ่ด้วยวิธี HFCVD SYNTHESIS OF LARGE DIAMOND CRYSTALS BY HFCVD" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ก.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า/หน่วย
ประจุอิเล็กตรอน (Electron charge)	$q$	$1.602 \times 10^{-19}$ C
มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (Rest mass of an electron)	$m_e$	$9.109 \times 10^{-31}$ kg
ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)	$k$	$1.381 \times 10^{-23}$ J/K
		$8.617 \times 10^{-5}$ eV/K
ค่าคงที่ริทชาร์ดสัน (Richardson's constant)	$R$	$110 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ (n-Si)
ค่าเปอร์มิตติวิตี้ในสุญญากาศ (Permittivity of free space)	$\epsilon_0$	$8.85 \times 10^{-14}$ F/cm
ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของซิลิคอน (Dielectric constant of Silicon)	$\epsilon_s$	11.8 $1.04 \times 10^{-12}$ F/cm
ความหนาแน่นอินทรินซิกของซิลิคอนที่ 300 K	$n_i$	$1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] วศิน ปัญญาเลิศ, ปิยชาติ สดงาม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, “การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยวิธีการ HFCVD เพื่อการใช้งานเป็นรอยต่อ p-n”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6, 2557, หน้า. 593-596



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมนักวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล **ครั้งที่ ๖**

6<sup>th</sup> Electrical Engineering Network 2014  
of Rajamangala University of Technology Conference

นวัตกรรมวิจัยแห่งเทคโนโลยี ตอบสนองเออีซีด้านโครงข่ายพลังงาน  
Technology Research Innovation for Responding  
to the Energy Network of AEC

**Volume II**

- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

๒๖ - ๒๘ มีนาคม พ.ศ. ๒๕๕๗

ณ มารีโทม์ ปาร์คแอนสปาร์ตอร์ท จังหวัดกระบี่

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014(EENET 2014)

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยวิธีการ HFCVD เพื่อการใช้งานเป็นรอยต่อ p-n  
Synthesis of Diamond Film by HFCVD for p-n Junction Application

วศิน ปัญญาเลิศ นิยชาติ สดงาม สุรศักดิ์ เนียนเจริญ และวิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
1 ซอยคลองกรุง 4 ถ.คลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์: 0-2739-0643 E-mail: mooyong\_jung@windowslive.com

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชรด้วยเทคนิค Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) เพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเชิงเพอร์ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง แต่เมื่อเติมอะตอมฟอสฟอรัสหรือโบรอนเข้าไปจะทำให้ได้ผลึกเพชรชนิดเอ็นหรือชนิดพี ตามลำดับ ซึ่งอินชันทผลการสังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง SEM, X-Ray Diffractometer, Raman Spectroscope และวิธีเข็มร้อน จากนั้น เมื่อสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็น จะพบว่ามีการรวมตัวกันของ Built-in ( $V_{bi}$ ) 3.2 โวลต์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของไดโอดนั่นเอง

Abstract

This research presents the effort to apply semiconducting diamond synthesized by Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) for electronic devices. Synthesized Diamonds are intrinsic pure quality semiconductor. By doping Phosphorus atoms or Boron atoms into the synthesis process, n-type or p-type diamond are formed respectively. To clarify the film morphologies, SEM, X-ray Diffraction, Raman Spectroscopy and Hot Probe Technique were used. After forming diamond p-n junction, it can show rectify characteristics with built in voltage 3.2 V that are diode phenomena.

Keywords : Semiconducting Diamond, HFCVD, n-type Diamond, p-type Diamond

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีความสนใจการสังเคราะห์เพชรที่สร้างออกจากระบบ CVD เป็นอย่างมาก ทั้งในกรขยายขนาด และ ทำเป็นการค้าไม่เพียงเพราะว่าอุปกรณ์ที่มีราคาถูกกว่า ต้นทุนการผลิตยังต่ำ และเพชรที่สังเคราะห์ได้ยังมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกรวมเข้าไว้ในเทคนิคการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ ซึ่งกว่านั้นเพชรยังมีช่องว่างพลังงานมากกว่าซิลิคอนถึงประมาณ 5 เท่า ทำให้สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าซิลิคอนได้มาก จึงเป็นเป้าหมายของการนำเพชรไปใช้งาน

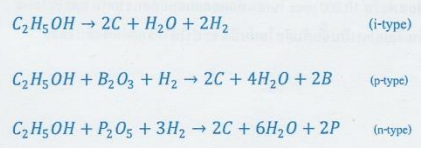
เป็นทั้งประติมากรรมที่งดงาม โดยมีปัญหาอุปสรรคที่รักษาเพชรที่แพงมาก และการสร้าง รอยต่อพี-เอ็น งานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น ด้วยเทคนิค HFCVD ซึ่งมีต้นทุนที่ถูกมาก

2. กระบวนการสร้าง

การสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ความดันต่ำ (Hot filament activation(HFCVD)) [1][2] แสดงดังแผนผังในรูปที่ 1 ซึ่งระบบนี้จะทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของแก๊สประกอบของคาร์บอนด้วยความร้อน จากไส้หลอดที่มีอุณหภูมิประมาณ 2,000 องศาเซลเซียส โดยการใช้ก๊าซไฮโดรเจนผ่านเข้าไปยังเอทิลแอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) เพื่อหาสารประกอบที่ให้แก่ใน ไส้หลอดทั้งสอง จะทำให้เกิดการแตกตัวของอะตอมคาร์บอนออกมาเป็นตัวเป็นผลึกเพชรบนฐานรองซิลิคอนที่อยู่ห่างจากไส้หลอดที่งัดตนประมาณ 2 มิลลิเมตร เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของฐานรองซิลิคอนตั้งแต่ 600-1,000 องศาเซลเซียส จะสามารถ กำหนดขนาดของผลึกเพชรได้ตามต้องการซึ่งโดยปกติแล้วสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทรอยต่อ พี-เอ็น จะใช้ระนาบ (111) เพราะพหุระนาบระนาบจะมีค่าสภาพความถี่สูงกวาระนาบอื่นๆ

นำชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เพื่อดูลักษณะระนาบผลึก จากนั้นจึงใช้เครื่อง Raman Spectroscope ยืนยันว่าเป็นผลึกเพชร และใช้เครื่อง X-ray Diffraction ยืนยันระนาบผลึก

จากเทคนิค HFCVD ดังกล่าวเราได้พัฒนา นำไปใช้สร้างรอยต่อพี-เอ็น โดยการเติมอะตอมฟอสฟอรัสเข้าไปในเอทิลแอลกอฮอล์ จะทำให้สามารถสังเคราะห์ ผลึกเพชรชนิดพีได้ ซึ่งแสดงเป็นสมการปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้

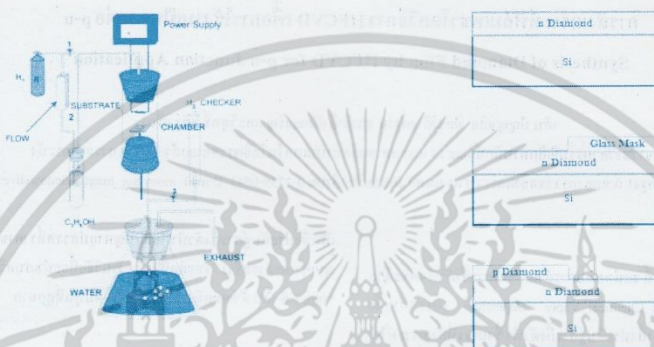


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

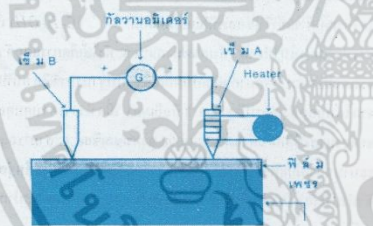
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6<sup>th</sup> conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014(EENET 2014)



รูปที่ 1 ไลอะแกรมของ Hot filament CVD (HFCVD)

ซึ่งไปกว่านั้นยังใช้การตรวจสอบชนิด (Type) ของฟิล์มเพชรด้วยวิธีเข็มร้อน (Hot Probe Technique) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังการวิเคราะห์ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์ม คิววีซี เข็มร้อน

สำหรับภาคตัดขวางแสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยต่อพี-เอ็น (p-n Junction) คิววีซี HFCVD แสดงดังรูปที่ 3 โดยใช้แผ่นซิลิคอนที่เป็นฐานรอง ขนาด  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  และใช้แผ่นกระจกเป็นหน้ากาก (Glass Mask) เพื่อแยกส่วนของฟิล์มเพชรชนิดที่ ที่เจืออะตอมโบรอน 10,000 ppm ในเอททิลแอลกอฮอล์ และฟิล์มเพชรชนิด เอ็นที่เจืออะตอมฟอสฟอรัส 10,000 ppm ในเอททิลแอลกอฮอล์ออกจากกัน และใช้โลหะอินเดียม (In) เป็นชั้นสัมผัสโอห์มมิก จะทำให้ได้รอยต่อพี-เอ็น เพชร

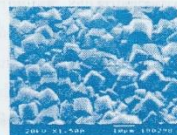
รูปที่ 3 ภาพตัดขวางของชั้นตอนการสร้าง p-n junction คิววีซี HFCVD

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM พบว่าเมื่ออุณหภูมิฐานรองอยู่ระหว่าง  $600-800 \text{ }^\circ\text{C}$  จะได้ฟิล์มประเภท (111) และถ้าอุณหภูมิฐานรองอยู่ระหว่าง  $900-1000 \text{ }^\circ\text{C}$  จะทำให้ได้ฟิล์มประเภท (100) แต่ถ้าอุณหภูมิฐานรองอยู่ระหว่าง  $800-900 \text{ }^\circ\text{C}$  ฟิล์มที่ได้จะมีทั้งประเภท (111) และประเภท (100) รวมกัน ซึ่งภาพตัดขวางจากเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4 สำหรับตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer แสดงดังรูปที่ 5 สรุปว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีประเภท (111) เป็นเด่น [3]



(ก) ระบุ 111(111) Substrate Temp. 600-800 °C Time 2hrs.



(ข) ระบุ 111(100) Substrate Temp. 900-1000 °C Time 2hrs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

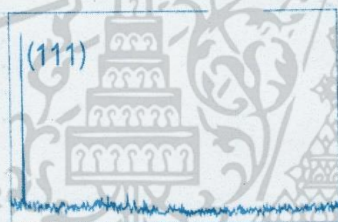
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6<sup>th</sup> conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014(EENET 2014)



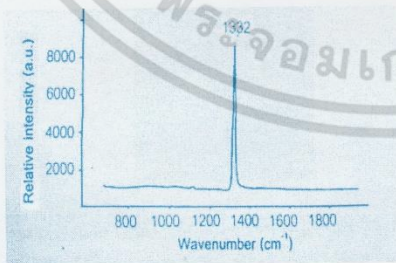
(ก) ระยะเวลา 11(111)+(100)Substrate Temp. 800-900 °C Time 2hrs.

รูปที่ 4 ภาพถ่ายที่ลิ้นเพชรที่อุณหภูมิฐานรองค่าต่างๆจาก SEM



รูปที่ 5 กราฟที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction

ส่วนผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscope แสดงค่าพีคที่ 1332  $cm^{-1}$  ดังรูปที่ 6 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 1 จะสรุปได้ว่าสารนั้นเป็นผลึกเพชรนั่นเอง[4]



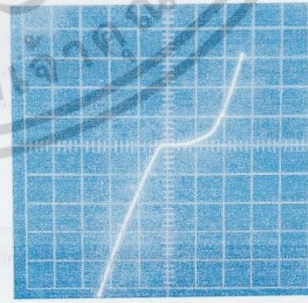
รูปที่ 6 กราฟจากการวัดด้วยเครื่อง Raman spectroscope

ตารางที่ 1 ตารางวิเคราะห์กราฟของ Raman spectroscope

ค่าพีค (cm⁻¹)	ชนิดของสาร	รายละเอียด
291.40 cm⁻¹	Si (Silicon)	พบในซิลิคอนที่เคลือบบนผิว (<math>< 0.1 \mu m</math>)
1345-1324 cm⁻¹	Diamond	เป็นผลึกเพชรที่เคลือบบนผิวแบบ 3D structure
1332 cm⁻¹	Diamond	เป็นผลึกเพชรที่เคลือบบนผิวแบบ 3D structure
1348 cm⁻¹	Diamond	เป็นผลึกเพชรที่เคลือบบนผิวแบบ 3D structure
1350 cm⁻¹	Diamond	เป็นผลึกเพชรที่เคลือบบนผิวแบบ 3D structure
1358 cm⁻¹	Diamond	เป็นผลึกเพชรที่เคลือบบนผิวแบบ 3D structure
1418 cm⁻¹	Diamond	เป็นผลึกเพชรที่เคลือบบนผิวแบบ 3D structure
2710 cm⁻¹	Diamond	เป็นผลึกเพชรที่เคลือบบนผิวแบบ 3D structure
3300 cm⁻¹	Diamond	เป็นผลึกเพชรที่เคลือบบนผิวแบบ 3D structure

จากการตรวจสอบด้วยวิธีอื่นพบว่าผลึกเพชรที่เคลือบบนผิวของอะตอมไฮโดรเจน ( $C_2H_5OH + P_2O_5$ ) จะทำให้ได้ผลึกเพชรชนิด n-type (n-type Diamond) และหากที่เคลือบด้วยอะตอมโบรอน ( $C_2H_5OH + B_2O_3$ ) จะทำให้ได้ผลึกเพชรชนิด p-type (p-type Diamond)

เมื่อข้อข้อสัมผัสโลหะอินเดียม (In) เข้าไปที่ผลึกเพชรชนิด n-type และชนิด p-type จะทำให้การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันด้วยเครื่อง X-Y Curve Tracer จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ด้วยเครื่อง X-Y Curve Tracer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6<sup>th</sup> conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014(EENET 2014)

โดยธรรมชาติเพชรมีสภาพต้านทานไฟฟ้า  $10^{16} \Omega\text{-cm}$  โดยมีสภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอน และโฮลเป็น  $2,000$  และ  $1,800 \text{ cm}^2/\text{V}\text{-s}$  ตามลำดับ[1] ดังนั้นความหนาแน่นพาหะอินทรีนจิกของเพชรจึงมีค่าประมาณ  $1 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$  นอกจากนี้เพชรจะมีค่าคงที่แถบที่  $3.55 \text{ eV}$  และใน 1 Unit Cell จะมีอะตอมคาร์บอน 8 อะตอมอีกทั้งวาเลนซ์อิเล็กตรอนของคาร์บอนมี 4 ตัว ผลึกเพชรจึงมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์  $7.16 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$

ด้วยการผสมอะตอมฟอสฟอรัสและอะตอมโบรอนในเอทิลแอลกอฮอล์ชนิดละ  $10,000 \text{ ppm}$  ทำให้ได้อิเล็กตรอนอิสระ และโฮลอิสระเป็น  $7.16 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  ในผลึกเพชรชนิดเอ็น และผลึกเพชรชนิดพี ตามลำดับ เราจึงสามารถคำนวณหาแรงดัน Built-in ( $V_{bi}$ ) ได้จาก

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

จากการคำนวณที่อุณหภูมิ  $300 \text{ K}$  จะได้ค่า  $V_{bi}$  ประมาณ  $2.74 \text{ V}$  ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้ จากการวัดการทดลองในรูปแบบที่ 7 ที่อ่านได้ประมาณ  $2.8 \text{ V}$

**4. สรุปผลการทดลอง**

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเราสามารถสร้างสารกึ่งตัวนำเพชรทั้งชนิด n-type และ p-type ได้จากเอทิลแอลกอฮอล์ โดยที่เมื่อเจือโบรอนลงไปจะทำให้ได้ฟิล์มเพชรชนิด p-type และเมื่อเจือฟอสฟอรัสจะได้ฟิล์มเพชรชนิด n-type ซึ่งสามารถตรวจสอบด้วย SEM, Raman Spectroscopy, X-Ray Diffraction และทำการตรวจสอบชนิดของฟิล์มเพชรด้วยวิธีอื่นพร้อมได้ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างรอยต่อ p-n junction ได้ และมีคุณสมบัติ rectify ด้วย โดยเมื่อให้ไบอัสตรงจะมี  $V_{bi}$  เท่ากับ  $2.8$  โวลต์ แต่ค่า Breakdown Voltage คำนวณโดยมีกระแสรั่วไหลสูงจึงจะต้องมีการพัฒนาต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

[1] นริศ จันทร์แดง, "การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเพชร ",(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง), หน้า 70-74  
 [2] บัญชา กิตติรังสี, "การศึกษาและพัฒนาไดโอดฟิล์มเพชรแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ",(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง), หน้า 70-72

[3] บัญชา กิตติรังสี,นริศ จันทร์แดง,เดิณพงษ์ เพ็ชรกุล,สมศักดิ์ เชื้อศรีศิริถน,ศศวิสุทธิ จูติรุ่งเรือง,รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช,"ผลของอุณหภูมิฐานรองต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มเพชร",ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17, พ.ศ. 2557

[4] R.F.Davis,"Diamond Film and Coating",Noyes Publications,Park Ridge,New Jersey U.S.A,1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

