

คุณสมบัติทางไฟฟ้าและข้อสัมผัสโลหะของฟิล์มเพชร
ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Combustion Activation CVD

ELECTRICAL PROPERTIES AND METAL CONTACT OF DIAMOND FILM
SYNTHESIZED BY COMBUSTION ACTIVATION CVD METHOD

นาวิน outhaivatnanon
NAWIN OUTHAIVATNANON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-9546-85-7

34

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คุณสมบัติทางไฟฟ้าและข้อสัมผัสโลหะของฟิล์มเพชร
ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Combustion Activation CVD

ELECTRICAL PROPERTIES AND METAL CONTACT OF DIAMOND FILM
SYNTHESIZED BY COMBUSTION ACTIVATION CVD METHOD

นาวิน outhaivatnanon
NAWIN OUTHAIVATNANON

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 47904
วัน, เดือน, ปี 25 ส.ค. 2546

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2545

ISBN 974-9546-85-7

**ELECTRICAL PROPERTIES AND METAL CONTACT OF DIAMOND FILM
SYNTHESIZED BY COMBUSTION ACTIVATION CVD METHOD**

NAWIN OUTHAIVATNANON

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

2002

ISBN 974-9546-85-7

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติทางไฟฟ้าและข้อสัมผัสโลหะของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Combustion Activation CVD
นักศึกษา	นายนาวิน อุทัยวัฒนานนท์
รหัสประจำตัว	40061054
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

เพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของ Carbon ซึ่งมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เพชรถูกคาดหวังในการนำไปใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต กระบวนการที่สังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยวิธีการ Combustion Activation เป็นวิธีที่คิดค้นขึ้นใหม่ สามารถที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำ อุปกรณ์มีราคาถูกและจัดหาได้ง่าย ซึ่งเป็นวิธีการที่น่าสนใจทั้งทางงานวิจัยและการค้า แต่อย่างไรก็ตามวิธีการ Combustion Activation CVD ยังคงสามารถสังเคราะห์เพชรชนิดอินทรินซิก(Intrinsic) เท่านั้น โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ Combustion Activation CVD ได้แก่ ค่าความต้านทานไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้า คุณสมบัติรอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร และผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น จากค่าคุณสมบัติเหล่านี้นำไปสู่ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่สนใจและอาจเป็นพื้นฐานสำหรับกระบวนการในห้องปฏิบัติการต่อไป และคุณสมบัติเหล่านี้เองที่ทำให้สามารถนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากวิธี Combustion Activation CVD มาประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ Passive เบื้องต้น เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ เป็นต้น ซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนต่อไป

Thesis Title	Electrical Properties and Application of Diamond Film Synthesized by Combustion Activation CVD Method
Student	Mr. Nawin Outhaivatnanon
Student ID	40061054
Degree	Master of Engineering in Electrical Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

Diamond is one of carbon structures that has a lot of interesting properties. From these properties, diamond is expected to be used as future electronic devices. Now there are a number processes to synthesize diamond in low pressure system. Combustion Activation CVD is a new proceed. It can synthesize diamond at low pressure, low cost and easily procurement. This process is interesting for research and commercial. However Combustion Activation CVD can synthesize only intrinsic diamond type. This thesis studied the electrically properties of intrinsic diamond type synthesized by combustion activation CVD, such as resistance, capacitance and electronic properties between metal and diamond. The results of temperature affecting electrical properties were also studied. The coefficient obtained from this thesis can be used as a basic of laboratory uses. Diamond synthesized from the combustion activation CVD can be applied for electronic devices and showed a trend to apply on next completely electronic devices.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับแนวความคิด การแก้ไขปัญหาและสนับสนุนงานวิจัยนี้มาด้วยดี ขอขอบพระคุณ คุณจรรยา นามเสนาะ เป็นอย่างสูง ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์มาตลอด ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ขอขอบคุณกำลังใจ ความห่วงใยจากเพื่อน ๆ มหาลัยศิลปากรและขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ ห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้าที่ยอดทุกท่านที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือตลอดมา ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากมูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ทุนงบประมาณเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้มาด้วยดี และขอขอบคุณ บริษัท ฮานาอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ในการใช้อุปกรณ์วัดผลการทดลอง

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด

นาวิน อุทัยวัฒนานนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XIII
ศัพท์เทคนิค.....	XV
คำนำ.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 เพชรและรูปแบบต่างๆ ของคาร์บอน.....	1
1.1.1 Diamond.....	1
1.1.2 Graphite.....	3
1.1.3 Amorphous Carbon.....	3
1.1.4 Microcrystalline Carbon.....	4
1.2 คุณสมบัติต่างๆของเพชร.....	4
1.2.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	5
1.2.2 คุณสมบัติทางแสง.....	5
1.2.3 คุณสมบัติเชิงกล.....	5
1.2.4 คุณสมบัติทางอะคูสติก.....	6
1.2.5 คุณสมบัติในการตอบสนองการแผ่รังสี.....	6
1.2.6 คุณสมบัติทางอุณหภูมิจ.....	6
1.2.7 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์.....	7
1.2.8 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	9
2.1 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.1 อะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน.....	10
2.1.2 การกระตุ้นก๊าซเพื่อให้เกิดอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน.....	11
2.1.3 อุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสม.....	11
2.1.4 การเตรียมฐานรอง.....	12
2.2 หลักการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD.....	13
2.2.1 แหล่งกำเนิดธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน.....	13
2.2.2 อุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสม.....	17
2.2.3 การควบคุมตัวแปรในการสังเคราะห์เพชร	17
2.3 แลปพลังงานในของแข็ง.....	17
2.4 ระดับเฟอร์มิ และความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์.....	19
2.5 สภาพความนำไฟฟ้าและสภาพความต้านทาน.....	22
2.6 รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะ.....	24
2.7 สถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส.....	28
2.8 หลักการของตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....	31
บทที่3 กระบวนการทดลอง.....	34
3.1 การเตรียมฐานรอง.....	34
3.1.1 การทำความสะอาดฐานรองซิลิกอน.....	34
3.1.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยการขัดด้วยครีมเพชร.....	35
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD.....	36
3.3 กระบวนการสร้างและการทดสอบคุณสมบัติของขั้วโลหะ.....	38
3.4 กระบวนการกัดฐานรองซิลิกอนออกจากฟิล์มเพชร.....	39
3.5 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเครื่องถ่ายภาพ SEM.....	40
3.6 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy.....	41
3.7 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Seebeck Effect.....	44
3.8 กระบวนการสร้างตัวต้านทานจากฟิล์มเพชร.....	45
3.8.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรเนื่องจากอุณหภูมิ.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 กระบวนการทดสอบค่า Breakdown Field ของฟิล์มเพชร.....	46
3.10 กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุจากฟิล์มเพชร.....	47
3.10.1 การตอบสนองความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	47
3.10.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มเพชรเนื่องจากอุณหภูมิ.....	48
3.10.3 ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มเพชร.....	48
บทที่4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	49
4.1 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM.....	49
4.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy.....	50
4.3 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Seebeck effect.....	51
4.4 ผลการวิเคราะห์รอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชร.....	52
4.4.1 ผลการทดลองรอยต่อโลหะทองคำ(Au)กับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ที่สร้างจากกระบวนการ Combustion activation CVD.....	52
4.4.2 ผลการทดลองรอยต่อโลหะกาวเงิน(Silver Paste) กับฟิล์มเพชรชนิด อินทรีนซิกที่สร้างจากกระบวนการ Combustion Activation CVD.....	56
4.4.3 ผลการทดลองรอยต่อโลหะอะลูมิเนียม(Al) กับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่สร้าง จากกระบวนการ Combustion Activation CVD.....	59
4.5 ผลการวิเคราะห์ตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	61
4.6 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของประจุพาหะและช่องว่างแถบพลังงานของ ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ Combustion Activation CVD.	63
4.7 ค่า Breakdown Field ของเพชร.....	65
4.8 ผลการวิเคราะห์ตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	66
บทที่5 สรุปและวิจารณ์.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	75

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	77

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของเพชร.....	4
1.2 คุณสมบัติที่สำคัญของเพชรเปรียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน.....	8
2.1 ฟังก์ชันงานของโลหะชนิดต่างๆ.....	28
3.1 เงื่อนไขในการสร้างฟิล์มเพชรโดยวิธีการ Combustion Activation CVD.....	37
3.2 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอน.....	43
3.3 ผลการทดลองด้วยเทคนิค Seebeck Effect.....	45
4.1 ผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์มเพชร ที่แรงดัน 10 โวลต์คงที่.....	70
4.2 ผลการทดลองวัดความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชร ด้วยเครื่อง PMC 3100A โดยทำการแปรค่าความหนาของฟิล์มเพชร.....	72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แบบจำลองโครงสร้างของเพชร.....	2
1.2 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะโควาเลนต์ sp^3 ของเพชร	2
1.3 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 ของแกรไฟต์	3
2.1 แผนภาพแสดงอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีน	14
2.2 แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีน ค่าระหว่าง 0.70-0.98.....	15
2.3 แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีน มีค่าเท่ากับ1.....	16
2.4 แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีน มีค่ามากกว่า1.....	16
2.5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซและอุณหภูมิ ของการเกิดผลึกเพชร.....	17
2.6 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	18
2.7 โครงสร้างแถบพลังงานของฉนวน	19
2.8 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะ	19
2.9 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก่อนทำผิวสัมผัสโดยที่ $\phi_M > \phi_S$	25
2.10 แสดงแถบพลังงานระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังจากทำผิวสัมผัสแล้ว โดยที่โลหะมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า	25
2.11 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ก่อนทำผิวสัมผัสโดยที่ $\phi_M > \phi_S$	27
2.11 แถบพลังงานระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังจากทำผิวสัมผัสแล้ว โดยที่โลหะ มีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า.	27
2.12 ผลของสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส (Surface states) ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้น โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่มีคุณสมบัติเป็นระดับจับอิเล็กตรอน (Electron Trapped).....	30
2.13 ผลของสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส (Surface states) ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้น โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่มีคุณสมบัติเป็นระดับจับโฮล (Hole Trapped).....	30
2.15 โครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะตัวนำขนาน.....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	ลักษณะตัวอย่างของครีมเพชรที่ใช้ในการขัดฐานรองซิลิกอน.....35
3.2	ลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวโดยการขัดด้วยครีมเพชรขนาด 5 μm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....36
3.3	ชุดทดลองการสังเคราะห์ด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD.....36
3.4	แผนภาพการจัดชุดทดลองการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Combustion Activation CVD.....37
3.5	กระบวนการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะชนิดต่างๆกับสารกึ่งตัวนำเพชร.....38
3.6	ชุดเครื่องมือการกัดแผ่นซิลิกอนด้วย KOH.....39
3.7	แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น.....41
3.8	แสดงถึง Raman spectrumของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างๆกันคือ.....42
3.9	ภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วย Seebeck Effect.44
3.10	โครงสร้างของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....45
3.11	การจัดชุดเครื่องมือในการวัดผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร...46
3.12	การจัดชุดเครื่องมือในการวัดค่า Breakdown Field ของฟิล์มเพชร.....46
3.13	รูปตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Combustion Activation CVD.....47
3.14	การจัดชุดเครื่องมือในการวัดผลของอุณหภูมิต่อตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....47
3.15	การจัดชุดเครื่องมือในการวัดผลของอุณหภูมิต่อตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....48
4.1	ลักษณะของพื้นผิวฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการ Combustion Activation CVD เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิฐานรองต่างๆ ด้วยภาพถ่าย SEM.....49
4.2	ลักษณะของความหนาของฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการ Combustion Activation CVD อุณหภูมิฐานรอง 700 °C จากการตรวจสอบด้วยภาพถ่าย SEM.....50
4.3	ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD โดย Raman Spectroscopy.....51
4.4	ภาพตัดขวางของรอยต่อโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร.....52
4.5	คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร.....53

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิค ในทางอุดมคติ ก่อนการสัมผัส.....	53
4.7 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิค ในทางอุดมคติ หลังสัมผัส.....	54
4.8 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิค เนื่องมาจากสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส หลังสัมผัส.....	55
4.9 ภาพตัดขวางของรอยต่อโลหะกาวเงินกับฟิล์มเพชร.....	56
4.10 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะกาวเงินกับฟิล์มเพชร.....	56
4.11 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิค ในทางอุดมคติ ก่อนสัมผัส.....	57
4.12 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิค ในทางอุดมคติ หลังสัมผัส.....	57
4.13 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิค เนื่องมาจากสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส หลังสัมผัส.....	58
4.14 ภาพตัดขวางของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร.....	59
4.15 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร.....	59
4.16 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค ในทางอุดมคติ ก่อนสัมผัส.....	60
4.17 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค ในทางอุดมคติ หลังสัมผัส.....	60
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านกับอุณหภูมิของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	61
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านกับอุณหภูมิของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	62
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านกับอุณหภูมิของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	63
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(n)$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	64
4.22 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรที่มีความหนา $20 \mu\text{m}$	65

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส.....	66
4.24 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	67
4.25 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	67
4.26 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	68
4.27 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	68
4.28 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ด้วยเครื่อง PMC 3100A.....	69
4.29 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	71
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าของฟิล์มเพชรกับส่วนกลับความหนาของฟิล์มเพชร....	72

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่
C	ความจุไฟฟ้า
d	ระยะห่างระหว่างระนาบ
E_0	ระดับพลังงานที่สูญญากาศ
E_c	ระดับพลังงานความนำ
E_F	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน
E_v	ระดับพลังงานวาเลนซ์
h	ค่าคงที่ของ Planck
I	กระแสไฟฟ้า
J	ความหนาแน่นของกระแส
K	ค่าคงที่ของโบลต์มานด์
L	ความยาวของตัวต้านทาน
m_e^*	มวลที่แท้จริงของอิเล็กตรอน
m_h^*	มวลที่แท้จริงของโฮล
n	ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบความนำ
p	ค่าความหนาแน่นของโฮล
$P(E)$	โอกาสที่อิเล็กตรอนจะสามารถเข้าไปอยู่ในสถานะพลังงานระดับ E ได้
η_i	ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค
R	ค่าความต้านทาน
$S(E)$	ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในช่วงของพลังงานระหว่าง E และ $E+dE$
T	อุณหภูมิ
V	แรงดันไฟฟ้า

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ϵ

ρ

ϕ

ϕ_B

ϕ_m

ϕ_s

μ_p

χ_s

ความหมาย

ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำ

ค่าพิกัดความต้านทาน

ค่าฟังก์ชันงาน

ค่าความสูงกำแพงศักย์

ฟังก์ชันงานของโลหะ

ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

ค่าความคล่องตัวของโฮล

อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ

ศัพท์เทคนิค

แกรไฟต์	Graphite
กาวเงิน	Silver paste
ขบวนการเกิดพาหะ	Generation
ความเร็วดริฟท์	Drift velocity
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
ค่าคงที่แลตทิซ	Lattice constant
ค่ายอดลำดับที่สอง	Second order peak
ค่ายอดลำดับที่หนึ่ง	First order peak
ความถี่สูง	Ultrasonic
ช่องว่างแถบพลังงาน	Energy gap
ชนิดพี	P-type
ชนิดเอ็น	N-type
ชนิดอินทรินซิก	Intrinsic
ฐานรอง	Substrate
แถบความนำ	Conduction band
แถบวาเลนซ์	Valence band
แถบต้องห้าม	Energy gap
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized water
พันธะแขวนขาด	Dangling bond
พลังงานกระตุ้น	Activation energy
รอยต่อโอห์มมิก	Ohmic contact
รอยต่อเรกติไฟร์	Rectify contact
ผลึกเดี่ยว	Single crystal
อิเล็กตรอน	Electron
โฮล	Hole

คำนำ

ในปัจจุบันฟิล์มเพชรได้รับการสนใจมากขึ้น ด้วยคุณสมบัติต่างๆของเพชรที่ดีกว่าวัสดุอื่นที่ใช้ในปัจจุบัน และเมื่อมีการค้นพบกระบวนการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อนและค่าใช้จ่ายต่ำ ทำให้เพชรมีการประยุกต์ใช้งานมากขึ้น ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชรและข้อจำกัดของฟิล์มเพชร ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Combustion Activation CVD โดยรายละเอียดในการวิจัยมีดังนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงความคุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะต่างๆ ของคาร์บอน นอกจากนี้กล่าวถึงแนวโน้มนำเพชรไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างโดยอาศัยคุณสมบัติพื้นของเพชร

บทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ หลักการการสังเคราะห์ด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD และการควบคุมตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการสังเคราะห์ อีกทั้งกล่าวถึงทฤษฎีของสารกึ่งตัวนำและคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน ได้แก่ ความต้านทาน คุณสมบัติรอยต่อ และ ความจุไฟฟ้า

บทที่ 3 จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD วิธีต่างๆ การวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร และข้อจำกัดของฟิล์มเพชร สร้างจากฟิล์มเพชร

บทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร และผลการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มเพชร และข้อจำกัดของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Combustion Activation CVD นอกจากนี้จะอธิบายผลของคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ด้วยหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 5 เป็นส่วนของสรุปผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำในวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้หวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านไม่มากนักน้อย

บทที่ 1

บทนำ

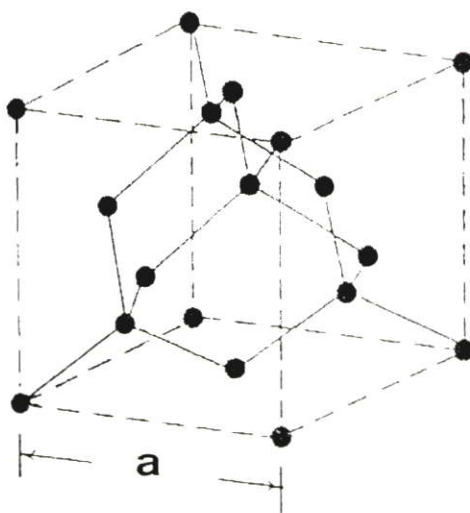
เพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของ Carbon ที่ประกอบไปด้วยคุณสมบัติมากมายที่ทำให้เพชรมีคุณค่าและน่าสนใจมากกว่าวัสดุอื่นๆ เพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี มีค่าสัมประสิทธิ์การแตกร้าวที่น้อย ค่าความยืดหยุ่น(Elastic modulus)ที่สูง จึงนำไปใช้เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับการขัดหรือเคลือบผิวอุปกรณ์ที่ต้องการความทนทานสูง ค่า Thermal expansion ของเพชรซึ่งเป็นผลดีสำหรับการผลิตไดอะแฟรมของลำโพงที่มีคุณภาพสูง ค่าความโปร่งแสงของเพชรทำให้เพชรเป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับอุปกรณ์ทาง Optical (เช่น หน้าต่าง (Window), lense coating เป็นต้น) ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) ของคาร์บอน ทำให้เพชรถูกใช้ในการเคลือบข้อต่อฟัน และอุปกรณ์จำพวก Biosensor ยิ่งกว่านั้นจากค่า Thermal conductivity ที่สูงทำให้เพชรเป็นตัวกระจายความร้อนในอุดมคติสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงๆ รวมถึงวงจรรวมที่ทนความร้อนสูง จากค่า hole mobility ที่สูง Band gap ที่กว้าง และค่า Breakdown voltage ที่สูงของเพชรทำให้สามารถนำไปใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการการตอบสนองความถี่และกำลังไฟฟ้าสูง ทั้งยังทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง

1.1 เพชรและรูปแบบต่างๆ ของคาร์บอน

เพชรเป็นรูปแบบการเรียงตัวของคาร์บอนซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 4 ดังนั้นในการสังเคราะห์เพชรอะตอมของคาร์บอนจึงเป็นส่วนประกอบสำคัญในกระบวนการ อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีต่างๆที่กล่าวมานี้อาจเกิดคาร์บอนในรูปแบบอื่นๆ ซึ่งมีใช้รูปแบบการเรียงตัวของเพชร โดยคาร์บอนรูปแบบต่างเหล่านี้อาจมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเพชรที่สังเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษารูปแบบต่างๆ ของคาร์บอนเหล่านี้

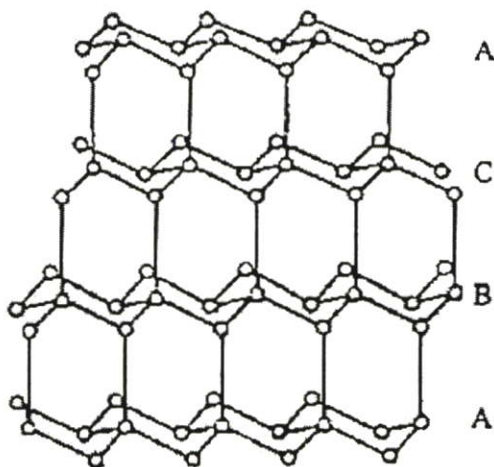
1.1.1 Diamond

เพชรเป็นรูปแบบการเรียงตัวของคาร์บอนที่น่าสนใจ เกิดจากอะตอมคาร์บอน 6 ตัวเรียงตัวกันแบบ Face center cubic รูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นแบบจำลองโครงสร้างเพชร เมื่อพิจารณาแต่ละยูนิตเซลล์ จะประกอบไปด้วยคาร์บอน 8 อะตอม โดย 1 อะตอมที่ตำแหน่งมุมเซลล์ 3 อะตอม ที่ตำแหน่ง Face-center และ 4 อะตอมในตำแหน่งที่ว่างของลูกบาศก์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับกับอะตอมคาร์บอนข้างเคียง 4 อะตอม ด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 ที่แข็งแรงมาก และจะเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า Diamond Structure



รูปที่ 1.1 แบบจำลองโครงสร้างของเพชร

อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันเป็นลักษณะวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมตำแหน่งสลับชั้นลงมีรูปแบบเป็น ABCABCABC..... อย่างมีระเบียบ รูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในเพชร

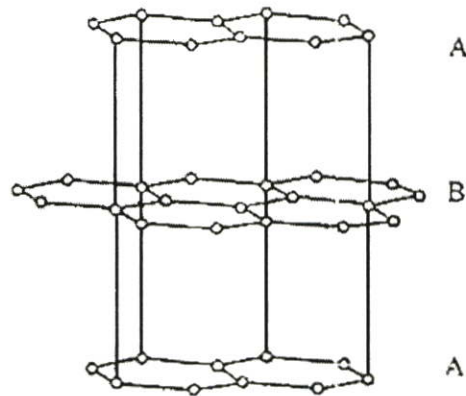


รูปที่ 1.2 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะโควาเลนต์ sp^3 ของเพชร

เมื่อพิจารณาจากหน่วยเซลล์จะพบว่า ค่าคงที่ของผลึก มีค่าเท่ากับ 3.56 อังสตรอม และความยาวพันธะมีค่าเท่ากับ 1.54 อังสตรอม และผลการวัดด้วย Raman spectroscopy จะแสดงตำแหน่งยอดลำดับที่หนึ่งที่ 1332 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 12 และที่ตำแหน่ง 1284 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 13

1.1.2 Graphite

แกรไฟต์เป็นรูปแบบการเรียงตัวของคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ง่ายในธรรมชาติ อะตอมของคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 รูปที่ 1.3 แสดงให้เห็นการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในแกรไฟต์ โดยอะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมซ้อนกันและอะตอมของคาร์บอนแต่ละอะตอมไม่มีการเชื่อมกัน ทำให้แต่ละชั้นของวงแหวนหกเหลี่ยมมีลักษณะเป็นแผ่นราบเสมอกัน มีรูปแบบการเรียงตัวเป็น ABABAB..... อะตอมของคาร์บอนในวงแหวนจะยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรง แต่จะพบวาระหว่างชั้นต่างๆ กลับมีการยึดเหนี่ยวกันไม่ตึง ทำให้แกรไฟต์สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ และสามารถเลื่อนไหลในขณะที่ได้รับภาวะเฉือนได้ง่าย



รูปที่ 1.3 แบบจำลองการเรียงตัวของพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 ของแกรไฟต์

เมื่อพิจารณาขนาดเซลล์จะพบว่า ค่าคงที่ของผลึก มีค่าเท่ากับ 6.707 อังสตรอม และความยาวพันธะมีค่าเท่ากับ 1.42 อังสตรอม และผลการวัดด้วย Raman spectroscopy จะแสดงตำแหน่งยอดลำดับที่หนึ่งที่ 1580 cm^{-1} สำหรับยอดลำดับที่สองที่ 3240 cm^{-1}

1.1.3 Amorphous Carbon

Amorphous Carbon เป็นการเรียงตัวของคาร์บอนได้ ทั้งแบบ sp^2 และ sp^3 โดยในกรณีที่มีพันธะแบบ sp^2 จะมียอดคลื่นของ Raman spectroscopy มีลักษณะเป็นแถบระหว่างตำแหน่งยอดที่ 1345 cm^{-1} ถึงตำแหน่ง 1550 cm^{-1} โดยยอดคลื่นจะเปลี่ยนจากค่า 1345 cm^{-1} เป็นค่า 1550 cm^{-1} เมื่อเนื้อสารเกิดการ Hydrogenated ซึ่งที่ตำแหน่งยอดคลื่น 1550 cm^{-1} นี้สารจะถูกเรียกว่า "Diamond – like carbon" (DLC)

ส่วนในกรณีที่มี Amorphous Carbon ที่มีพันธะแบบ sp^3 จะมีตำแหน่งของยอดคลื่นที่ 1140 cm^{-1} ซึ่ง Amorphous carbon ชนิดนี้จะมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "small size cubic diamond"

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นรูปต่าง ๆ ของคาร์บอนที่พบได้ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้สามารถทำการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ซึ่งจะอธิบายในบทที่ 4 ต่อไป

1.1.4 Microcrystalline Carbon

โครงสร้างของผลึกเพชรจะมีเพียงพันธะของคาร์บอนอะตอมแบบ sp^3 เท่านั้น แต่ในบางครั้งอาจเกิดพันธะของ sp^2 ใกล้กับ Crystalline grain boundaries โดยโครงสร้างนี้จะถูกเรียกว่า Microcrystalline Carbon หรือ Micrographite กราฟจาก Raman จะมีลักษณะแสดงยอดคลื่นที่ตำแหน่ง 1355 cm^{-1} และยอดที่คลื่นอันดับที่สองที่ 2710 cm^{-1}

1.2 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชร

จากการที่เพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ ทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ ในวงการอุตสาหกรรมจำนวนมาก ตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติโดยทั่วไปของเพชร ในที่นี้จะยกตัวอย่างบางตัวอย่างที่น่าสนใจบางส่วนในการประยุกต์ใช้งานเพชร

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของเพชร

Property	Value	Unit
Hardness	1.0×10^4	Kg/mm ²
Strength, Tensile	>1.2	GPa
Strength, Compressive	>110	GPa
Coefficient of friction	0.03	Dimensionless
Sound velocity	1.8×10^4	m/s
Density	3.52	g/cm ³
Young modulus	1.22	GPa
Possion's Ratio	0.2	Dimensionless
Thermal expansion coefficient	1.1×10^{-6}	K ⁻¹
Thermal conductivity	20.0	W/cm-K
Thermal shock parameter	3.0×10^8	W/m

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

Debye temperature	2200	K
Optical index of refraction (at 591 nm)	2.41	Dimensionless
Optical transmissivity (from nm for IR)	225	Dimensionless
Loss tangent at 40 Hz	6.0×10^{-4}	Dimensionless
Dielectric constant	5.7	Dimensionless
Dielectric strength	1.0×10^7	V/m
Electron mobility (Single Crystal)	2200	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
Hole mobility (Single Crystal)	1600	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
Electron saturated velocity	2.7×10^7	cm/s
Hole saturated velocity	1.0×10^7	cm/s
Bandgap (Single Crystal)	5.45	EV
Resistivity	$10^{13} - 10^{16}$	$\Omega\text{-cm}$

1.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

เพชรเป็นวัสดุที่มีความเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาต่อสารเคมี จึงนำไปใช้ในการเคลือบป้องกันสารเคมี และเตาปฏิกรณ์ปรมาณู แต่เพชรอาจทำปฏิกิริยาเคมีกับสารจำพวก Molten Oxidizer เช่น KNO_3 เป็นต้น และยังสามารถเกิดการออกซิไดซ์ได้ในอากาศเปิดอุณหภูมิสูงกว่า 600°C หรือ 1500°C ในสูญญากาศซึ่งทำให้เพชรเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแกรไฟต์

1.2.2 คุณสมบัติทางแสง

จากค่าความโปร่งแสง และ ค่าดัชนีการหักเหของแสงของเพชร ทำให้เพชรถูกนำไปใช้เป็น Windows และ เลนส์ นอกจากนี้จากค่าความนำความร้อนที่สูง และ ค่า loss Tangent ที่ต่ำทำให้เพชรถูกใช้เป็น Windows สำหรับอุปกรณ์ ไมโครเวฟที่มีกำลังสูงๆ

1.2.3 คุณสมบัติเชิงกล

เพชรประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงมาก ทำให้เพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุดในบรรดาวัสดุที่เรารู้จัก โดยมีค่าความแข็งสูงถึง $1.0 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ แต่อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนา สารประกอบ C_3N_4 (Carbon Nitride) ซึ่งคาดว่าจะเป็นสารที่แข็งแรงมากกว่าเพชร จากความแข็งนี้ทำให้เพชรถูกนำไปใช้งานในการเคลือบอุปกรณ์ที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ได้รับความต้านทานสูง หรือใช้งานหนักเป็นพิเศษ เช่น ใบเลื่อย

Sliding Friction ระหว่างพื้นผิวเพชรที่นำมาขัดกันมีค่า 0.01 ในบรรยากาศ และจะมีค่าน้อยลงเมื่ออยู่ในสุญญากาศ

1.2.4 คุณสมบัติทางเสียง

เพชรมีค่า Sonic Velocity ที่สูงมาก ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นที่สูง และการขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ ทำให้อุปกรณ์ SAW ที่สร้างจากเพชรจะพบว่าสามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีความถี่สูงกว่า 2 GHz

1.2.5 คุณสมบัติในการตอบสนองต่อการแผ่รังสี

เพชรถูกนำไปใช้งานตรวจสอบการแผ่รังสี โดยอาศัยคุณสมบัติที่ค่าความต้านทานของเพชรจะมีค่าลดลงเมื่ออยู่สภาวะได้รับการแผ่รังสี และจากคุณสมบัติทางอุณหภูมิทำให้เพชรสามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการแผ่รังสีในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิที่สูง ซึ่งจะมาแทนที่อุปกรณ์วัดการแผ่รังสีที่สร้างจากวัสดุจำพวกซิลิคอน

1.2.6 คุณสมบัติทางอุณหภูมิ

เพชรเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนที่สูง และมีค่ามากกว่าค่าสภาพนำความร้อนของทองแดงถึง 4 เท่าสำหรับเพชรธรรมชาติ โดยเพชรธรรมชาติมีสภาพความร้อนเท่ากับ 20 w/cm-K และเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์มีค่าความนำความร้อนอยู่ในช่วง 4 w/cm-K จนถึง 20 w/cm-K ขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์และความบริสุทธิ์ของเพชรที่สังเคราะห์ได้ และค่า Thermal expansion ที่ต่ำประมาณ $1.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ทำให้เพชรเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรุนแรง สำหรับอุตสาหกรรมการบินเพชรถูกนำไปใช้เป็นวัสดุระบายความร้อนของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งจะพบว่าสามารถลดขนาดและปริมาตรโดยรวมของอุปกรณ์ทั้งหมดลงไปได้ ซึ่งมีผลอย่างมากในการออกแบบในอุตสาหกรรมการบิน นอกจากนั้นเพชรยังเป็นวัสดุระบายความร้อนในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีกำลังสูงๆ เช่น Laser Diode , Multichip module และอุปกรณ์ทาง Microelectronic ต่างๆ จากการทดลองจะพบว่าเมื่อนำเพชรมาใช้เป็นวัสดุฐานรองสำหรับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์เหล่านี้สามารถระบายความร้อนได้ดีขึ้นและยังเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์นั้นด้วย เช่น Microprocessor ที่ใช้เพชรเป็นวัสดุฐานรองจะพบว่าอัตรา Clock จะมากขึ้นกว่าการใช้วัสดุฐานรองซิลิคอน

1.2.7 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์

เพชรถูกจัดว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งเมื่อไม่มีการเติมสารเจือใดๆ จะมีสภาพความต้านทานที่สูงมาก ถึง $10^{12} - 10^{14} \Omega\text{-cm}$ เนื่องจากค่าช่องว่างแถบพลังงาน(Band gap) มีค่าประมาณ 5.45 eV สำหรับเพชรธรรมชาติ นอกจากนั้นเพชรมีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลที่สูงมาก โดยค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $2200 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ และค่าความคล่องตัวของโฮลมีค่าเท่ากับ $1800 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ ทำให้เพชรเหมาะในการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ Switching และจากค่า Breakdown Field ที่สูงประมาณ $10 \times 10^6 \text{ V/cm}$ ทำให้เพชรถูกคาดหวังในการนำไปใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้จากค่า Dielectric Constant ของเพชรมีค่าต่ำ ประมาณ 5.7 เมื่อนำเพชรไปสร้างเป็นตัวเก็บประจุ จะพบว่าสามารถทำงานที่ความถี่สูงๆ ได้ และจากคุณสมบัติทางอุณหภูมิทำให้ตัวเก็บประจุที่สร้างจากเพชรสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง

อย่างไรก็ตามเราก็สามารถเติมสารเจือผู้รับเพื่อเปลี่ยนเพชรชนิดอินทรีนซิคให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้ โดยการเติมอะตอมสารเจือซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 3 ซึ่งนิยมใช้โบรอนเป็นสารเจือ เพราะขนาดของอะตอมของโบรอนเหมาะสมกับขนาดอะตอมของคาร์บอน สำหรับการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนั้นจะยังไม่กล่าวถึง เนื่องจากได้มีการพยายามสร้างกึ่งตัวนำชนิดเอ็นโดยการเติมอะตอมสารเจือซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 5 แต่เนื่องจากขนาดของอะตอม P หรือ As มีขนาดใหญ่กว่าอะตอมคาร์บอน ทำให้ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างแลตทิซของอะตอมคาร์บอนได้ และยังมีโอกาสควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ ดังนั้นจึงยังคงไม่สามารถสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้

1.2.8 คุณสมบัติของเพชรเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ

จากคุณสมบัติต่างๆที่กล่าวมา เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเหล่านี้กับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นดังในตารางที่ 1.2 ทำให้สามารถสรุปข้อดีของเพชรในการนำไปใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆแทนสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆได้

จากตารางจะพบว่า เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่สูงกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ จึงสามารถนำเพชรไปใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงได้ โดยเพชรยังคงความสามารถในการควบคุมประจุพาหะที่อุณหภูมิสูง จากค่าไดอิเล็กตริกของเพชรที่มีค่าที่มีค่าต่ำทำให้เพชรสามารถตอบสนองการทำงานได้ดีในความถี่สูง และจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นเพชรจึงสามารถนำไปใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ และจากค่า Thermal conductivity ที่สูงทำให้อุปกรณ์ที่สร้างจากเพชรสามารถระบายความร้อนได้ดี และลดขนาดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นให้มีขนาดเล็กลง

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติที่สำคัญของเพชรเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ที่อุณหภูมิ 293 เคลวิน

คุณสมบัติ	เพชร	ซิลิคอน	GaAs	SiC
Thermal conductivity (W/cm-K)	20	1.41	0.455	4
Specific heat (J/g-K)	0.52	0.7	0.35	0.65
Optical Phonon energy (meV)	163	63	35	100
Longitudinal phonon velocity (cm/s)	1.8×10^6	9×10^5	5.2×10^5	1.3×10^6
Coefficient of thermal expansion	0.8×10^{-6}	2.5×10^{-6}	5.9×10^{-6}	2.9×10^{-6}
Electron saturated velocity(cm/s)	1.5×10^7	1×10^7	1.2×10^7	2×10^7
Hole saturated velocity(cm/s)	1.05×10^7	9×10^6	1×10^7	1×10^7
Electron mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	2150 ± 200	1420	8800	600
Hole mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$)	1700 ± 280 *single crystal	470	400	650
Density of states effective mass				
Electron	0.57	1.1	0.068	0.45
Hole	1.2	0.8	0.5	1
Dielectric constant	5.7	11.9	12.5	10
Intrinsic resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	$>10^{15}$	10^5	10^8	$>10^{15}$
Break down field (V/cm)	$1-20 \times 10^6$	3×10^5	3.5×10^5	1.5×10^6
Bandgap (eV)	5.5	1.12	1.42	2.2
Effective density of states				
Conduction band (cm^{-3})	1×10^{19}	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}	7×10^{18}
Valence band (cm^{-3})	3×10^{19}	1.04×10^{19}	7×10^{18}	2.5×10^{19}
Debye temperature (K)	1860	645	344	1200

บทที่ 2

ทฤษฎี

จากคุณสมบัติต่างๆ ของเพชรที่กล่าวมาในบทที่ 1 ทำให้เพชรเป็นวัสดุที่น่าสนใจ แต่อย่างไรก็ตามจากการที่เพชรในธรรมชาติมีอยู่น้อยมาก ทำให้เพชรธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีราคาสูงไม่เหมาะต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆ จึงนำมาซึ่งความพยายามในการพัฒนาเทคโนโลยีในการสังเคราะห์เพชรเพื่อนำไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ โดยความเป็นมาของเทคโนโลยีกระบวนการสังเคราะห์เพชรอาจกล่าวได้ดังต่อไปนี้

เมื่อปีค.ศ. 1797 Smithson Tenmant ได้แสดงให้เห็นว่าเพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของ CARBON โดยใช้การทดลองเผาไหม้เพชรในออกซิเจน ซึ่งผลที่ได้คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเถ้าถ่านเหลืออยู่

ในปีค.ศ. 1953 Allmanna Svenska Elektriska Aketiologet กลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน ได้กล่าวอ้างการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูงได้เป็นผลสำเร็จ แต่มิได้มีรายงานแสดงรายละเอียดของกระบวนการสังเคราะห์ออกมา

ในปีค.ศ. 1955 General Electronic Research Laboratories ได้ทำการสังเคราะห์เพชรที่ความดันสูงและอุณหภูมิสูงเป็นผลสำเร็จ ซึ่งสามารถทำการทดลองสังเคราะห์ซ้ำได้ แต่การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงและมีลักษณะเฉพาะ ทำให้ต้นทุนการผลิตสูง

ในปีค.ศ. 1956 Bois V. Spitsyn นักศึกษาเคมีชาวรัสเซียได้ทำการสังเคราะห์เพชรโดยใช้การสลายตัวของคาร์บอนเตตราไฮโดรคาร์บอนเมล็ดผลึกเพชร

ในปีค.ศ. 1971 Angus et.al. ได้เสนอวิธีการสังเคราะห์เพชรโดยใช้อะตอมไฮโดรเจนที่เกิดจากการแตกตัวบริเวณไส้หลอดทั้งสแตนในการกำจัดกราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์เพชร ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของความสนใจในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ

ในปีค.ศ. 1973 Profer et.al. ได้ทำการผสมก๊าซ B_2O_6 ลงไปในก๊าซ CH_4 ซึ่งเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ในปีค.ศ. 1974 สถาบัน National Institute for Research in Inorganic Materials (NIRIM) ได้เริ่มการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำอย่างจริงจัง เพื่อนำเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์

ในปี ค.ศ. 1981 NIRIM ได้นำเสนอกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรอย่างรวดเร็วโดย Matsumoto et.al. ได้เสนอเทคนิค Hot Filament CVD (HFCVD) และ MICROWAVE PLASMA CVD (MPCVD) ในปีถัดมา

จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1987 Suzuki et.al. ได้ค้นพบกระบวนการ DC-Plasma-Assist CVD และ HIROSE et.al. แห่ง National Institute of Technology ได้ค้นพบกระบวนการสังเคราะห์เพชรจากการเผาไหม้จากเปลวไฟ (Combustion Activation Methods)

โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีกระบวนการสังเคราะห์เพชรได้รับการยอมรับและมีการศึกษาวิจัยพัฒนาอย่างกว้างขวางทั่วโลกซึ่งรวมทั้งศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2.1 หลักการของสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ CVD

จากที่กล่าวมาการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในการสังเคราะห์เพชรถึงแม้ว่าจะมีอุปกรณ์และกระบวนการที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามก็มีพื้นฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.1.1 อะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน

เพชรเป็นรูปแบบการเรียงตัวของคาร์บอน ดังนั้นอะตอมของคาร์บอนจึงเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์เพชร โดยการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำด้วยวิธีการ CVD ต่างๆ ต่างมีแหล่งจ่ายก๊าซที่ให้อะตอมคาร์บอนที่แตกต่างกัน เช่น มีเทน อะซิโตน โพรเพน อีเทน แอลกอฮอล์ และ อะเซทิลีน เป็นต้น

นอกจากนี้อะตอมของไฮโดรเจนมีส่วนสำคัญในการลดหรือกำจัดการก่อตัวของแกรไฟต์ ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการเรียงตัวของคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเพชร โดยอะตอมของคาร์บอนจะมีความเสถียรในการก่อตัวเป็นเพชรมากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอะตอมไฮโดรเจนที่ความหนาแน่นสูง ซึ่งโดยปกติแหล่งจ่ายก๊าซที่ให้อะตอมคาร์บอนจะมีอะตอมไฮโดรเจนอยู่ด้วย แต่บางครั้งจะพบว่าอะตอมไฮโดรเจนที่ได้จากก๊าซแหล่งจ่ายนั้นไม่เพียงพอ จึงมีการให้ก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการเพื่อเพิ่มจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนในระบบ อะตอมไฮโดรเจนจะช่วยให้เพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรมากขึ้น โดยอะตอมคาร์บอนที่ผิวหน้าจะมีลักษณะเป็นพันธะขาด (Dangling Bond) ซึ่งอาจทำให้อะตอมของคาร์บอนเปลี่ยนจากพันธะ sp^2 เป็น sp^3 แต่อะตอมของไฮโดรเจนจะเข้าไปจับกับอะตอมของคาร์บอนเพื่อรักษาพันธะ sp^3 และเราสามารถกำจัดอะตอมของไฮโดรเจนที่เกาะพื้นผิวนี้ได้โดยการใช้อะตอมไฮโดรเจนเช่นเดียวกัน โดยจะเป็นไปดังสมการที่ 2.1



เมื่อ C_d คืออะตอมของคาร์บอนที่ผิวหน้าของเพชร และ C_d^* คืออะตอมของเพชรที่บริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น อย่างไรก็ตามยังคงมีอะตอมของก๊าซชนิดอื่นซึ่งช่วยในการกำจัด หรือ ลด แกรไฟต์ที่เกิดขึ้นขณะทำการสังเคราะห์ เช่น อะตอมของออกซิเจน โดยจะพบว่าอะตอมของออกซิเจนที่ได้จากการเติมก๊าซออกซิเจนลงในกระบวนการ จะช่วยลดหรือกำจัดกราไฟต์และยังป้องกันการเปลี่ยนแปลงพันธะของอะตอมคาร์บอนที่พื้นผิวเพชร เช่นเดียวกันกับอะตอมของไฮโดรเจน โดยเป็นไปดังสมการ



2.1.2 การกระตุ้นก๊าซเพื่อให้เกิดอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน

เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมาจึงจำเป็นต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอน ด้วยความร้อน พลาสมา หรือ Combustion โดยอะตอมของคาร์บอนที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลต่ออัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร

นอกจากนี้จะพบว่าพลังงานจำนวนมากที่ใช้ ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า และ ความร้อน นอกจากจะทำให้ไฮโดรคาร์บอนแตกตัวยังทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนแตกตัวให้อะตอมไฮโดรเจนด้วย ซึ่งอะตอมไฮโดรเจนซึ่งได้จากการกระตุ้นนี้จะช่วยทำให้เพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณภาพดีขึ้น อย่างไรก็ตามพลังงานที่ให้เพื่อกระตุ้นกระบวนการเหล่านี้จะต้องทำให้ก๊าซเฟรมีอุณหภูมิสูงกว่า 1700 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันมิให้อะตอมของไฮโดรเจนกลับสู่สภาพรูปแบบของโมเลกุล

2.1.3 อุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสม

ในกระบวนการ CVD จะใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างบริเวณที่มีก๊าซเฟสที่ถูกกระตุ้นกับพื้นผิวของฐานรอง เป็น Driving Force ที่ให้ส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่ฐานรอง ซึ่งอัตราการก่อตัวของเพชรจะขึ้นกับความสามารถในการส่งผ่านนี้ ดังนั้นอุณหภูมิของฐานรองจึงมีส่วนสำคัญในการก่อตัวของเพชร โดยเราจะพบว่าวิธีการสังเคราะห์ที่ความดันต่ำด้วยวิธีการ CVD จะสามารถสังเคราะห์เพชรบนฐานรองที่มีฐานรองที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 1200 °C ขึ้นอยู่กับชนิดของกระบวนการ ถ้าหากอุณหภูมิฐานรองมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป จะทำให้เพชรที่สังเคราะห์ได้มีอัตราการเกิดที่ต่ำ หรืออาจทำให้เกิดรูปแบบของคาร์บอนแบบอื่นๆซึ่งมิใช่เพชร เช่น แกรไฟต์ ดังนั้นจึงมีการพยายามควบคุมอุณหภูมิฐานรอง เช่น การระบายความร้อนด้วยน้ำ การให้ความร้อนด้วยแหล่งกำเนิดความร้อน เป็นต้น เพื่อให้อุณหภูมิของฐานรองมีค่าเหมาะสมในการสังเคราะห์

2.1.4 การเตรียมฐานรอง

ฐานรองที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ CVD มีอยู่ด้วยกันมากมาย เช่น Si, Mo, Cu เป็นต้น ขึ้นอยู่กับความสะดวกในการประยุกต์ใช้งาน แต่จะพบว่าเพชรที่ก่อตัวบนฐานรองที่มีการเตรียมพื้นผิวจะมีอัตราการเกิดสูงกว่าฐานรองที่ไม่ได้มีการเตรียมพื้นผิว ดังนั้นการเตรียมฐานรองจึงถูกจัดให้เป็นหัวข้อสำคัญอีกหัวข้อหนึ่งในการเพิ่มอัตราการเกิดของเพชร โดยวิธีการเตรียมฐานรองที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดดังนี้

-การสร้างรอยขีดข่วนบนบริเวณพื้นผิวด้วยการขัดหรืออูลตราโซนิก

การขัดเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากความง่ายในทางปฏิบัติ แต่วิธีการนี้ไม่สามารถใช้กับพื้นผิวที่มีความซับซ้อนได้ อีกทั้งเป็นการยากที่จะทำให้พื้นผิวเกิดรอยขีดข่วนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งไม่เหมาะสมกับอุปกรณ์บางประเภทที่นำเพชรไปประยุกต์ใช้งาน เช่น Optical Windows ที่สร้างจากเพชร เป็นต้น วัสดุที่ใช้ในการขัดผิวหน้าของฐานรองอาจเป็นครีมเพชรหรือผงเพชร โบไรด์ คาร์ไบด์ ไนไตรด์ออกไซด์ แกร์ไฟต์ เป็นต้น

ส่วนวิธีการอูลตราโซนิก คือการนำฐานรองไปอูลตราโซนิกในสารละลายที่ผงเพชรหรือผงคาร์ไบด์ จัดเป็นวิธีที่ลักษณะเดียวกันกับการขัด แต่รอยขีดข่วนของอูลตราโซนิกจะมีความสม่ำเสมอมากกว่ารอยขีดข่วนที่เกิดจากการขัด และเมื่อเทียบขนาดของอนุภาคที่นำไปใช้ในการขัดและอูลตราโซนิกจะให้ผลที่น่าสนใจ คือการขัดยิ่งใช้อนุภาคที่เล็กเท่าใดอัตราการก่อตัวของเพชรยิ่งสูงมากขึ้น แต่ตรงกันข้ามกับวิธีการอูลตราโซนิกซึ่งยิ่งอนุภาคที่ใช้มีความใหญ่มากขึ้นเท่าใดอัตราการก่อตัวของเพชรจะยิ่งมากขึ้น

-การชุบด้วยผงเพชรหรือ เซรามิกต่างๆ

การชุบผิวหน้าของฐานรองด้วยผงเพชร Si, Al₂O₃ หรือ SiC จะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดของเพชรได้ และจะพบว่าอัตราการก่อตัวจะสูงขึ้นหากความหนาแน่นของผงเพชรที่ชุบบนพื้นผิวฐานรองมีค่ามากขึ้น

-การไบอัสด้วยไฟฟ้า

เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากไม่ต้องทำลายพื้นผิวของฐานรอง แต่ยังสามารถเพิ่มอัตราการก่อตัวของเพชรได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดการเกิดหรือกำจัดออกไซด์บนพื้นผิวฐานรอง ชนิดของการไบอัสแก่ฐานรองจะขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์เช่น ในวิธีการ DC plasma CVD และ Hot Filament CVD ฐานรองจะได้รับการไบอัสบวกเพื่อเพิ่มอัตราการก่อตัวของเพชร แต่จะพบว่าวิธีการ Microwave plasma CVD ไม่ว่าฐานรองจะได้รับการไบอัสบวกหรือไบอัสลบจะ

สามารถเพิ่มอัตรากัดตัวของเพชรได้เช่นเดียวกัน แต่จะพบว่าเมื่อทำการไปสลับแก่ฐานรอง Si จะทำให้เกิดรอยขรุขระบนพื้นผิวได้ ดังนั้นจึงนิยมให้ไปสลับวอกแก่ฐานรอง Si

- การเคลือบฐานรองด้วยฟิล์มหรือไฟเบอร์ของแกรไฟต์

การเคลือบฐานรองด้วยฟิล์มหรือไฟเบอร์ของแกรไฟต์ จะทำให้การกัดตัวของเพชรเพิ่มขึ้น โดยวัสดุที่เคลือบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของฐานรองทั้งทางกายภาพและเคมีให้ฐานรองมีความเหมาะสมในการกัดตัวของเพชร

-การใช้ ion implantation

วิธีการนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานของพื้นผิวและโครงสร้างของพื้นผิวของฐานรอง เพื่อสนับสนุนการกัดตัวของเพชร โดย implantation ของ C^+ (10^{18} ion/cm², 65-120 KeV) บน Cu และ As^+ (10^{14} ion/cm², 100 KeV) บน Si จะทำให้การเกิดของเพชรมากขึ้น ในขณะที่ implantation ของ Ar^+ (3×10^{15} ion/cm², 100 KeV) จะทำให้การกัดตัวของเพชรลดลง เนื่องจากโครงสร้างได้รับความเสียหายและไม่เป็นระเบียบ

-การยิงด้วยเลเซอร์

เลเซอร์ที่ยิงไปบนพื้นผิวของฐานรอง Cu หรือ Si ที่เคลือบด้วยชั้นบางๆของ a-C, WC หรือ CBN เลเซอร์ที่ยิงไปนั้นจะทำการเปลี่ยนองค์ประกอบของสารที่เคลือบบนพื้นผิวของฐานรองเหล่านั้นให้เป็นเพชรหรือเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมในการกัดตัวของเพชรบนพื้นผิวของฐานรองได้ง่ายขึ้น

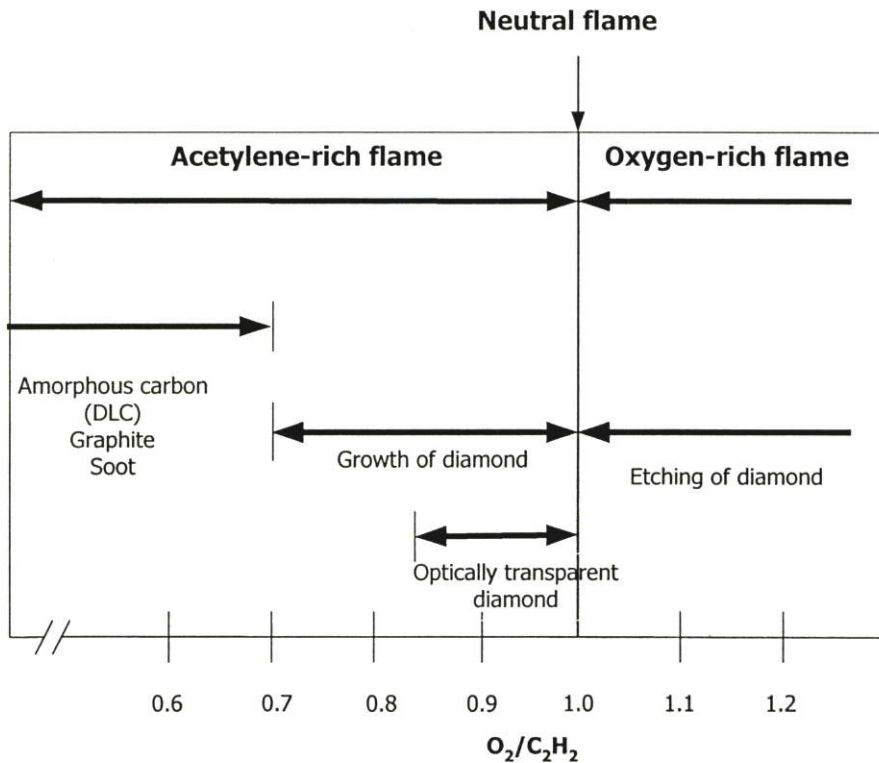
2.2 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation Chemical Vapor deposition

ในหัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ฟิล์มเพชรที่ใช้ในการศึกษาการประยุกต์ใช้งานสร้างขึ้นจากกระบวนการ Combustion Activation CVD ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจในการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการนี้อย่างละเอียด การสังเคราะห์ด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD นี้ถือว่ามีหนึ่งในกระบวนการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำด้วยเทคนิค CVD ดังนั้นการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการนี้มีปัจจัยสำคัญ ดังต่อไปนี้

2.2.1 แหล่งกำเนิดอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน

การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD อาศัยการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของออกซิเจนกับไฮโดรคาร์บอน ซึ่งไฮโดรคาร์บอนที่ทำปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์กับออกซิเจนนี้เองเป็นแหล่งกำเนิดอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนที่เป็นปัจจัยในการเกิดเพชรใน

เทคนิค CVD ไฮโดรคาร์บอนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดธาตุคาร์บอนในกระบวนการ Combustion Activation CVD มีด้วยกันหลายชนิด เช่น อะเซทิลีน เอทิลีน อีเทน เป็นต้น แต่จะพบว่าเมื่อใช้อะเซทิลีนเป็นแหล่งกำเนิดธาตุคาร์บอนจะมีอัตราการเกิดที่สูงกว่า แหล่งกำเนิดอื่นๆ และอะเซทิลีนยังเป็นก๊าซที่จัดหาได้ง่าย และต้นทุนต่ำ ทำให้อะเซทิลีนถูกเลือกใช้เป็นแหล่งกำเนิดธาตุคาร์บอน



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีน

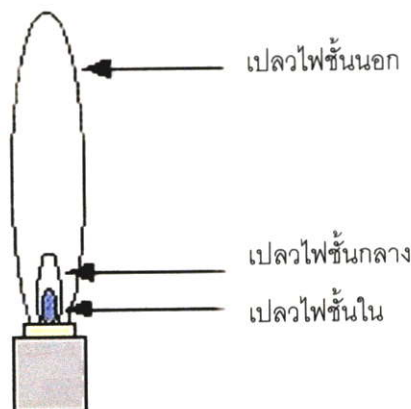
เมื่อพิจารณาสมการการเผาไหม้ของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีนที่สูญญากาศ ซึ่งจะพบว่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนกับก๊าซอะเซทิลีนมีค่าเท่ากับ 1 จะได้สมการดังนี้



แต่เมื่อทำการศึกษาลักษณะเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีนในบรรยากาศ จะพบว่าเปลวไฟแบ่งออกเป็นลักษณะต่างๆได้ดังนี้

2.2.1.1 อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีนมีค่าระหว่าง 0.70-0.98

เมื่อทำการปรับอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีนมีค่าระหว่าง 0.70-0.98 จะพบเปลวไฟแบ่งออกเป็น 3 ชั้นดังรูปที่ 2.2



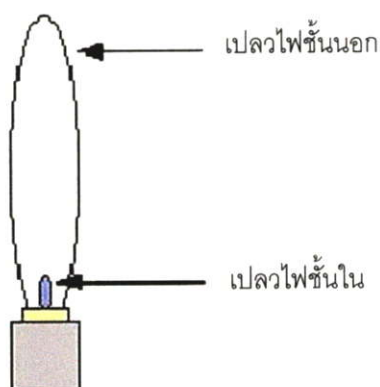
รูปที่ 2.2 แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีนค่าระหว่าง 0.70-0.98

จากรูป เปลวไฟชั้นในเป็นการเผาไหม้ระหว่างก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีนในอัตราส่วน 1:1 ตามสมการที่ 2.3 ซึ่งเปลวไฟชั้นในนี้มีอุณหภูมิสูงประมาณ $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งพลังงานความร้อนนี้จะกระตุ้นก๊าซเพื่อให้เกิดอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งจะเป็นต่อกระบวนการก่อตัวของเพชร ส่วนของเปลวไฟชั้นกลางเป็นส่วนของก๊าซอะเซทิลีนที่เหลือซึ่งแพร่ออกจากเปลวไฟชั้นใน ซึ่งก๊าซอะเซทิลีนนี้จะเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนเนื่องจากพลังงานความร้อนของเปลวไฟชั้นใน ดังสมการที่ 2.4 และคาร์บอนจะเผาไหม้กับออกซิเจนภายนอกเกิดเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ตามสมการที่ 2.5 ในขณะที่เปลวไฟชั้นนอกเกิดจากคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับก๊าซออกซิเจนภายนอกได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ 2.7



2.2.1.2 อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนมีค่าเท่ากับ 1

เมื่อทำการปรับอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนมีค่าเท่ากับ 1 จะพบว่าเปลวไฟแบ่งออกเป็น 2 ชั้นดังรูปที่ 2.3

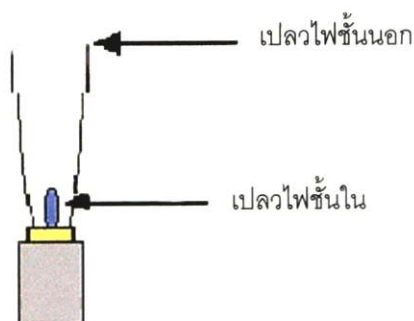


รูปที่ 2.3 แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนมีค่าเท่ากับ 1

เปลวไฟชั้นในเป็นการเผาไหม้ของก๊าซออกซิเจนต่อก๊าซอะเซทิลีนเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นไปดังสมการที่ 2.3 ส่วนเปลวไฟชั้นนอกเกิดจากการเผาไหม้สมบูรณ์เป็นไปดังสมการ 2.6 และ 2.7

2.2.1.3 อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนมีค่ามากกว่า 1

เมื่อทำการปรับอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนมีค่ามากกว่า 1 จะพบเปลวไฟ 2 ชั้น เช่นเดียวกันเปลวไฟชั้นในเป็นไปตามสมการที่ 2.3 เปลวไฟชั้นนอกนี้เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากทำให้เปลวไฟชั้นนอกจะไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.4



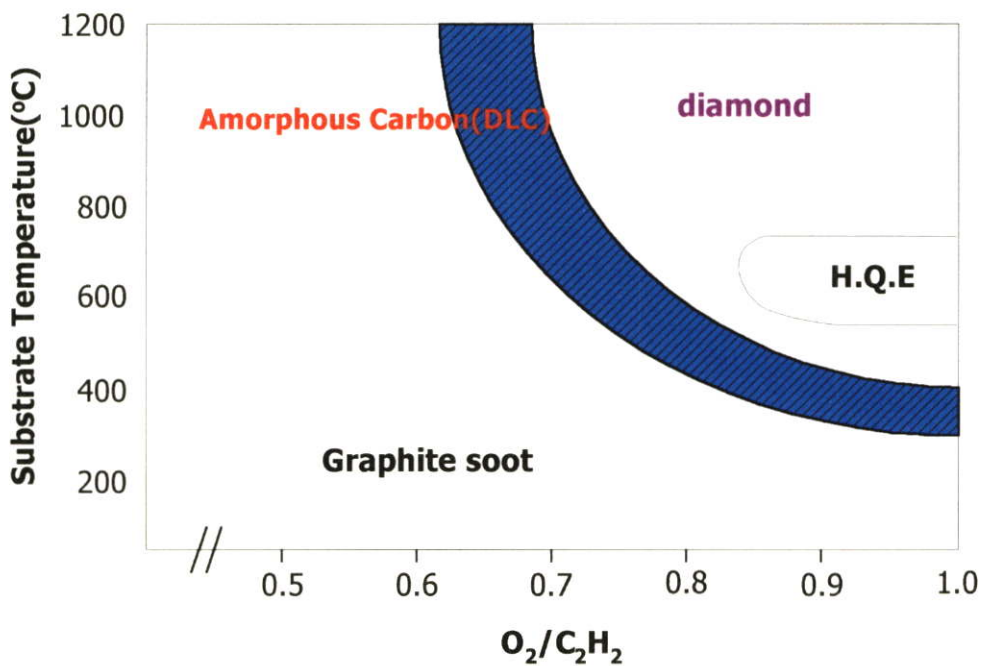
รูปที่ 2.4 แผนภาพเปลวไฟที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนมีค่ามากกว่า 1

2.2.2 อุณหภูมิฐานรอง

อุณหภูมิของเปลวไฟในการเผาไหม้ของก๊าซออกซิเจนต่ออะเซทิลีนประมาณ 3000 °C แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ของเพชรอยู่ระหว่าง 500-1300 °C จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนให้กับฐานรองให้ควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม และจำเป็นต้องควบคุมระยะห่างระหว่างเปลวไฟชั้นในและฐานรองเนื่องจากมีผลต่ออุณหภูมิของเปลวไฟ

2.2.3 การควบคุมตัวแปรในการสังเคราะห์เพชร

จากการศึกษาตัวแปรต่างในการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซและอุณหภูมิของการเกิดผลึกเพชรได้ดังรูปที่ 2.5

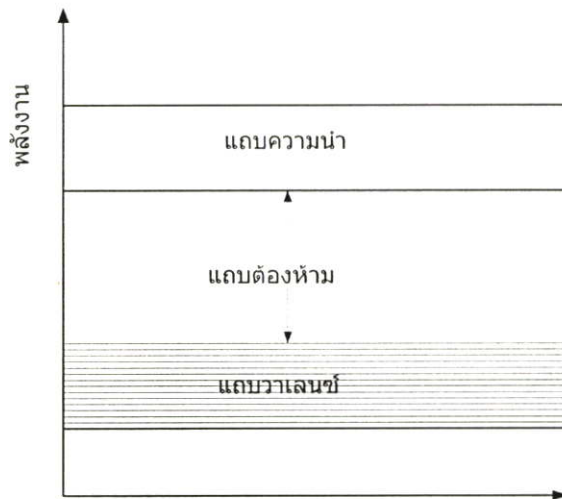


รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยปริมาตรของก๊าซและอุณหภูมิของการเกิดผลึกเพชร

2.3 แถบพลังงานในของแข็ง

เนื่องจากเพชรเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งดังนั้นการจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาทฤษฎีของแถบพลังงานของแข็งเพื่อประโยชน์ในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่ได้จากสารกึ่งตัวนำเพชร โดยผลึกสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์หรือที่ไม่มีการเติมสารเจือ เป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษอย่างยิ่ง เนื่องจากแถบพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนเข้ามาจนเต็ม เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valence band)

แถบพลังงานต้องห้ามที่อยู่เหนือจากแถบนี้โดยปกติจะค่อนข้างแคบ เรียกว่าช่องว่างพลังงานหรือช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap หรือ bandgap) และเหนือจากช่องว่างพลังงานจะเป็นแถบยินยอม (allowed band) อีก แต่โดยปกติที่อุณหภูมิ 0 K แถบนี้จะว่างเปล่าและเรียกว่า แถบนำ (conduction band) รูปร่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K แสดงดังในรูป 2.6 ความกว้างของช่องว่างพลังงานเขียนแทนด้วย $E_g = E_C - E_V$ โดยที่ E_C และ E_V คือระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำและระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ตามลำดับ

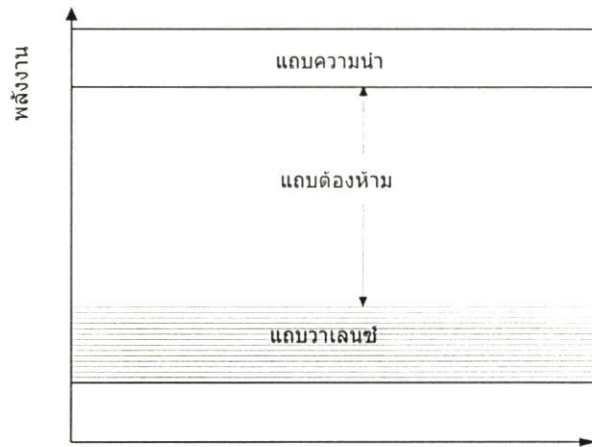


รูปที่ 2.6 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

การป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำ จะไม่ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งนี้เนื่องจากสนามที่ป้อนจะช่วยเร่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (นั่นคือการเพิ่มพลังงานจลน์) อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งนี้จะยังไม่สามารถทำให้อิเล็กตรอนกระโดดข้าม E_g เพื่อไปอยู่ในระดับพลังงานของแถบนำที่ว่างที่สูงขึ้นได้ เนื่องจาก E_g ของสารที่กว้างเกินไป ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหล แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะกระทั้งอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์สามารถได้รับพลังงานความร้อนมากเพียงพอที่จะเอาชนะความกว้างของ E_g แล้วกระโดดเข้าไปอยู่ในแถบนำได้ ในกรณีนี้อิเล็กตรอนที่เข้าไปในแถบนำจะทิ้งโฮล (Hole) ไว้ในแถบวาเลนซ์ทำให้สารกึ่งตัวนำมีพาหะนำกระแส 2 ชนิดคือ อิเล็กตรอนในแถบความนำ และ โฮลในแถบวาเลนซ์ ซึ่งพาหะทั้งสองสามารถถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและทำให้เกิดกระแสไหลในชั้นสาร ดังนั้นจึงเรียกวัดนี้ว่า "สารกึ่งตัวนำ"

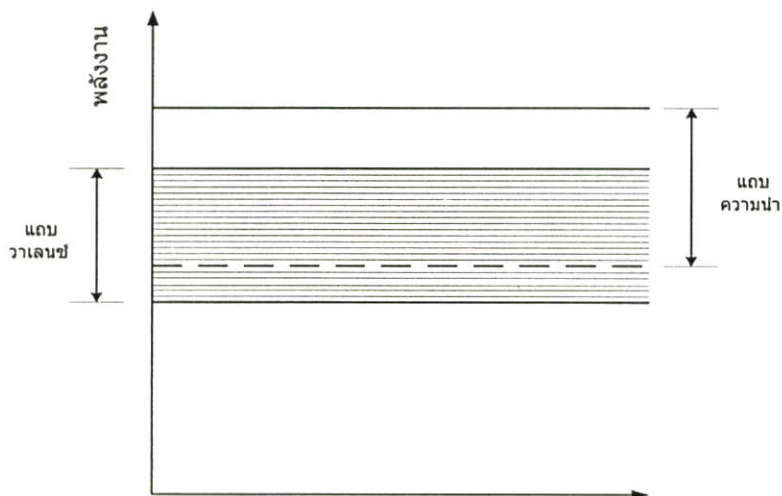
สำหรับวัสดุที่เรียกว่า "ฉนวน" ความกว้างของแถบพลังงานจะมีค่ามากกว่าสารกึ่งตัวนำหลายเท่า ด้วยเหตุนี้ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่ให้กับชั้นสารจะมีค่าสูงจนกระทั่งเกือบถึงจุดหลอมละลายพลังงานความร้อนดังกล่าวก็ยังไม่พอที่จะทำให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ข้าม E_g ไปอยู่

ในแถบความนำได้ ดังนั้นสภาพความต้านทานของสารจึงสูงมาก รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของฉนวน



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแถบพลังงานของฉนวน

สำหรับวัสดุที่เรียกว่า “โลหะ” แถบพลังงานบนสุดจะเกิดการเหลื่อมล้ำกัน (overlap) ดังแสดงในรูป 2.8 จึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบนำแม้ว่า ณ อุณหภูมิที่ต่ำก็ตาม ยังผลให้สารชนิดนี้มีสภาพความนำไฟฟ้าที่สูงมาก



รูปที่ 2.8 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะ

2.4 ระดับเฟอร์มิและความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) และความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นค่าที่สำคัญในคำนวณและประยุกต์ใช้งานสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเพชรที่สังเคราะห์ได้จากวิธี Combustion

Activation CVD ยังคงสามารถสังเคราะห์ได้เพียงสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์หรือสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค (Intrinsic) ดังนั้นในการอธิบายคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นจากทฤษฎีของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ดังนี้

ความหนาแน่นในแถบความนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$n = \int_{\text{แถบความนำ}} S(E) \cdot P(E) dE \quad (2.8)$$

โดย

n = จำนวนอิเล็กตรอนในแถบความนำ

$S(E)$ = ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในช่วงของพลังงานระหว่าง E และ $E+dE$

$P(E)$ = ความหนาแน่นของโอกาสที่อิเล็กตรอนจะสามารถไปอยู่ในสถานะพลังงาน E

ซึ่งค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานสำหรับอิเล็กตรอนอิสระในโลหะคือ

$$S(E) = \frac{8\pi m^{3/2} \sqrt{2E}^{1/2}}{h^3} \quad \text{ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร} \quad (2.9)$$

เมื่อเราพิจารณากับกรณีผลึกสารกึ่งตัวนำค่า m ในสมการจะต้องถูกแทนค่าด้วย m_e^* ซึ่งเป็นค่ามวลที่แท้จริง (effective mass) ของอิเล็กตรอน และใช้ระดับพลังงาน E_g เป็นระดับเปรียบเทียบ ดังนั้น

$$S(E) = \frac{8\pi(m_e^*)^{3/2} \sqrt{2(E - E_g)}^{1/2}}{h^3} = C(E - E_g)^{1/2} \quad (2.10)$$

โดยที่ค่า C คือค่าคงที่ในขณะใดขณะหนึ่ง

โอกาสที่อิเล็กตรอนจะสามารถเข้าไปสู่สถานะพลังงานระดับ E ได้สามารถหาได้จากสมการเฟอร์มิไดเรค (Fermi Dirac) เมื่อแทนค่า $S(E)$ และ $P(E)$ ในสมการที่ 2.10 จะได้ว่า

$$n = C \int_{E_g}^{\infty} \frac{(E - E_g)^{1/2}}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]} \cdot dE \quad (2.11)$$

เนื่องจากค่า $E - E_F$ จะมากกว่าค่า kT มากทำให้ค่าในเทอมเอกโปเนนเชียลมีค่ามากกว่า 1 ทำให้สามารถกลายเป็น

$$n = c \int_{E_g}^{\infty} (E - E_g)^{1/2} \exp[-(E - E_F) / kT] dE \quad (2.12)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตแล้วจะได้ว่า

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp[-(E_g - E_F) / kT] \quad (2.13)$$

เมื่อพิจารณาเทอมของสมการจะมีผลเปลี่ยนแปลงน้อยมาก กับอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเทอมเอกโปเนนเชียลดังนั้นจึงอาจพิจารณาว่า เทอมแรกเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งเขียนแทนด้วย N_C นั่นคือ

$$n = N_C \exp[-(E_g - E_F) / kT] \quad (2.14)$$

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ (p) ซึ่งสามารถคำนวณหาได้โดยวิธีการเช่นเดียวกับกรณีอิเล็กตรอนแต่จะพิจารณาว่าที่ระดับพลังงานที่ซึ่งมีโฮลอยู่คือระดับพลังงานที่ไม่มีอิเล็กตรอน ดังนั้นสามารถเฟอร์มิไดแรคของโฮลคือ

$$\begin{aligned} 1 - P(E) &= 1 - \frac{1}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]} \\ &= \frac{\exp[-(E_F - E) / kT]}{1 + \exp[-(E_F - E) / kT]} \end{aligned} \quad (2.15)$$

สมการนี้จะแสดงถึงโอกาสที่ซึ่งจะพบโฮลที่ระดับพลังงานของ E ในแถบวาเลนซ์ แต่เนื่องจากระดับพลังงาน E ในแถบวาเลนซ์ จะมีระดับต่ำกว่า E_F มาก ทำให้ค่า $(E_F - E) \gg kT$ ดังนั้น $\exp[-(E_F - E)] \ll 1$ สมการจึงอาจเขียนได้ใหม่เป็น

$$1 - P(E) = \exp[-(E_F - E) / kT] \quad (2.16)$$

เช่นเดียวกับค่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์จะสามารถหาได้โดย แทนค่า m_h^* ด้วยมวลที่แท้จริง (effective mass) ของโฮล และที่ระดับพลังงาน E ในแถบวาเลนซ์ถือว่า มีค่า $-E$ เนื่องจากเราสมมุติให้ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์มีระดับพลังงานเป็นศูนย์ดังนั้น

$$S(E) = \frac{8\pi (m_h^*)^{3/2} \sqrt{2}}{h^3} \cdot (-E)^{1/2} \quad (2.17)$$

ดังนั้นค่าความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ มาได้จากการอินทิเกรตผลคูณของสมการ 1-P(E) และ S(E) ตั้งแต่พลังงาน 0 จนถึง ∞ ผลการอินทิเกรตจะได้ว่า

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp(-E_F / kT) \quad (2.18)$$

ซึ่งอาจพิจารณาเทอมแรกของสมการเป็นค่าคงที่ได้ และแทนด้วย ดังนั้น

$$p = N_V \cdot \exp[-E_F / kT] \quad (2.19)$$

และเมื่อนำผลคูณของความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนจะได้สมการที่น่าสนใจคือ

$$n \cdot p = n_i^2 = N_C N_V \exp(-E_g / kT) \quad (2.20)$$

หรือ

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (m_e^* m_h^*)^{3/4} \cdot \exp(E_g / 2kT) \quad (2.21)$$

ซึ่ง n_i คือค่าความหนาแน่นของประจุพาหะชนิดหนึ่งชนิดใดของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก และจากสมการจะเห็นว่า ความหนาแน่นของประจุพาหะใดๆในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกจะไม่ขึ้นอยู่กับค่า E_F และค่า n_i จะมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

2.5 สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) และสภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของสารกึ่งตัวนำ

ปกติประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำจะประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโฮล สำหรับการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในแถบนำจะเกี่ยวข้องกับความเร็วดริฟท์ (drift velocity) ของอิเล็กตรอนอยู่ในสนามไฟฟ้า และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกจำกัดด้วยผลของการเกิดการชนกัน

(scattering) ซึ่งอาจแสดงได้ด้วยค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (electron mobility) μ_e ดังนั้นจะได้ว่า

$$V_{drift} = \mu_e \xi \quad (2.22)$$

โดยที่ V_{drift} คือความเร็วดริฟท์ของอิเล็กตรอน

μ_e คือ สภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอน

ξ คือ สนามไฟฟ้า

จากค่าความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอน J_e หาได้โดย

$$J_e = n \cdot e \cdot V_{drift} \quad (2.23)$$

หรือ

$$J_e = n \cdot e \cdot \mu_e \xi \quad (2.24)$$

เมื่อ n คือค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

เช่นเดียวกัน ค่าความหนาแน่นของกระแสโฮลซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าคือ

$$J_h = p \cdot e \cdot \mu_h \xi \quad (2.25)$$

เมื่อ p คือค่าความหนาแน่นของโฮล

μ_h คือ สภาพคล่องตัวของโฮล

ถึงแม้ว่า ทิศทางของสนามไฟฟ้าหนึ่งจะทำให้ประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่สวนทางกันก็ตาม แต่กระแสไฟฟ้าสมมติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของพาหะทั้งสองจะมีทิศทางเดียวกัน ดังนั้น

$$J_{รวม} = J_e + J_h = e(n\mu_e + p\mu_h) \cdot \xi \quad (2.26)$$

จากสมการความหนาแน่นกระแส $J = \sigma \xi$ โดยที่ σ คือค่าความนำไฟฟ้าและ ξ คือค่าสนามไฟฟ้า ดังนั้น

$$\text{ค่าสภาพความนำไฟฟ้า } \sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \quad (2.27)$$

และจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) $\rho = 1/\sigma$ ดังนั้น

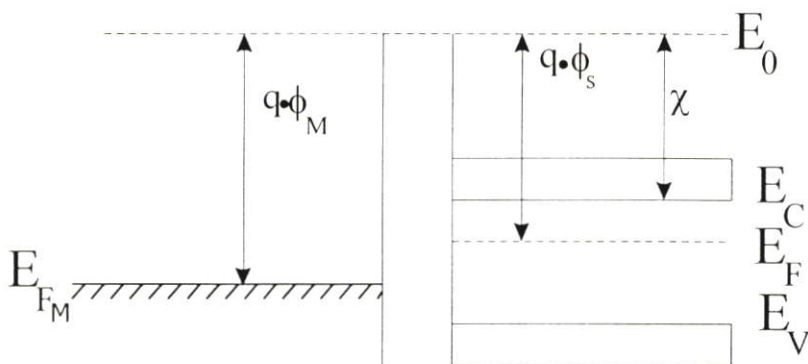
$$\text{ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า } \rho = 1/e(n\mu_e + p\mu_h) \quad (2.28)$$

2.6 รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะ

ในการนำสารกึ่งตัวนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเพชร ก่อนที่จะนำลวดตัวนำมาต่อออกสู่ภายนอกเพื่อใช้งาน ซึ่งการทำผิวสัมผัสแบบนี้เป็นปัญหาที่ละเอียดไม่ได้เนื่องจาก ผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ก็คือรอยต่อประเภทหนึ่งนั่นเอง โดยคุณสมบัติการนำไฟฟ้าสามารถกำหนดได้จากสนามไฟฟ้าที่เกิดระหว่างผิวสัมผัสของคู่วัสดุแต่ละชนิด ซึ่งคุณสมบัตินี้สามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างของระดับพลังงานเฟอร์มิในวัสดุทั้งสอง โดยเมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิดมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทพะจุพาหะระหว่างกันจนกระทั่งระดับเฟอร์มิในวัสดุทั้งสองจะปรับตัวอยู่ในระดับเดียวกัน

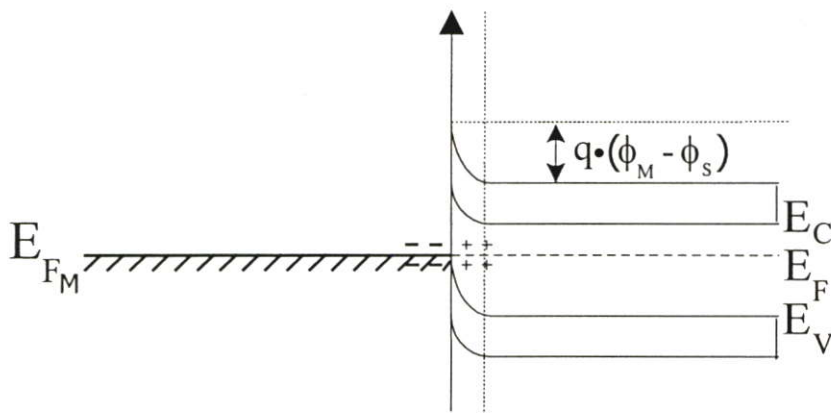
ปกติระดับเฟอร์มิในโลหะจะอยู่ประมาณกลางๆ แถบนำและโดยทั่วไปความนำจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนจะเป็นไปตามรูปแบบการกระจายของ Fermi dirac ดังนั้นในแถบนำจึงมีจำนวนอิเล็กตรอนเพียงเล็กน้อยที่มีพลังงานสูงกว่า E_F ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคิดได้ว่า E_F เป็นค่าพลังงานเฉลี่ยของกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงสุดในโลหะ และการที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสามารถหลุดจากโลหะได้ จะต้องให้พลังงานแก่โลหะอย่างน้อย $q\phi_M$ ซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันงาน (Work function) ซึ่งค่าพลังงานนี้คือความแตกต่างระหว่างระดับสัญญาณภาคและระดับ E_F ของสาร

ในสารกึ่งตัวนำก็เช่นเดียวกัน หากต้องการให้อิเล็กตรอนหลุดจากเนื้อสารก็ต้องมีการให้พลังงานอย่างน้อยที่สุดค่าหนึ่ง แต่เนื่องจากระดับ E_F ในสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในแถบต้องห้ามที่ซึ่งไม่สามารถมีอิเล็กตรอนอยู่ได้ ดังนั้น ในทางปฏิบัติมักใช้ปริมาณที่มีความหมายมากกว่าซึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity, χ) แทนการใช้ค่าฟังก์ชันงานในสารกึ่งตัวนำ $q(\phi_s)$ และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีคือ พลังงานที่ต้องให้แก่สารกึ่งตัวนำเพื่อให้อิเล็กตรอนที่อยู่ล่างสุดของแถบนำ E_C สามารถหลุดจากเนื้อสารได้ (นั่นคือ $\chi = E_C - E_F$)



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก่อนทำผิวสัมผัสโดยที่ $\phi_M > \phi_S$

เมื่อนำโลหะมาทำผิวสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ โดยที่ฟังก์ชันงานทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน จะทำให้มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากวัสดุที่มีค่าฟังก์ชันงานน้อยไปยังวัสดุที่มีฟังก์ชันงานมากกว่า จนในที่สุด ณ สภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มิในวัสดุทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน และ ณ ขณะนี้จะพบว่าเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง โดยที่ค่าความต่างศักย์นี้จะมีค่าเท่ากับค่าความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงานของสาร



รูปที่ 2.10 แสดงแถบพลังงานระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังจากทำผิวสัมผัสแล้ว โดยที่โลหะมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า

ในกรณีนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนย้ายจากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะ ทำให้ด้านโลหะมีประจุลบมากขึ้น สำหรับด้านสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสูญเสียอิเล็กตรอนไป ทำให้มีการสะสมของไอออนบวกที่เคลื่อนที่ไม่ได้อยู่ภายในเขตปลอดพาหะซึ่งอยู่ใกล้ผิวสัมผัส ซึ่งจะทำให้อะไรระหว่าง E_C ถึง E_F ภายในสารกึ่งตัวนำบริเวณใกล้ผิวสัมผัสเกิดการโค้งงอขึ้น และกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำจะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

ความกว้างของเขตปลอดพาหะที่เกิดในสารเอ็นจะขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของสารเจือที่เติม และโดยทั่วไปความเข้มข้นของสารเจือนี้จะมีค่าน้อยกว่าจำนวนสถานะพลังงานยินยอมและความเข้มข้นอิเล็กตรอนที่อยู่แถวๆ E_F ในโลหะ ด้วยเหตุนี้จึงถือว่าไม่มีการขยับของระดับ E_F ในโลหะ (หรือละเอียดการขยับของ E_F) แต่จะถือว่าการขยับของระดับ E_F และการโค้งงอของแถบพลังงานจะเกิดขึ้นเฉพาะในด้านสารกึ่งตัวนำ โดยความต่างศักย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในสารเอ็นจะถูกกำหนดโดยตัวแปร $q(\phi_M - \phi_S)$

เมื่อผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ ความต่างศักย์จะมีค่า $\phi_M - \phi_S$ และเขตปลอดพาหะจะไม่ขยายอีกต่อไปเนื่องจากไม่มีพาหะสุทธิไหลข้ามรอยต่อ ดังนั้น ขณะนี้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะข้ามไปโลหะได้ต้องข้ามกำแพงพลังงานศักย์ที่สูงเท่ากับ ความแตกต่างของฟังก์ชันงานของสารทั้งสองชนิด ส่วนอิเล็กตรอนในด้านโลหะจะสามารถข้ามมายังสารกึ่งตัวนำได้ต้องเอาชนะกำแพงศักย์ที่มีความสูงเท่ากับ

$$\phi_B = \phi_M - \phi_S + [(E_C - E_F)/q] = \phi_M - (\chi/q) \quad (2.29)$$

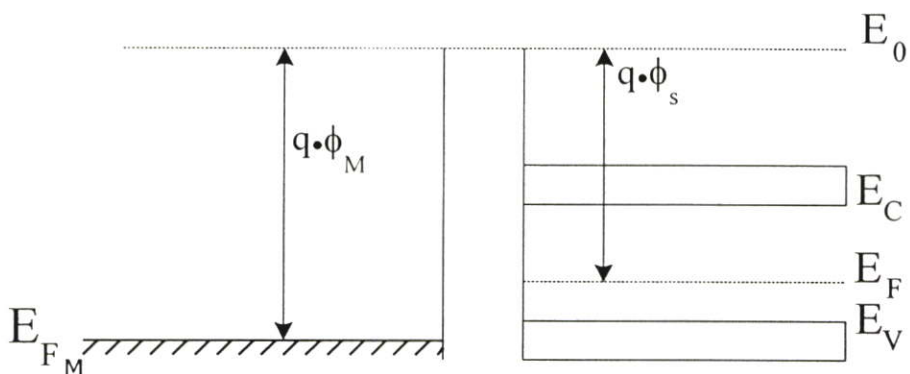
เมื่อมีการป้อนแรงดันย้อนกลับ $-V_a$ ให้กับรอยต่อ (โดยที่ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีศักย์สูงกว่า) จะทำให้กำแพงพลังงานศักย์ทางด้านเอ็นถูกดึงยี่ดลงมาเมื่อเทียบกับทางด้านโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนในแถบนำจะป็นข้ามกำแพงศักย์เพื่อเข้าไปในโลหะได้ยากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนข้ามกำแพงศักย์นี้ไป ในทางตรงข้าม อิเล็กตรอนในโลหะยังคงพบกำแพงศักย์ที่จะป็นข้ามเพื่อเข้าไปในสารกึ่งตัวนำด้วยความสูง ϕ_B คงเดิม ยังผลให้จำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากโลหะไปสารกึ่งตัวนำมีปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงจากสภาวะสมดุล ดังนั้นจึงเกิดกระแสรั่วข้ามรอยต่อในปริมาณเล็กน้อย และกระแสนี้จะขึ้นกับ ϕ_B แต่ไม่ขึ้นกับ $-V_a$

การป้อนไบแอสไปหน้า $+V_a$ ให้กับผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีศักย์น้อยกว่า) จะทำให้กำแพงพลังงานศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำลดลง ยังผลให้พาหะข้างมาก (อิเล็กตรอน) สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ไปยังโลหะได้ง่ายขึ้น และกระแสอันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนส่วนนี้จะมีความมาก สำหรับอิเล็กตรอนในโลหะยังคงต้องเอาชนะกำแพงศักย์ ϕ_B เท่าเดิม เพื่อที่จะข้ามมาในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นกระแสอันเกิดจากอิเล็กตรอนส่วนนี้จะมีปริมาณน้อย ด้วยเหตุนี้ จึงมีกระแสไหลจากสารกึ่งตัวนำเข้าไปในโลหะในปริมาณสูง

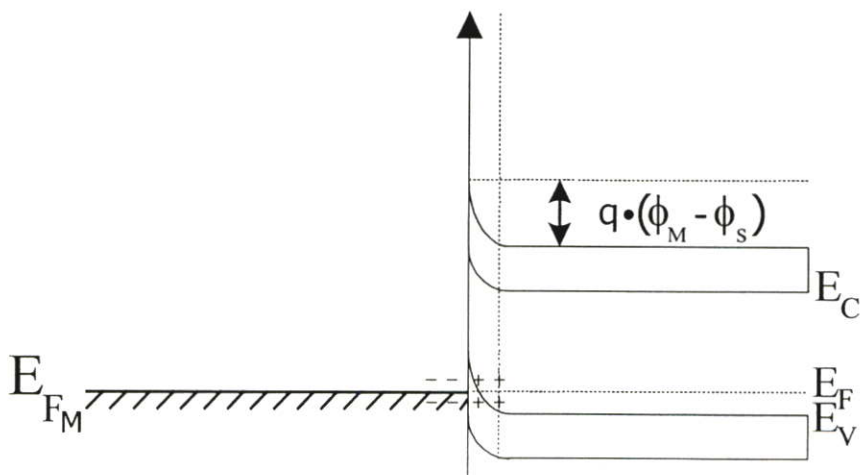
จะเห็นว่ามีกระแสรั่วน้อยมาก และผิวสัมผัสแบบนี้เรียกว่า ผิวสัมผัสแบบเรกติไฟด์ (Rectifying contact) ซึ่งคุณสมบัติคล้ายรอยต่อ พี-เอ็น และสิ่งประดิษฐ์ที่ประยุกต์ใช้งานจากผิวสัมผัสแบบนี้เรียกว่า ซอตตกีไดโอด (Schottky diode or metal semiconductor diode) นอกจาก

นี้ยังสามารถประดิษฐ์ไดโอดที่มีลักษณะเหมือนดังที่กล่าวมาได้เช่นกัน โดยทำผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพีและโลหะ โดยมีเงื่อนไขเป็น $\phi_M < \phi_S$

กรณีที่ต้องการทำผิวสัมผัสระหว่างสิ่งประดิษฐ์หรือต่อสิ่งประดิษฐ์ด้วยลวดตัวนำเพื่อไปประยุกต์ใช้งานภายนอก มักจะไม่ต้องการทำผิวสัมผัสแบบเรกติไฟด์ แต่ผิวสัมผัสที่ต้องการสร้างขึ้นนี้ต้องเป็นไปตามกฎของโอห์ม คือยอมให้กระแสไหลผ่านผิวสัมผัสได้ดีพอๆ กันทั้ง 2 ทิศทาง นอกจากนี้ผิวสัมผัสดังกล่าวควรมีความต้านทานต่ำด้วย และเรียกผิวสัมผัสชนิดนี้ว่า ผิวสัมผัสแบบโอห์มิก (Ohmic contact) ซึ่งสามารถทำผิวสัมผัสชนิดนี้ได้โดย การนำโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานมากกว่ามาต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (หรือนำโลหะที่มีฟังก์ชันงานน้อยกว่ามาต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ดังแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ก่อนทำผิวสัมผัสโดยที่ $\phi_M > \phi_S$



รูปที่ 2.12 แถบพลังงานระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังจากทำผิวสัมผัสแล้ว โดยที่โลหะมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า

เมื่อทำการต่อโลหะเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับเฟอร์มิของโลหะจะอยู่ต่ำกว่าระดับ E_V ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะมีพลังงานสูงพอที่จะเคลื่อนเข้ามาในโลหะ หรืออาจกล่าวในลักษณะการขนส่งของโฮล โฮลจะแพร่เข้ามาจากโลหะมายังแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเพื่อทำให้ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจัดตัวอยู่ในระดับเดียวกัน และในสภาวะสมดุล สารพีจะได้รับโฮลเพิ่มทำให้บริเวณใกล้ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำมีความเป็นพีมากขึ้น ซึ่งเป็นการสะสมของพาหะข้างมาก จะเห็นว่าไม่มีกำแพงศักย์สำหรับประจุข้างมาก (โฮล) ดังนั้นผิวสัมผัสจึงมีความต้านทานต่ำ และกระแสไหลได้ดีพอๆกันทั้งสองทิศทาง

ดังนั้นการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำจึงจำเป็นต้องพิจารณาฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งตารางที่ 2.1 แสดงฟังก์ชันงานของโลหะ ϕ_M ชนิดต่างๆ ที่น่าสนใจ

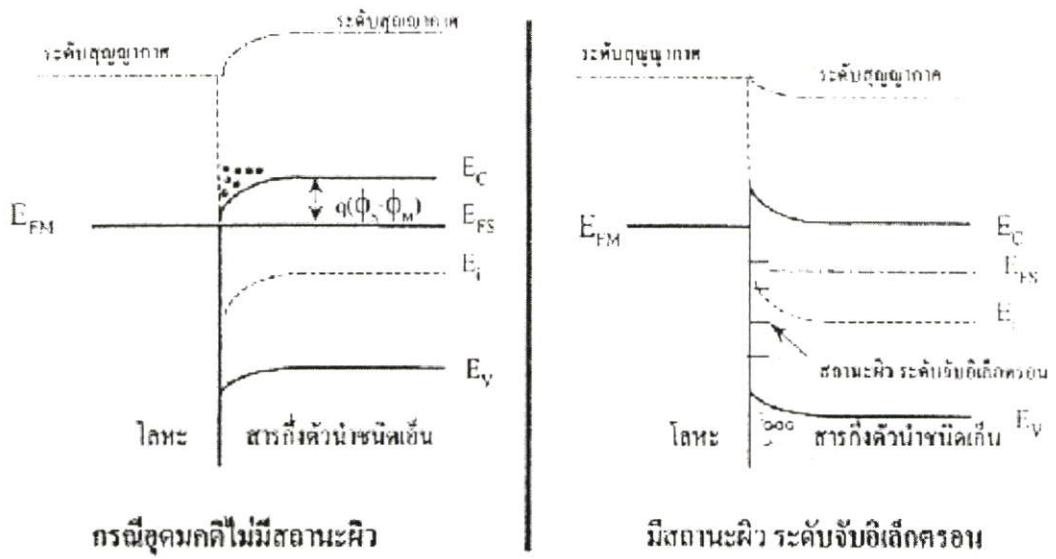
ตารางที่ 2.1 ฟังก์ชันงานของโลหะชนิดต่างๆ

โลหะ	ϕ_M (eV)
Pt	5.24
Ni	4.84
Au	4.58
Cu	4.47
Sn	4.11
Zn	3.74
Ti	3.76
Al	3.74
Ag	4.28
Ta	4.12
In	4.12

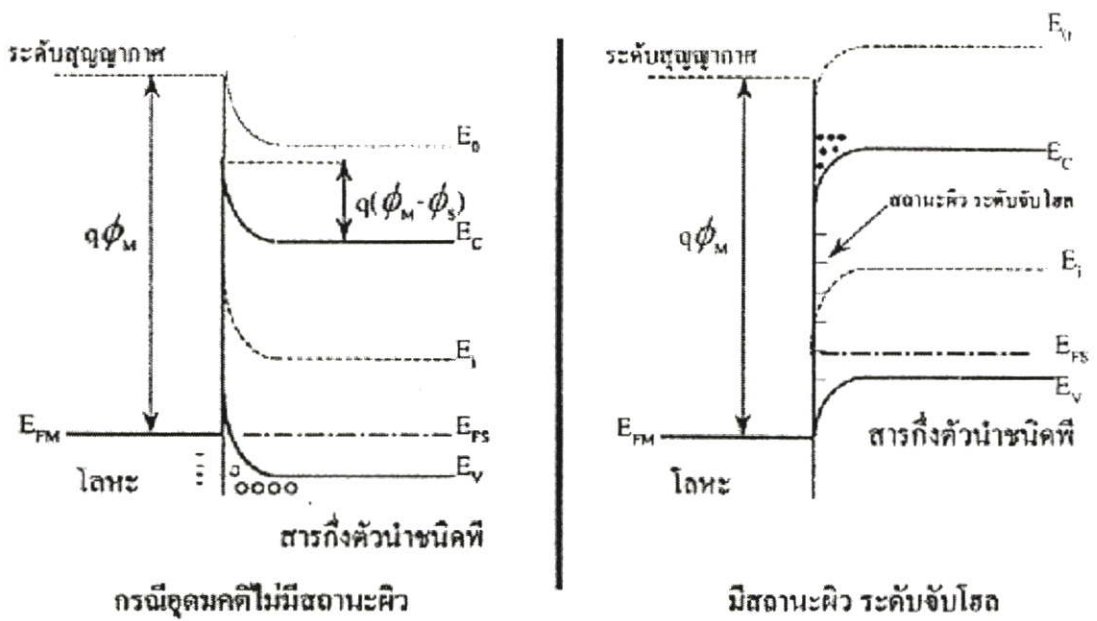
2.7 สถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส (Surface states)

จากหัวข้อที่ผ่านมาเราได้วิเคราะห์คุณสมบัติของรอยสัมผัสในอุดมคติระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยพิจารณาว่าผิวของโลหะและสารกึ่งตัวนำมีการเชื่อมกันอย่างสมบูรณ์ ระหว่างอะตอมกับอะตอม โดยไม่มีการบกพร่อง (defect) ใดๆเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส และไม่มีอะตอมแปลกปลอมอื่นและประจุไฟฟ้าใดๆอยู่ที่ผิวสัมผัสของสารทั้งสอง ในกรณีอุดมคตินี้สามารถสรุปได้ว่า รอยสัมผัสจะมีคุณสมบัติเป็นเรกติไฟด์ หรือแบบโอห์มิก จะขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำและค่า

เปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ข้อสังเกตดังกล่าวไม่อาจใช้ได้ เพราะไม่สามารถสร้างรอยสัมผัสในทางอุดมคติได้อย่างแท้จริง แม้ว่าจะมีการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงก็ตาม เนื่องจากมีความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสเกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่นในกรณีของโลหะและซิลิคอน จะพบว่าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารทั้งสอง จะมีชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บางๆราว 5 อังสตรอม ถึง 2.5 อังสตรอมกันอยู่เสมอ เนื่องจากผิวของซิลิคอนสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย นอกจากนี้แล้วอาจมีอะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรือ ประจุไฟฟ้าใดๆ ปะปรายที่บริเวณรอยสัมผัส สาเหตุดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดมีระดับพลังงานปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานบริเวณผิวสัมผัส ระดับพลังงานนี้ถูกเรียกว่า “ สถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส ” (Surface states) ระดับพลังงานนี้จะมีคุณสมบัติและทำหน้าที่เป็น ระดับจับอิเล็กตรอน (Electron trapped) หรือ ระดับจับโฮล (Hole trapped) หรือเป็น ศูนย์กลางการรวมตัว (Recombination center) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ ผลของสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัสจะทำให้คุณสมบัติที่รอยต่อแตกต่างไปจากกรณีอุดมคติ ผลจากการวิเคราะห์หึ่งอาจใช้ไม่ได้ เช่นการคำนวณขนาด ความสูงของกำแพงศักย์อาจผิดพลาด จำเป็นต้องใช้วิธีการวัดจากสภาพความเป็นจริง ถ้าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัสซึ่งมีคุณสมบัติเป็นระดับจับอิเล็กตรอน ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในบริเวณผิวสัมผัสจะมีค่าลดลงน้อยกว่าเดิม และขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส ทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปจากที่คาดไว้ และยิ่งสถานะผิวมีปริมาณสูงมากอาจทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสมีลักษณะตรงข้ามจากที่คาดไว้ได้ ดังแสดงดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 ซึ่งเป็นผลของระดับจับอิเล็กตรอน และระดับจับโฮล ตามลำดับดังนั้น ในทางปฏิบัติความหนาแน่นของสถานะผิวจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ในการกำหนดคุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ความแม่นยำในการควบคุมความหนาแน่นสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส จะทำให้สามารถกำหนดคุณสมบัติของรอยสัมผัสได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2.13 ผลของสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส (Surface states) ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้น โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่มีคุณสมบัติเป็นระดับจับอิเล็กตรอน (Electron Trapped)



รูปที่ 2.14 ผลของสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส (Surface states) ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้น โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่มีคุณสมบัติเป็นระดับจับโฮล (Hole Trapped)

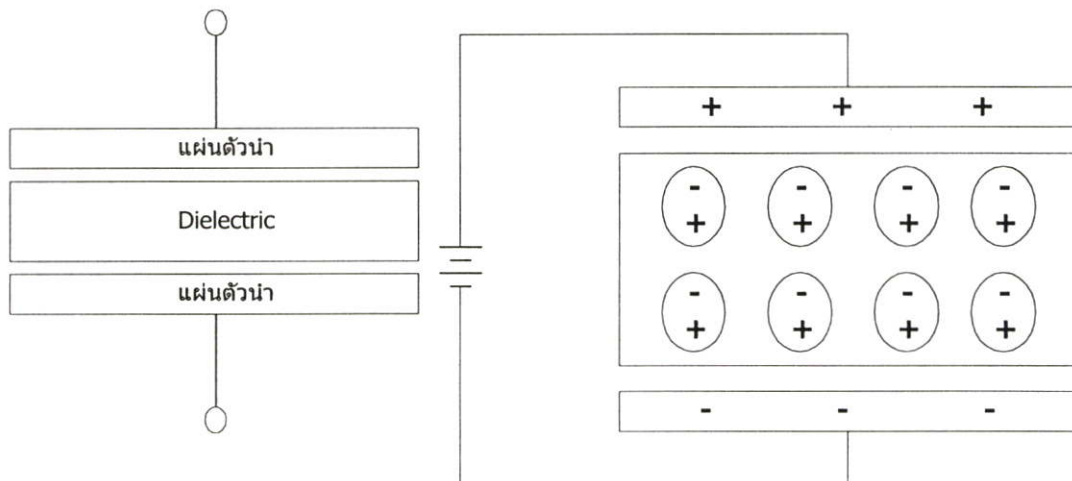
2.8 หลักการของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

สร้างเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำหน้าที่สะสมหรือคายพลังงานในรูปสนามไฟฟ้า ซึ่งตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะใช้ความจุไฟฟ้า (Capacitance) เป็นตัวบอกคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยเป็นตัวบอกความสามารถในการเก็บประจุ ถ้ากำหนดว่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างตัวนำทั้งสอง และมีความแตกต่างกัน V โวลต์ เมื่อมีประจุบวก Q คูลอมป์ อยู่บนตัวนำตัวหนึ่ง และมีประจุลบ ปริมาณเท่ากันอยู่บนตัวนำอีกตัวหนึ่งแล้วตัวเก็บประจุจะมีความจุเท่ากับ

$$C = Q/V \quad (2.30)$$

โดยที่ C เป็นสัญลักษณ์ของปริมาณความจุไฟฟ้า

ในหน่วยของ SI แล้ว ความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็น ฟารัด (Farad) สัญลักษณ์คือ F แต่เนื่องจากค่าฟารัดนี้มีขนาดใหญ่มาก เมื่อเทียบกับค่าความจุที่ใช้กันโดยทั่วไป ดังนั้นโดยทั่วไปจึงพบในหน่วยไมโครฟารัด (microfarad, μF) และพิโคฟารัด (picofarad, pF) ตัวเก็บประจุโดยพื้นฐานจะมีโครงสร้างประกอบไปด้วยแผ่นโลหะตัวนำ 2 แผ่น วางประกบกันและคั่นกลางด้วยฉนวนโดยฉนวนที่กั้นอยู่ระหว่างเพลต เรียกว่า ไดอิเล็กตริก (Dielectric) หรือที่เรียกว่า ตัวเก็บประจุ แบบแผ่นโลหะตัวนำขนาน (Parallel-Plate Capacitor)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะตัวนำ

จากรูป 2.15 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุ อิเล็กตรอนของแผ่นโลหะตัวนำด้านบนจะถูกดึงไปที่ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟแล้ววิ่งผ่านแหล่งจ่ายไฟไปยังขั้วลบซึ่งต่ออยู่กับแผ่นโลหะตัวนำด้านล่าง เนื่องจาก อิเล็กตรอนที่หลุดไปจากแผ่นโลหะตัวนำด้านบนถูกรับไปโดยแผ่นโลหะตัวนำด้านล่าง ดังนั้นจำนวนของประจุ Q จะมีค่าเท่ากับทั้ง 2 แผ่นโลหะตัวนำ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในการเก็บสะสมประจุ จะต้องมามีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้านี้ ซึ่งงานที่เกิดขึ้นจะถูกเก็บเป็นพลังงานไว้ในตัวเก็บประจุ

สำหรับตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะตัวนำขนานนั้นจะสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าได้จากสูตรต่อไปนี้

$$C = \epsilon A/d \quad (2.31)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ของแผ่นโลหะตัวนำแผ่นใดแผ่นหนึ่ง มีหน่วยเป็นตารางเมตร , d เป็นความหนาของไดอิเล็กทริก และ เป็นค่าเพอร์มิตติวิตีของสารไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นฟารัด/เมตร (F/m)

จากความสัมพันธ์ของสมการพบว่า ตัวเก็บประจุจะมีค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้นเมื่อความหนาของไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงแต่ค่าความหนาของไดอิเล็กทริกจะมีค่าน้อยที่สุดที่ค่า ๆ หนึ่งที่เมื่อป้อนแรงดันใช้งานสูงสุดแล้ว แผ่นไดอิเล็กทริกยังไม่เกิดความเสียหาย เนื่องจากความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

ค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ) จะสัมพันธ์กับโครงสร้างในระดับอะตอมของสารไดอิเล็กทริก เมื่อพิจารณารูปที่ 2.15 ประจุบนแผ่นตัวนำทั้งสองของตัวเก็บประจุจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่อะตอมของไดอิเล็กทริกมีผลทำให้ประจุลบลไปอยู่รวมกันที่ผิวด้านบนของสารไดอิเล็กทริก และประจุบวกไปอยู่รวมกันที่ด้านล่างของไดอิเล็กทริก การจัดประจุดังกล่าว เพื่อทำให้เกิดการเป็นกลางเพื่อที่จะสามารถเก็บประจุได้มากขึ้นโดยที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน

ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศแทนด้วยสัญลักษณ์ ϵ_0 มีค่า 8.85 pF/m ซึ่งค่า เพอร์มิตติวิตีของสารต่างจะมีความสัมพันธ์กับค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศนี้ด้วยองค์ประกอบค่าหนึ่งที่เราเรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectetric Constant) หรือ ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) แทนด้วย ϵ_r ซึ่งสามารถเขียนสรุปอยู่ในรูปสมการ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.32)$$

ดังนั้น จากสมการที่ 2.31

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A/d \quad (2.33)$$

เมื่อพิจารณางานที่สะสมในตัวเก็บประจุสามารถแสดงได้โดยสมการ

$$W_c = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.34)$$

โดยที่ W_c คือ ค่าพลังงานที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็น จูล จะสังเกตได้ว่ากำลังที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับกระแสภายในตัวเก็บประจุ

และค่าต้านทานไฟลลับ (X_c) ของตัวเก็บประจุในอุดมคติมีค่าดังสมการ

$$X_c = 1/(2\pi fC) \text{ (โอห์ม)} \quad (2.35)$$

บทที่ 3

กระบวนการทดลอง

3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถได้บนฐานรองที่มีไซเพอร์ได้หลายชนิดด้วยกัน เช่น Si, Sic, Wc ,W , Mo, Cu และ Al_2O_3 แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้ฐานรองที่เป็น Si ระบาย (100) เนื่องจาก Si เป็นวัสดุที่มีใช้ในห้องวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นที่ยอมรับในการนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ อย่างไรก็ตามก่อนการนำฐานรอง Si มาใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จะต้องมีการบวนการในการเตรียมฐานรองด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้

3.1.1 การทำความสะอาดฐานรอง Si (Initial Cleaning)

- ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water, Di) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic)
- ล้างด้วยน้ำ DI
- กัดผิวหน้าด้วยกรดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัด SiO_2 ที่เกิดบริเวณผิวหน้าของแผ่น Si
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้าของแผ่น Si
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในน้ำ DI เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มใน Trichloroethylene เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วย อะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วย DI
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

กระบวนการเหล่านี้จะทำให้ฐานรอง Si มีความพร้อมในการนำไปใช้งาน แต่ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเราต้องนำฐานรองที่ทำความสะอาดแล้วนี้ไปเตรียมพื้นผิวของฐานรอง เพื่อกระตุ้นให้เกิดนิวเคลียสของเพชรเร็วขึ้น ซึ่งการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง Si มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกการเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดฐานรองด้วยครีมเพชร ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมพื้นผิวซึ่งเป็นที่ยอมรับในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เนื่องจากความสะอาดและง่ายในการเตรียมฐานรอง

3.1.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยการขัดด้วยครีมเพชร

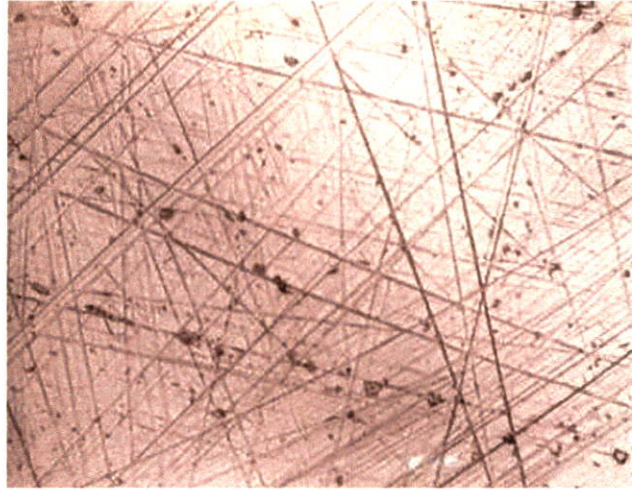
การเตรียมฐานรองด้วยวิธีการนี้จะให้ครีมเพชรที่มีผงเพชรขนาด 5 μm ขัดผิวหน้าของแผ่น Si ซึ่งใช้เวลาในการขัดประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากขัดพื้นฐานรอง Si จะพบว่าเกิดรอยขีดข่วนที่บริเวณผิวหน้าของแผ่น Si โดยขนาดของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของครีมเพชรที่ใช้



รูปที่ 3.1 ลักษณะตัวอย่างของครีมเพชรที่ใช้ในการขัดฐานรองซิลิคอน

ภายหลังจากการเตรียมพื้นผิวโดยการขัดด้วยครีมเพชร จำเป็นจะต้องทำความสะอาดพื้นผิว Si อีกครั้งหนึ่ง โดยมีกระบวนการ ดังต่อไปนี้

- อุลตราโซนิกฐานรอง Si ใน Trichloroethylene เป็นเวลา 10 นาที
- อุลตราโซนิกในอะซีโตน เป็นเวลา 10 นาที
- อุลตราโซนิกในน้ำ DI เป็นเวลา 10 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

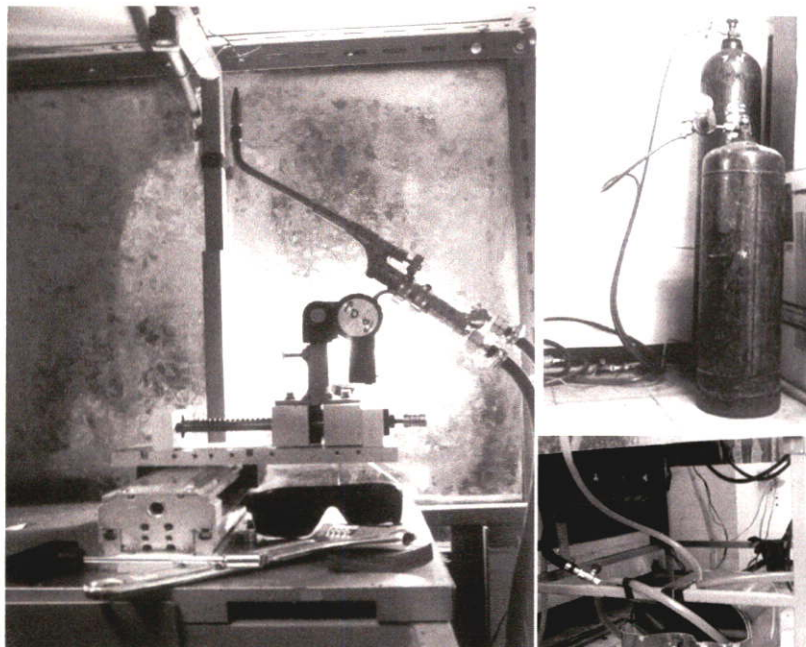


รูปที่ 3.2 ลักษณะผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวโดยการกัดด้วยครีมเพชรขนาด $5\ \mu\text{m}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

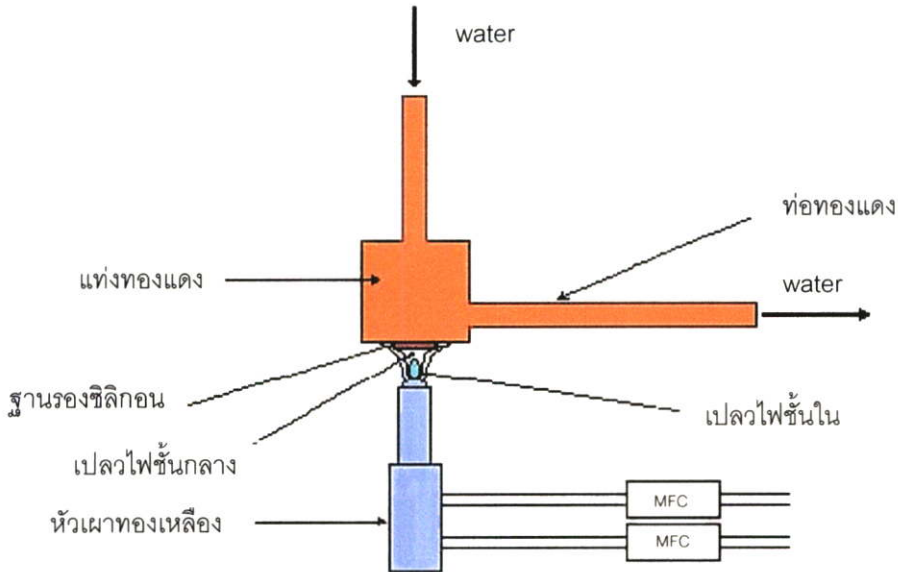
ภายหลังจากการทำความสะอาดพื้นผิวของฐานรอง Si ที่ทำการกัดโดยครีมเพชรเรียบร้อยแล้ว จึงทำการตัดแบ่งแผ่นซิลิคอนให้มีขนาดต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD

ในการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Combustion Activation จะจัดชุดทดลองดังแสดงใน รูปที่ 3.3 ซึ่งมีส่วประกอบต่างๆซึ่งสามารถอธิบายด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ชุดทดลองการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Combustion Activation CVD



รูปที่ 3.4 แผนภาพการจัดชุดทดลองการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Combustion Activation CVD

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD ไม่จำเป็นต้องทำปฏิกิริยาในแชมเบอร์ และทำงานได้ที่ความดันบรรยากาศ ระบบประกอบด้วยแหล่งจ่ายเป็นก๊าซอะเซทิลีนที่มีความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์ ฐานรองที่ใช้เป็นซิลิคอนโดยติดตั้งบนตัวยึดฐานรองที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำผ่านท่อทองแดง การสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD มีเงื่อนไขการสร้างดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการสร้างฟิล์มเพชรโดยวิธีการ Combustion Activation CVD

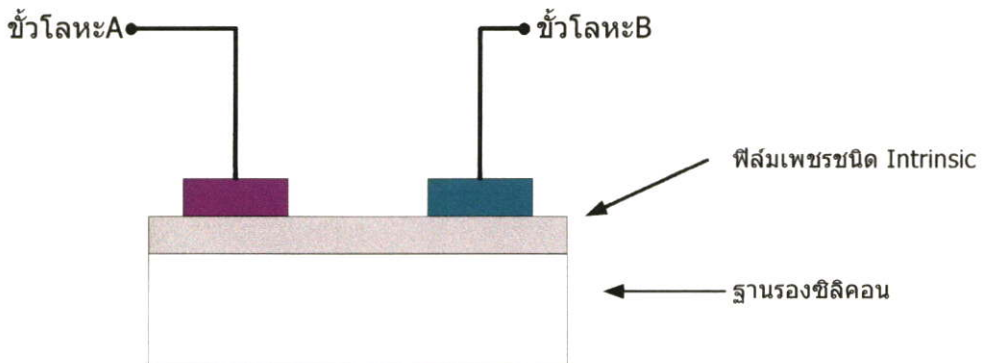
ความดัน	บรรยากาศ
แหล่งจ่ายก๊าซ	อัตราส่วนโดยปริมาตรก๊าซออกซิเจนกับก๊าซอะเซทิลีนระหว่าง 0.80-0.98
- ออกซิเจน (O_2)	ก๊าซออกซิเจน 99.95% อัตราการไหล 140-950 cc/min
- อะเซทิลีน (C_2H_2)	ก๊าซอะเซทิลีน 99.95% อัตราการไหล 200-1,000 cc/min
ฐานรอง	ซิลิคอน (Si) ชัดด้วยครีมเพชร
อุณหภูมิฐานรอง	700-800 °C
ตำแหน่งเพลวไฟ	เพลวไฟชั้นกลาง
เวลาในการทดลอง	20 และ 30 นาที

หลังจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จำเป็นต้องนำชิ้นงานไปทำความสะอาด เพื่อกำจัดส่วนของคาร์บอนที่มีโซโครงสร้างเพชรโดยวิธีการดังต่อไปนี้

- ต้มในสารละลายอิมิตัว CrO_3 กับ H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 170 องศา เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยสารละลายเดือด H_2O_2 และ 30 % NH_4OH ในอัตราส่วน 1: 1
- ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งชิ้นงานด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.3 กระบวนการสร้างและการทดสอบคุณสมบัติขั้วโลหะ

เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำเชื่อมต่อกัน จำเป็นต้องพิจารณาฟังก์ชันงานของโลหะ และระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากมีผลสัมพัทธ์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ นั่นคือรอยต่อประเภทหนึ่งนั่นเอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะชนิดต่างกับสารกึ่งตัวนำเพชรเช่นเดียวกัน โดยนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD ที่ทำความสะอาดแล้ว มาทำขั้วโลหะดังรูปที่ 3.5

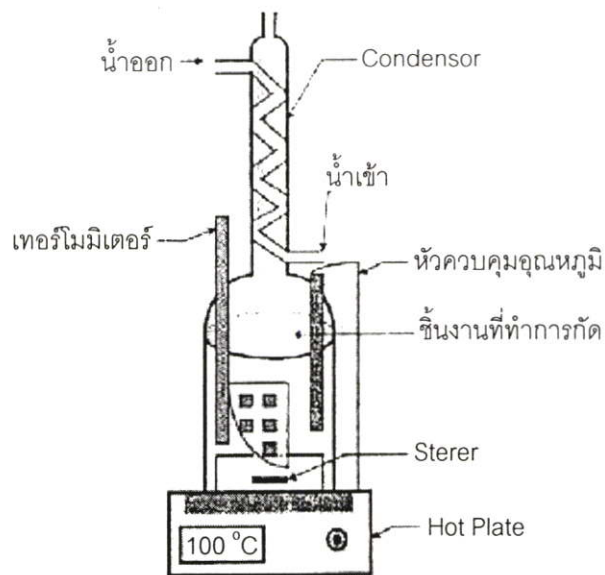


รูปที่ 3.5 กระบวนการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะชนิดต่างกับสารกึ่งตัวนำเพชร

จากรูป 3.4 ขั้ว A เป็นขั้วโลหะทองคำซึ่งสร้างโดยกระบวนการเคลือบในสุญญากาศ และ ขั้ว B เป็นขั้วของโลหะชนิดต่างที่ต้องการทดสอบ โดยจะทำการทดสอบด้วยโลหะ ทอง (Au), อะลูมิเนียม (Al) และ กาวเงิน (Silver paste) ซึ่งขั้วโลหะทองคำและอะลูมิเนียมสร้างด้วยวิธีการเคลือบในสุญญากาศ และขั้วกาวเงินใช้คุณสมบัติการยึดติดของกาวเงิน โดยพื้นที่ของขั้วโลหะมีขนาด 1 mm^2

3.4 กระบวนการกระตุ้นฐานรองซิลิคอนออกจากฟิล์มเพชร

กระบวนการ Combustion Activation CVD สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอน แต่ในบางครั้งในการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรทางอิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องทำการแยกฐานรองซิลิคอนออกจากฟิล์มเพชร โดยใช้สารละลาย โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ตามอัตราส่วนดังนี้ คือ KOH ความเข้มข้น 4 โมลาร์ (1 โมลของ KOH เท่ากับ 56.1056 กรัม) กัดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอัตราการกัดประมาณ 1.6 ไมครอน/นาที กวนสารด้วยความเร็ว 100 รอบ/นาที โดยรูปชุดเครื่องมือการกัดซิลิคอนแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชุดเครื่องมือการกัดแผ่นซิลิคอนด้วย KOH

ในการทดลองจะใช้น้ำ DI 150 cc เพื่อให้ท่วมชิ้นงานพอดี ดังนั้นจากการคำนวณ			
KOH 1 โมล	=	56.1056	กรัม
KOH 4 โมลาร์ (โมลต่อลิตร)	=	56.1056 x 4	กรัมต่อลิตร
	=	224.4224	กรัมต่อลิตร
น้ำ DI	=	0.15	ลิตร
ดังนั้นต้องใช้ KOH	=	0.15 x 224.4224	กรัม
	=	33.663	กรัม

ดังนั้นจึงใช้ KOH 34 กรัมผสมกับน้ำ DI 150 cc.

3.5 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM (Scanning Electron Microscope) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงาน ที่มีขนาดเล็กกว่า ไมครอน (μm) โดย SEM มีกำลังขยาย 50-100,000 เท่า โดยมีหลักการทำงานโดยการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของลำอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดถึง 10-20 μm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนมีความสำคัญต่อความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือ ความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ถูกปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-Ray Tube)

เมื่อพิจารณา การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค SEM จะพบข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับเทคนิค Optical microscope ชนิดอื่น ๆ คือ SEM มีการแสดงผลเป็นแบบสามมิติ มีกำลังขยายสูง ความคมชัดของภาพสูง ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และหากเปรียบเทียบกับ TEM (Transmission Electron Microscopy) ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะต้องมีความบางมาก ๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านไปได้

ในการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีความนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค SEM สามารถวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อนการวิเคราะห์ แต่ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่มีความนำไฟฟ้า ก่อนการวิเคราะห์ต้องนำไปเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าก่อน โดยทั่วไปนิยมใช้ทองคำหรือคาร์บอน ด้วยเหตุนี้ ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง Si สามารถที่จะวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค SEM โดยมีต้องนำไปเคลือบชั้นบางของทองคำหรือคาร์บอนในขณะที่ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานของ SiO_2 ต้องทำการเคลือบทองคำก่อนนำไปวัดด้วย SEM

3.6 กระบวนการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้การกระเจิงของแสง โดยใช้หลักการที่ว่า ความเข้มของลำแสงที่วัดได้จะมีค่าลดลงเมื่อผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน ผลของ Raman เป็นชนิดหนึ่งของปรากฏการณ์การกระเจิงของโมเลกุล มีพื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงแบบไม่ยืดหยุ่นจากปฏิกิริยาของโฟตอนจากการสั่นของโครงสร้างหรือโฟนอน การกระเจิงของ Raman ออรัลเซอร์ความยาวคลื่นเดียวในการกระตุ้นทำให้เกิดคู่ของโฟตอนผ่านการโฟลาไรซ์ซึ่งเหนี่ยวนำขึ้นในผลึก โดยสนามไฟฟ้าของความเข้มแสง ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$P = \alpha \xi \quad (3.1)$$

เมื่อ P คือ โมเมนต์สนามเหนี่ยวนำ

α คือ polarizability

ξ คือ สนามไฟฟ้า

การสั่นของโครงสร้างผลึกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแบบโพลาไรซ์จะเป็นการกระตุ้นแบบ Raman โฟตอนบางตัวจะถูกปล่อยออกจากการสั่นของไดโพล ซึ่งมีทั้งที่มีความถี่เหมือนกับลำแสงตกกระทบ (Elastic Rayleigh Scattering) หรือเป็นความถี่ที่เลื่อนออกไปโดยมีค่าความถี่การสั่นของโครงสร้าง (inelastic Stokes or anti-Stokes scattering)

$$P = \alpha_0 \xi_0 \cos(2\pi\nu_0 t) + 1/2[\xi_0 \sum \alpha_n \{\cos 2\pi(\nu_0 - \nu_n)t + \cos 2\pi(\nu_0 + \nu_n)t\}] \quad (3.2)$$

เมื่อ ξ_0 คือ สนามไฟฟ้าของลำแสงตกกระทบ

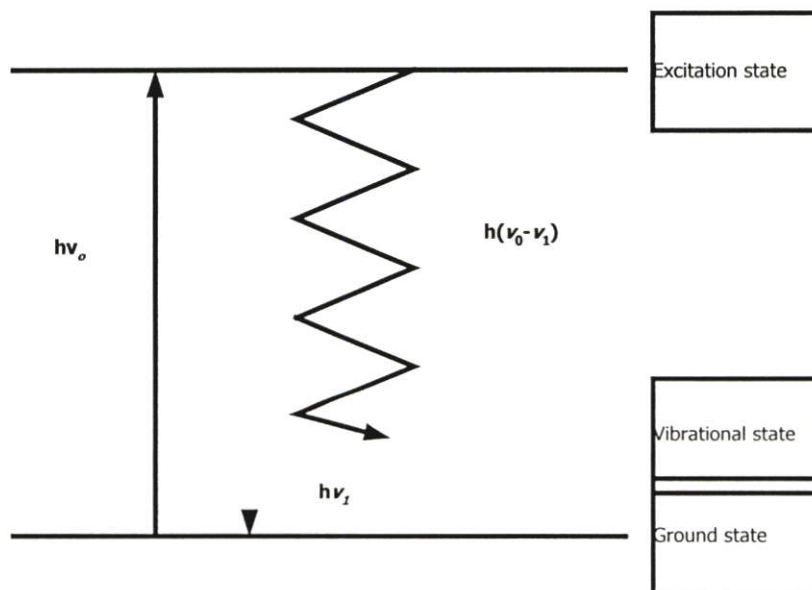
ν_0 คือ ความถี่ของแสงตกกระทบ

ν_n คือ ความถี่ของโฟนอน

α_n คือ การโพลาไรซ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการสั่น

t คือ เวลา

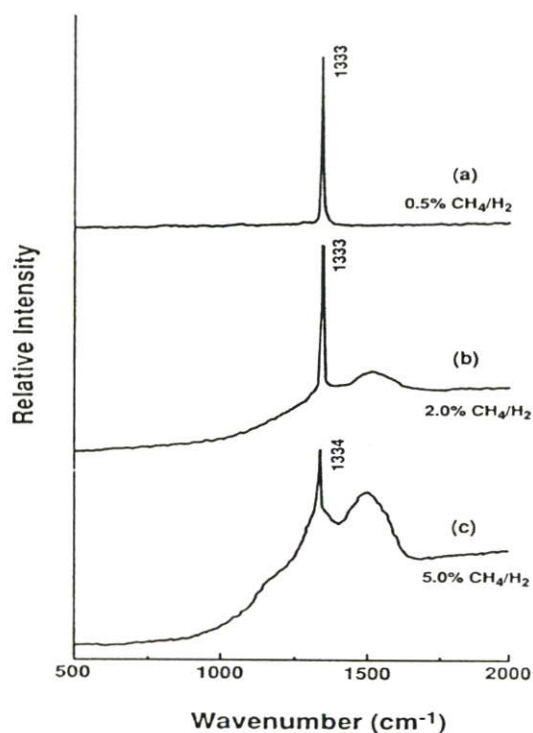
ปรากฏการณ์ "Stokes scattering" เกิดขึ้นเมื่อผลึกได้รับพลังงานจากลำแสง ทำให้เกิดการสั่นโครงผลึกขึ้น ขณะที่ปรากฏการณ์ "Anti-stokes scattering" เกิดจากการทำลายของความร้อนที่กระตุ้นการสั่น โหมดของการสั่นจะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างอะตอมในของแข็ง ดังนั้น Raman spectrum สามารถใช้การวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็งได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น

จากรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นถึงการเกิดปรากฏการณ์ Raman scattering เมื่อยิงลำแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในชิ้นงานตัวอย่าง โฟตอนจากลำแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน $h\gamma$ จะเข้าไปอิลีกตรอนของอะตอมชิ้นงานตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานไปบางส่วน ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเกิดการกระโดดข้ามไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า "สถานะกระตุ้น"(Excitation state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงตกกลับมาสู่สถานะเดิม โดยมีการคายพลังงานออกมามีค่า $h(\gamma_0-\gamma_1)$ ส่วนพลังงานที่สูญเสียไปคือ $h\gamma_1$ ถูกใช้สำหรับทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงสร้างผลึกโดยพลังงาน $h\gamma_1$ ที่สูญเสียไปนี้อยู่ในย่านอินฟราเรด พลังงานที่เหลือ $h(\gamma_0-\gamma_1)$ ก็คือพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั้นเองสำหรับสเปกตรัมของแสงที่ได้ จะถูกเรียกว่า "Stoke line"

จากการใช้ Raman spectroscope ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างของคาร์บอนได้เป็นเพชร แกรไฟต์ อัญฐานคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอนแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 นอกจากนี้สามารถใช้ Raman spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่างๆ กันเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น รูปที่ 3.8 แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างๆ กันคือ (a) 0.5% CH_4/H_2 (b) 2% CH_4/H_2 (c) 5% CH_4/H_2



รูปที่ 3.8 Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างๆ กันคือ (a) 0.5% CH_4/H_2 , (b) 2% CH_4/H_2 , (c) 5% CH_4/H_2

รูปที่ 3.8 (a) สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งอื่น $1,331 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมากนอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่นๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 3.8(b) พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ $1,332 \text{ cm}^{-1}$ เริ่มกว้างขึ้น และเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ $1,500 \text{ cm}^{-1}$ อันเป็นตำแหน่งของคาร์บอนอสัณฐาน หรือ DLC แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมีคาร์บอนอสัณฐานหรือ DLC เจือปนอยู่ สำหรับสเปกตรัมรูป 3.8 (C) ยอดที่ตำแหน่ง $1,332 \text{ cm}^{-1}$ ลดลงอย่างมากและมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ $1,334 \text{ cm}^{-1}$ ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ $1,500 \text{ cm}^{-1}$ เริ่มมียอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมีคาร์บอนอสัณฐาน หรือ DLC เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด นอกจากนี้ข้อสังเกตที่สำคัญจากการเปรียบเทียบสเปกตรัมที่แตกต่างกัน พบว่าลักษณะสำคัญของพันธะแบบ sp^3 ของเพชร เกิดขึ้นในความถี่ต่ำกว่า $1,332 \text{ cm}^{-1}$ ในขณะที่ยอดที่เกิดจากพันธะแบบ sp^2 ของแกรไฟต์เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความถี่ที่สูงกว่า $1,332 \text{ cm}^{-1}$ อันเป็นผลเนื่องมาจากพันธะระหว่าง sp^2 ของอะตอมคาร์บอน มีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะแบบ sp^3

ตารางที่ 3.2 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอน

Peak position	Type of carbon	Description
$\sim 1,140 \text{ cm}^{-1}$	Small size ($<0.1 \mu\text{m}$) cubic diamond	Occasionally observed in diamond film with very small grain sizes ($<0.1 \mu\text{m}$)
$1,315\text{-}1,326 \text{ cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	Broad band ,Observed in shock wave produced diamond
$1,332 \text{ cm}^{-1}$	Cubic diamond	First order peak with FWHM of 1.9 cm^{-1} for natural diamond
$1,345 \text{ cm}^{-1}$	Amorphous carbon	Broad band, It become a shoulder of the 1550 cm^{-1} band when the meterial is hydrogenated

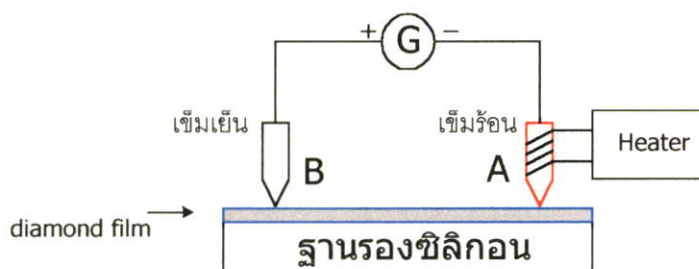
ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

1,355 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	Observed in materials with small grain size
1,550 cm^{-1}	Amorphous or DLC	Broad band
1,580 cm^{-1}	Graphite	First order peak
2,458 cm^{-1}	Cubic diamond	Second order peak
2,710 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	Second order peak
3,240 cm^{-1}	Graphite	Second order peak

นอกจากนี้ Raman spectroscopy ยังมีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์หาปริมาณ ความสัมพันธ์ของพันธะ sp^3 กับพันธะ sp^2 โดยหากทราบการกระเจิงสัมพันธ์ก็สามารถพิจารณาหา จำนวนสัมพันธ์ขององค์ประกอบของเพชรและแกรไฟต์ในฟิล์มเพชรที่ได้จากการสร้างด้วย CVD ได้ หรืออีกทางหนึ่งแกรไฟต์จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสว่างสีขาวสูง แต่ในเพชรจะไม่มีการดูดกลืน ทำให้แสงสามารถผ่านเพชรได้ตลอด ดังนั้นหากฟิล์มเพชรมีแกรไฟต์เจือปนอยู่แสงที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารจะไม่เป็นระเบียบ ปกติแล้วบริเวณที่มีการดูดกลืนจะวัดได้เฉพาะผิวหน้าเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นและขนาดของผลึกมีผลสำคัญต่อ Raman spectrum ที่ได้สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม

3.7 กระบวนการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Seebeck Effect

เทคนิคนี้ใช้ในการตรวจสอบชนิดของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ เป็นวิธีที่วัดได้ง่ายและนิยมใช้แพร่หลาย เนื่องจากการเตรียมอุปกรณ์การวัดและตัวอย่างชิ้นงานกระทำได้สะดวก ชุดทดลองจะประกอบไปด้วย หัวโพรบ 2 ชุด ที่ต่ออยู่กับกัลวานอมิเตอร์ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งหัวโพรบ A ทำหน้าที่เป็นเข็มร้อน ส่วนหัวโพรบ B ทำหน้าที่เป็นเข็มเย็นที่อุณหภูมิห้อง โดยขั้วบวกของกัลวานอมิเตอร์ต่อกับหัวโพรบ B และขั้วลบของกัลวานอมิเตอร์ต่อกับหัวโพรบ A



รูปที่ 3.9 ภาพจำลองการวิเคราะห์ด้วย Seebeck Effect

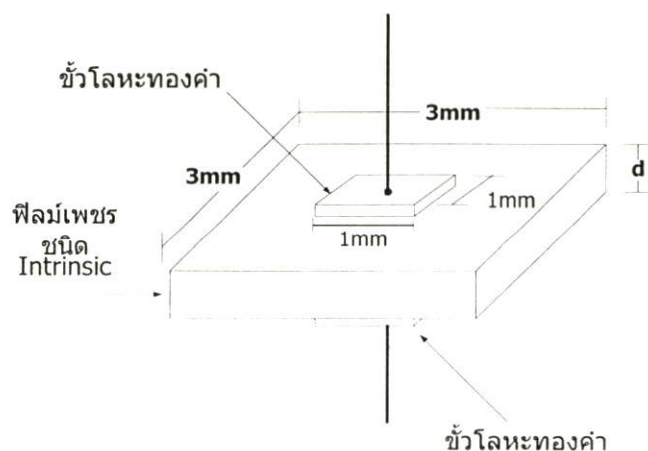
เมื่อหัวโพรบร้อนแตะบนผิวหน้าของชิ้นงาน จะทำให้บริเวณพื้นที่ใต้หัวโพรบมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่ประจุพาหะที่อยู่ในบริเวณนั้น ดังนั้นประจุพาหะนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงความร้อนที่สูงขึ้น ประจุพาหะจะแพร่ออกจากบริเวณที่ได้รับความร้อน เป็นผลทำให้บริเวณที่ได้รับความร้อนมีประจุพาหะข้างมากน้อยลง และทำให้บริเวณนั้นแสดงศักย์ของอะตอมที่แตกตัวเป็นไอออนแล้ว ในขณะที่รอบๆ โพรบเย็นยังคงความเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้นกระแสจึงไหลผ่านกัลวานออร์มิเตอร์ในทิศทางที่ขึ้นกับเครื่องหมายประจำตัวของประจุอะตอมสารเจือที่แตกตัวแล้ว ดังนั้นจึงอาจสรุปผลของชนิดประจุพาหะข้างมากที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี Seebeck Effect ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองด้วยเทคนิค Seebeck Effect

กัลวานออร์มิเตอร์	ชนิดประจุพาหะข้างมาก
บวก	โฮล
ลบ	อิเล็กตรอน
ศูนย์	โฮลเท่ากับอิเล็กตรอน

3.8 กระบวนการสร้างตัวต้านทานจากฟิล์มเพชร

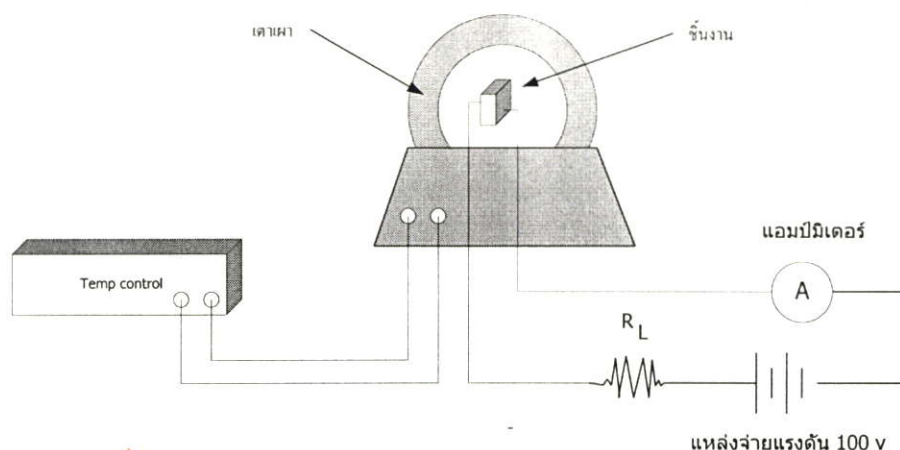
จากการทดลองได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Combustion Activation CVD โดยพื้นที่ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีขนาด $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ขั้วโลหะทองคำขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที และมีความหนา $20 \text{ }\mu\text{m}$ ภายหลังจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD นำฟิล์มเพชรที่ได้มาทำการกัดฐานร่องซิลิคอนดังหัวข้อที่ 3.4 เพื่อสะดวกในการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร จากนั้นนำสร้างขั้วโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มิก เพื่อมิให้มีผลต่อการศึกษาคูณสมบัติของความต้านทานซึ่งได้แก่ ทองคำ (Au)



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร

3.8.1 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความต้านทานของฟิล์มเพชรเนื่องจากอุณหภูมิ

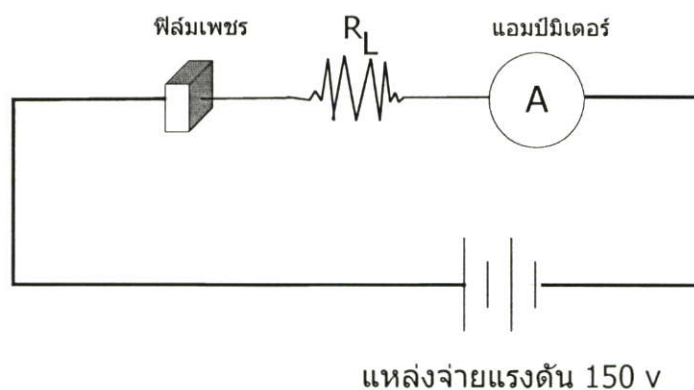
เนื่องจากเพชรเป็นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของเพชร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเพชรกับอุณหภูมิ โดยทำการวัดค่า I-V และทำการแปรค่าอุณหภูมิตั้งแต่ อุณหภูมิ 27 – 700 องศาเซลเซียส โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 25 องศาเซลเซียส และทำการจ่ายแรงดัน 100 V คงที่ โดยทำการจัดเครื่องมือดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การจัดชุดเครื่องมือในการวัดผลของอุณหภูมิต่อผลสภาพต้านทานของฟิล์มเพชร

3.9 กระบวนการทดสอบค่า Breakdown Field ของฟิล์มเพชร

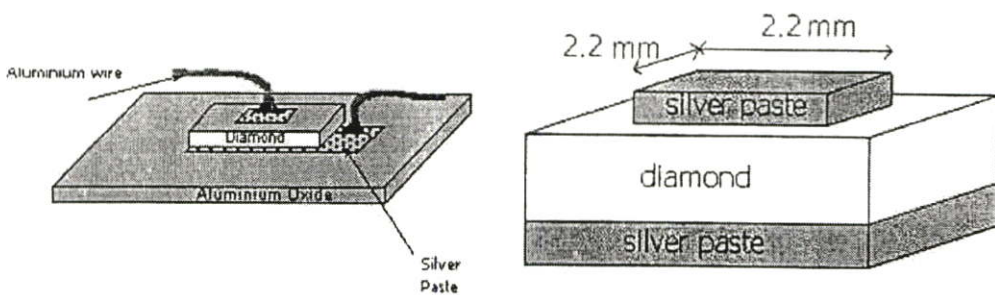
จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ จะทำการหาค่า Breakdown Field ของฟิล์มเพชรซึ่งสามารถจัดชุดทดลองได้ดังรูปที่ 3.12 โดยทำการจ่ายแรงดันจนกระทั่งฟิล์มเพชรเกิดการพังทลาย แต่เนื่องจากห้องปฏิบัติการมีแหล่งจ่ายแรงดันได้สูงสุดเพียง 150 V จึงทำการจ่ายแรงดัน 0-150 V ทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 3.12 การจัดชุดเครื่องมือในการวัดค่า Breakdown Field ของฟิล์มเพชร

3.10 กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุจากฟิล์มเพชร

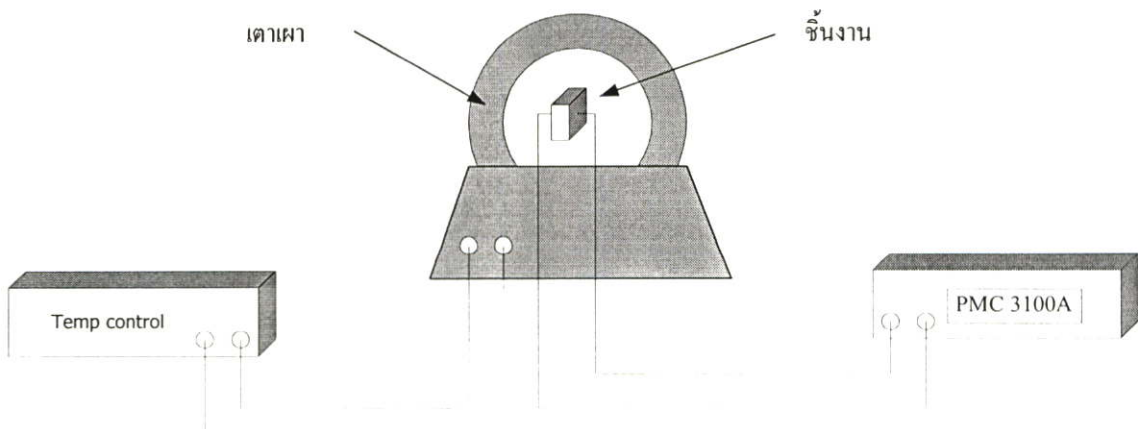
จากโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ประกอบไปด้วยชั้นไดอิเล็กตริกซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำ 2 แผ่น ดังนั้นจากการทดลองได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Combustion Activation CVD โดยพื้นที่ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีขนาด $4 \times 4 \text{ mm}^2$ ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที พื้นที่ของแผ่นโลหะกาวเงินมีขนาด $2.2 \times 2.2 \text{ mm}^2$ และ มีความหนาประมาณ $20 \text{ }\mu\text{m}$ นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ทำการสร้างแผ่นโลหะด้วยกาวเงิน (Silver Paste) และใช้เส้นลวดโลหะอะลูมิเนียมต่อเป็นขั้วโลหะทั้งสองด้าน ซึ่งตัวชิ้นงานและลวดอะลูมิเนียมส่วนที่ต่อกับแผ่นโลหะนั้นจะถูกยึดอยู่บนแผ่นอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รูปตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Combustion Activation CVD

3.10.1 การตอบสนองความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์มเพชร

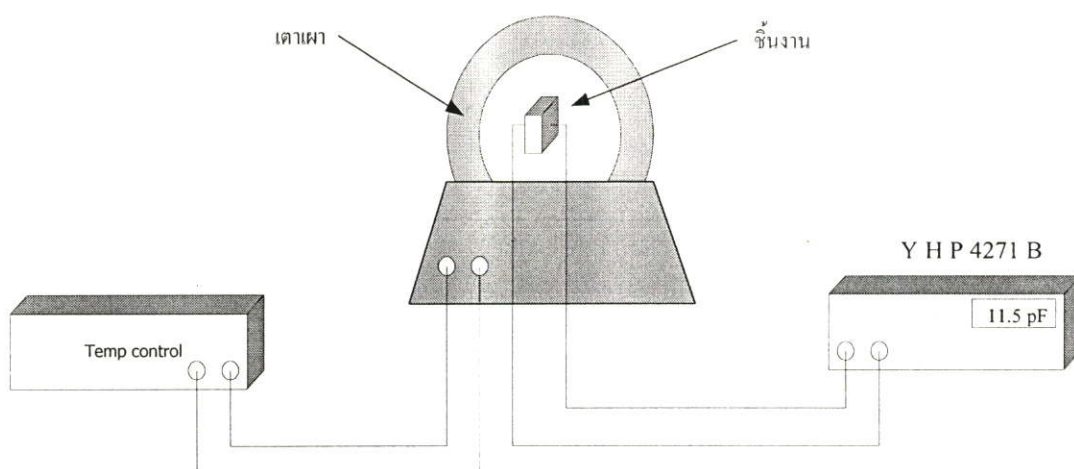
ทำการศึกษามลของความถี่ที่แตกต่างกัน ด้วยเครื่องวัด Voltech PMC 3100 A ฟิล์มเพชรที่ทำการศึกษามีความหนา $20 \text{ }\mu\text{m}$ ทำการป้อนความถี่แตกต่างกัน เพื่อทำการตรวจสอบการตอบสนองต่อความถี่ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์มเพชร โดยการจับเครื่องมือเป็นดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การจับชุดเครื่องมือในการตอบสนองความถี่ต่อตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชร

3.10.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มเพชรเนื่องจากอุณหภูมิ

จากการทดลองวัดค่า C-V ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษาค่าของความถี่และสนามไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาค่าของอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวโดยตัดผลของสนามไฟฟ้าและความถี่ออกไป โดยใช้เครื่องวัด YHP4271B ปรับแรงดันคงที่ไว้ 10 โวลต์ โดยการจัดเครื่องมือเป็นดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การจัดชุดเครื่องมือในการวัดผลของอุณหภูมิต่อตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชร

3.10.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มเพชร

ในการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มเพชรจะทำการแปรค่าความหนาของฟิล์มเพชร โดยมีความหนา 20 μm , 30 μm , 40 μm , 50 μm , 60 μm , 70 μm , 80 μm และ 90 μm เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที, 50 นาที, 60 นาที, 70 นาที, 80 นาที และ 90 นาที ตามลำดับ พื้นที่ของแผ่นโลหะกาวเงินมีขนาด $2.2 \times 2.2 \text{ mm}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง และวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยเครื่อง PMC3100A ปรับแรงดันคงที่ไว้ 10 โวลต์

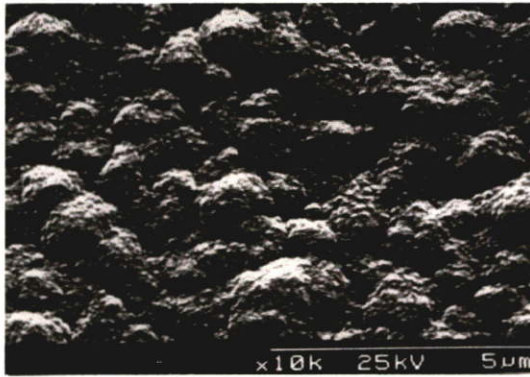
บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM

การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย SEM ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน ซึ่งกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาไม่อาจวิเคราะห์ได้ เมื่อนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย SEM จะทำให้เราสามารถศึกษาลักษณะของระนาบ, พื้นผิวและความหนาของฟิล์มเพชรได้โดยตรง

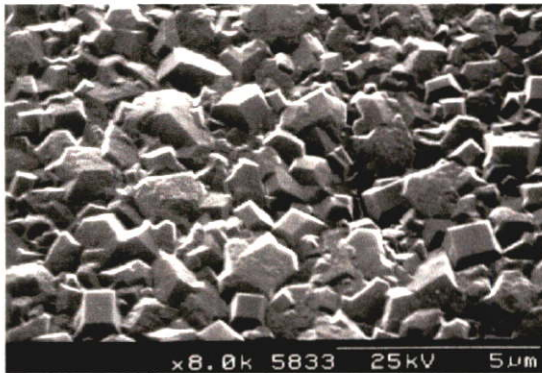
จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD ด้วยเงื่อนไขดังตารางที่ 3.1 เราสามารถวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM ได้ดังนี้



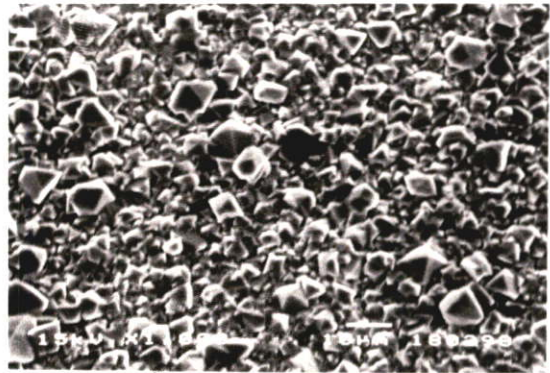
((a) ตัวอย่างชิ้นงาน A (400-520 °C)



(b) ตัวอย่างชิ้นงาน B (550-850 °C)



(c) ตัวอย่างชิ้นงาน C (880-950 °C)



(d) ตัวอย่างชิ้นงาน D (900-1000 °C)

รูปที่ 4.1 ลักษณะของพื้นผิวฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการ Combustion Activation CVD เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิฐานรองต่างๆ ด้วยภาพถ่าย SEM



(a) ตัวอย่างชิ้นงาน A (20 นาที)



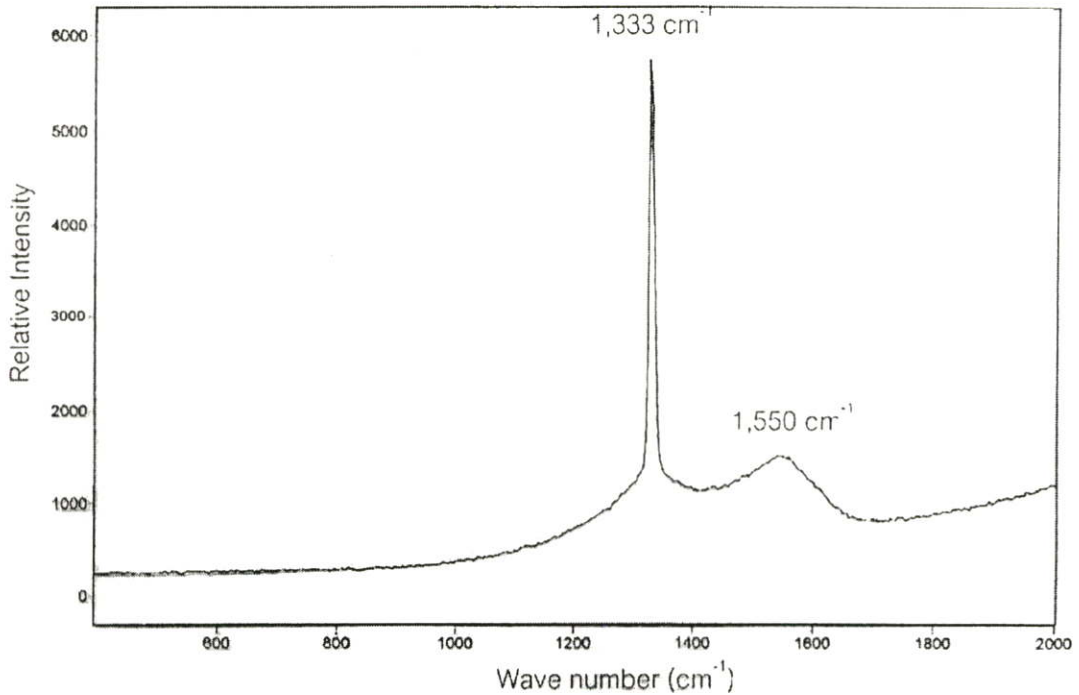
(b) ตัวอย่างชิ้นงาน B (30 นาที)

รูปที่ 4.2 ลักษณะของความหนาของฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการ Combustion Activation CVD อุณหภูมิฐานรอง 700 °C ด้วยภาพถ่าย SEM

จากการศึกษาคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM ที่อุณหภูมิฐานรองที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าที่ อุณหภูมิ 560-850 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรระนาบ [111] และมีอัตราการเกิดที่สูง ดังนั้นจึงทำการกำหนดการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ 700-800 องศาเซลเซียส และจากรูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM สามารถแสดงให้เห็นความหนาของฟิล์มเพชรได้ โดยฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ combustion Activation CVD เป็นเวลา 20 นาที มีความหนาประมาณ 20 μm และ 30 นาที มีความหนาประมาณ 30 μm ซึ่งค่าความหนานี้มีเป็นค่าตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณหาค่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้

4.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy

Raman Spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน ซึ่งทำให้เราสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้ ซึ่งเทคนิคนี้จะช่วยยืนยันคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD จากรูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Ramann Spectroscopy



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD โดย Raman Spectroscopy

จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ Combustion Activation CVD โดย Raman Spectroscopy จะเห็นว่ายอดกราฟแรกอยู่ที่ 1333 cm^{-1} ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเพชรในธรรมชาติจะพบว่ายอดกราฟแรกของเพชรธรรมชาติอยู่ 1333 cm^{-1} เช่นเดียวกัน จึงยืนยันได้ว่าวิธีการ Combustion Activation CVD สามารถสังเคราะห์ได้ แต่อย่างไรก็ตามจากผลของยอดกราฟที่สองอยู่ที่ 1550 cm^{-1} แสดงถึงการก่อตัวของ Amorphous Carbon ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนในตัวอย่างชิ้นงานฟิล์มเพชร ซึ่งอาจมีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้

4.3 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย Seebeck effect

จากการชุดเครื่องมือในรูปที่ 3.9 โดยใช้กัลวานมิเตอร์ Yokogawa type 2708 ที่มีขนาดความละเอียดสเกล $0.9\ \mu\text{A/Div}$ เมื่อทำการเพิ่มความร้อนให้แก่เข็มร้อนประมาณ 100 องศาเซลเซียส เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับจึงทำการทดสอบกับตัวอย่างซิลิคอนชนิดพี ผลที่ได้จะพบว่ากัลวานมิเตอร์ชี้ตำแหน่งบวก ซึ่งแสดงผลว่าประจุพาหะหลักคือ โฮลนั่นเองตรงตามคุณสมบัติของตัวอย่างซิลิคอนชนิดพี ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ได้จาก Combustion

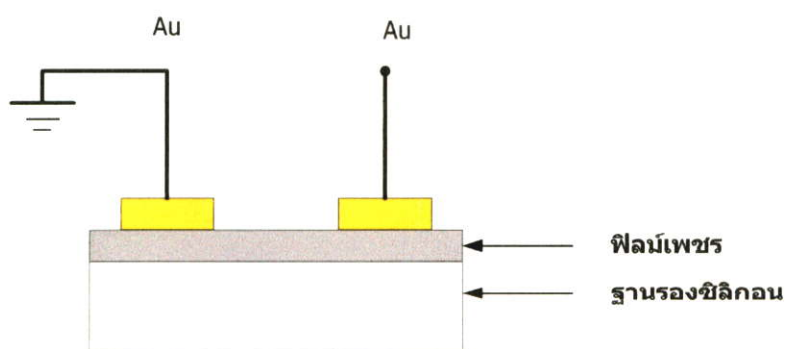
Activation CVD จะพบว่ากัลวานอมิเตอร์ยังชี้ที่ตำแหน่งศูนย์ และแม้ว่าจะมีการเพิ่มอุณหภูมิ ประมาณ 200 องศาเซลเซียสแก่เข็มนร้อนกัลวานอมิเตอร์ยังคงชี้ที่ตำแหน่งศูนย์เช่นเดิม แสดงว่า ประจุพาหะที่เคลื่อนจากเข็มนร้อนไปยังเข็มนเย็นมีเท่ากันทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้ความต่างศักย์ ระหว่างเข็มนร้อนและเข็มนเย็นเป็นศูนย์ จึงสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ Combustion Activation CVD เป็นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค

4.4 ผลการวิเคราะห์รอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชรสร้างจากกระบวนการ Combustion activation.

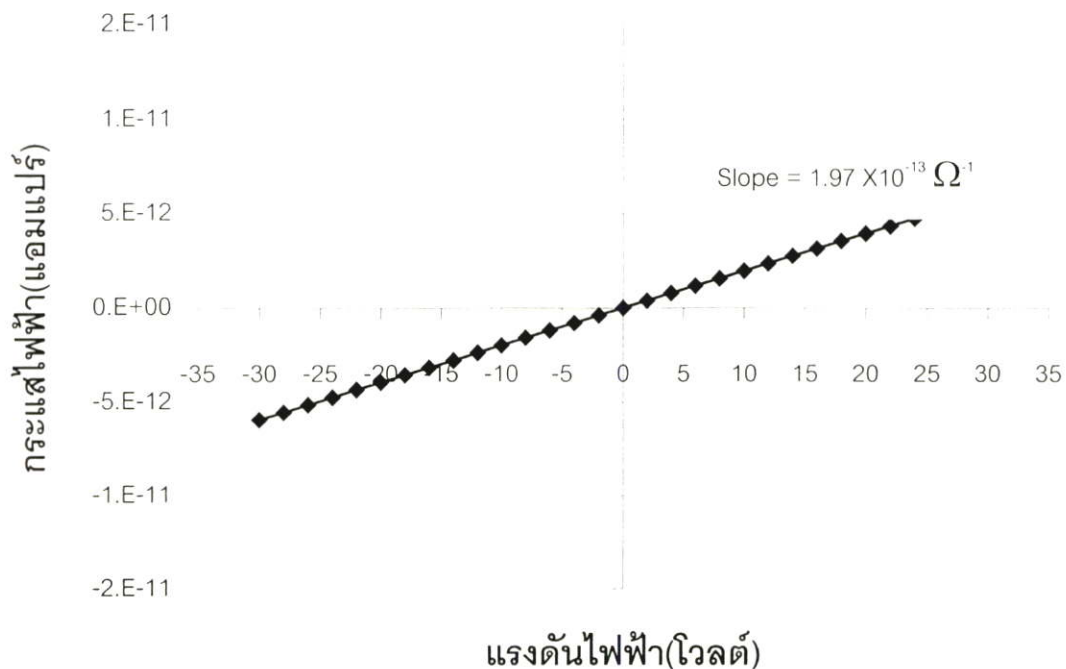
หลังจากทำการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเพชรดังรูปที่ 3.5 โดยโลหะที่ทำการทดลองประกอบไปด้วย ทองคำ (Au) , อะลูมิเนียม (Al) และ กาวเงิน (Silver Paste) โดยจึงนำ ชิ้นงานมาทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อ โลหะกับฟิล์มเพชรที่สร้างจากกระบวนการ Combustion Activation CVD โดยทำการวัดกระแส (I) และความต่างศักย์ (V) อย่างไรก็ตามกระบวนการ Combustion Activation CVD สามารถสังเคราะห์ได้เพียงเพชรชนิดอินทรีนซิค ดังนั้นในจึงศึกษาได้เพียงคุณสมบัติรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิคเท่านั้น

4.4.1 ผลการทดลองรอยต่อโลหะทองคำ(Au)กับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคที่สร้างจากกระบวนการ Combustion activation CVD

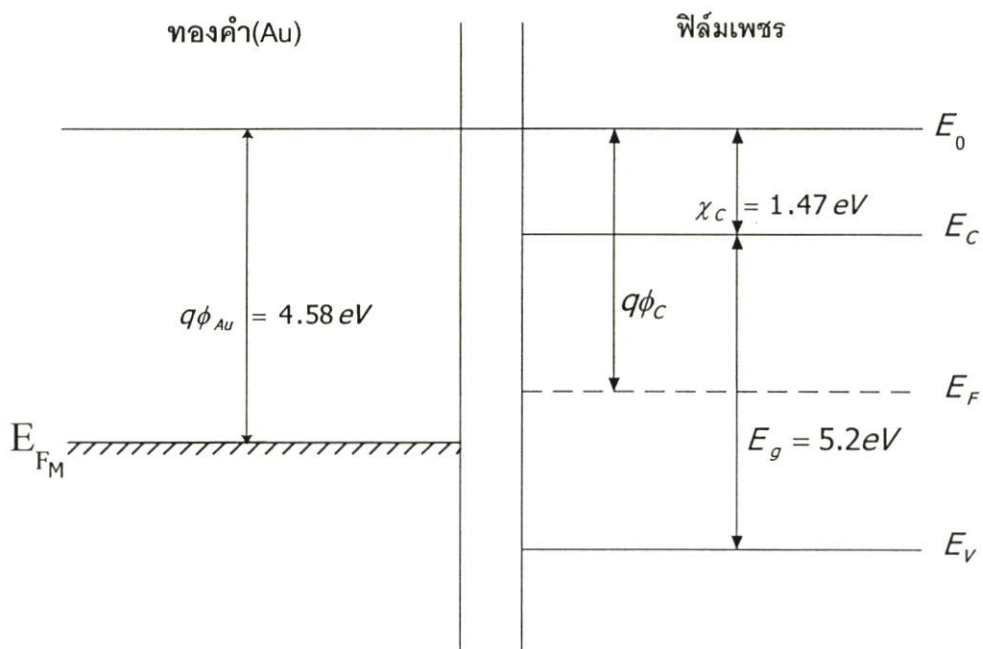
แผ่นฟิล์มเพชรจะประกอบด้วยขั้วโลหะทองคำสองขั้วดังแสดงในรูปที่ เมื่อป้อนแรงดันให้กับขั้วโลหะทั้งสอง คุณลักษณะของกระแสและแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



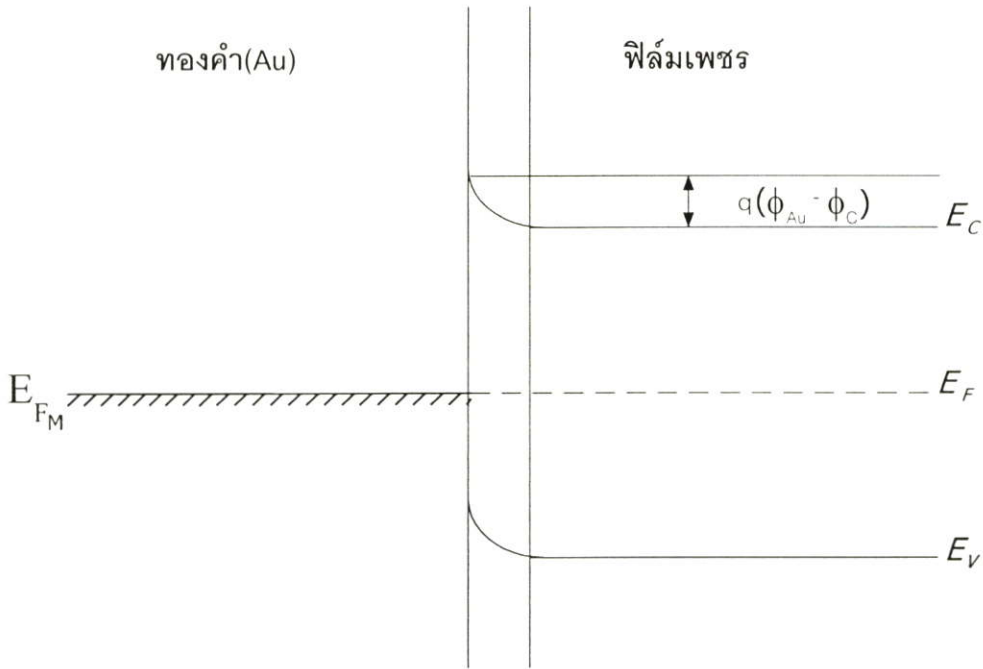
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางของรอยต่อโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.5 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.6 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรินซิกในทางอุดมคติ ก่อนการสัมผัส



รูปที่ 4.7 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิกในทางอุดมคติ หลังสัมผัส

จากคุณลักษณะของกระแสและแรงดันดังรูปที่ 4.5 กระแสสามารถไหลได้สะดวกซึ่งเป็นคุณสมบัติของรอยต่อโอห์มิก แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำทางอุดมคติจะพบว่ามีความกีดขวางการไหลของอิเล็กตรอนอิสระทางด้านสารกึ่งตัวนำเพชร ซึ่งแสดงคุณสมบัติของรอยต่อเป็นแบบรอยต่อเรกติไฟด์ เมื่อพิจารณาแถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเพชรในทางอุดมคติดังรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 โดยฟังก์ชันงานของเพชรคำนวณได้จาก

$$q\phi_c = \chi_c + E_g - \Delta E \quad (4.1)$$

โดย

$q\phi_c$ คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเพชร

χ_c คือ ค่าความแตกต่างระหว่างระดับสูญญากาศกับระดับแถบความนำ (E_c) ของเพชร หรือ ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของเพชร (Electron affinity) มีค่าเท่ากับ 1.47 eV

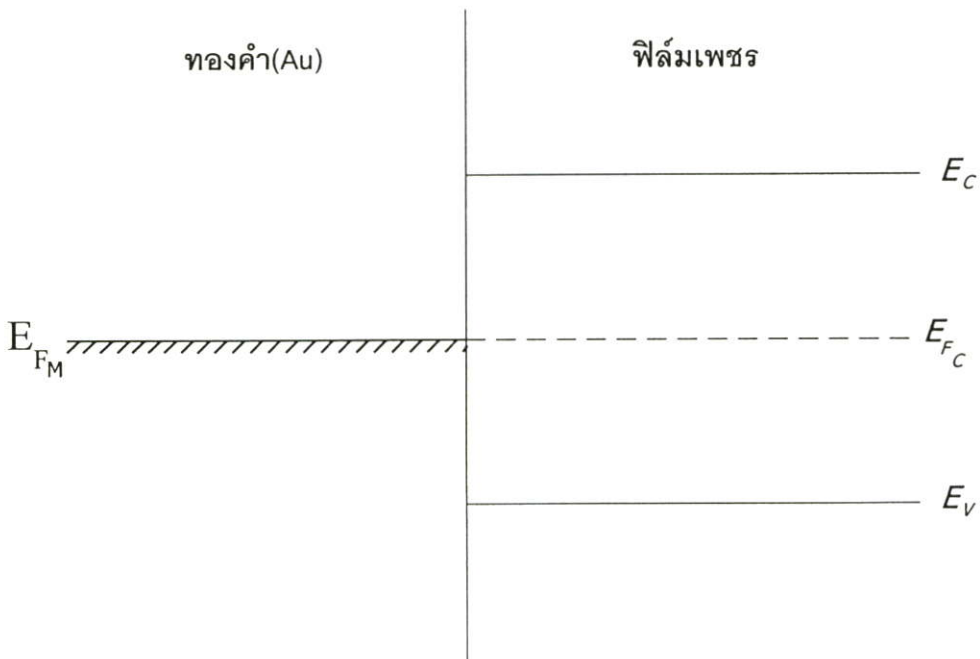
E_g คือค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มเพชร

ΔE คือ ค่าความแตกต่างของระดับเฟอร์มิ (E_f) กับ แถบวาเลนซ์ (E_v) ของสารกึ่งตัวนำ

จากกรณีสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ΔE จะมีค่าเท่ากับ $E_g/2$ ซึ่งค่า E_g คำนวณได้จากสภาพความต้านทานในหัวข้อที่ 4.5 ดังนั้น $q\phi_c$ ของเพชรมีค่าเท่ากับ 4.07 eV จากค่าฟังก์ชันงานของทองคำมีค่าเท่ากับ 4.58 eV ดังนั้นทางอุดมคติควรมีกาแพงศักย์ที่เกิดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำเพชรมีค่าเท่ากับ

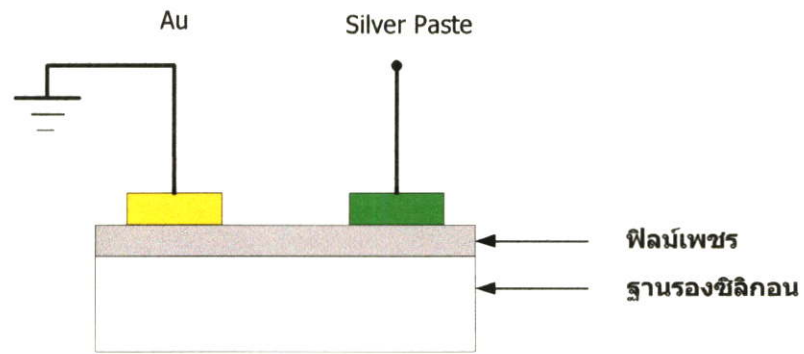
$$(\phi_{Au} - \phi_c) = 4.58 - 4.07 = 0.51 \text{ V}$$

จากผลการทดลองจะพบว่าคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน แสดงคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรเป็นรอยต่อแบบโอห์มิก กล่าวคือกระแสไหลผ่านได้อย่างสะดวกทั้งสองทิศทาง ดังนั้นอาจเป็นผลอันเนื่องมาจากสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส (Surface states) ซึ่งอาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผิวสัมผัส หรือ แกรไฟต์ที่แทรกตัวอยู่ในฟิล์มเพชรดังที่แสดงได้จาก Raman Spectroscopy ในรูปที่ 4.3 ทำให้เกิดสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส ระดับพลังงานนี้จะมีคุณสมบัติและทำหน้าที่เป็น ระดับจับโฮล (Hole Trapped) ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้เกิดการสะสมของประจุพาหะอิเล็กตรอนบริเวณผิวสัมผัสนี้มากกว่าปกติ เป็นผลทำให้ระดับพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัสมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัสนี้จะหักล้างค่ากาแพงศักย์ที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เป็นผลทำให้ประจุพาหะไหลได้อย่างสะดวก

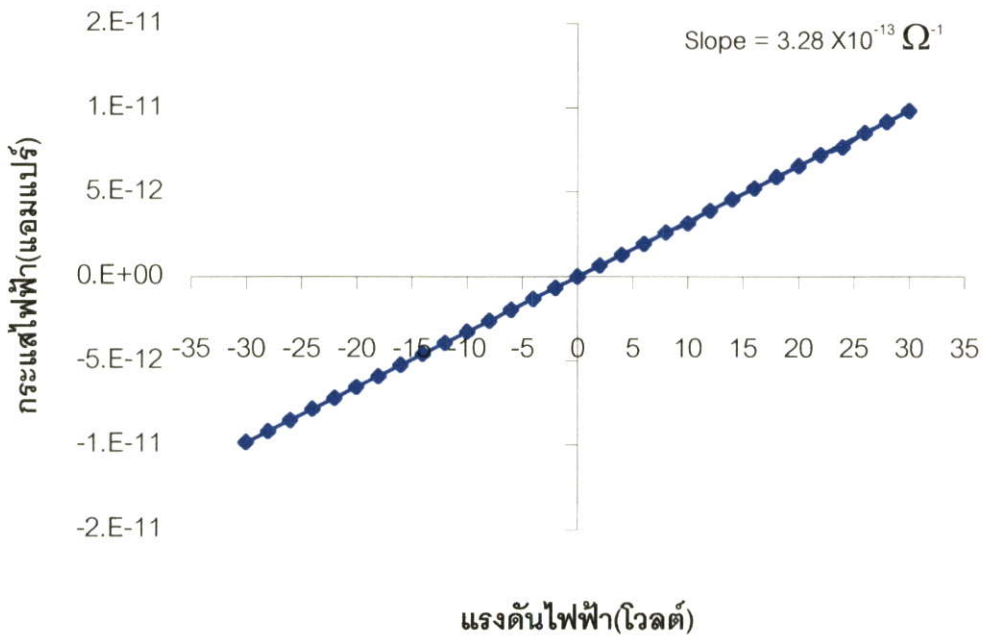


รูปที่ 4.8 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิค เนื่องจากสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส หลังสัมผัส

4.4.2 ผลการทดลองรอยต่อโลหะกาวเงิน (Silver paste) กับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่สร้างจากกระบวนการ Combustion Activation CVD

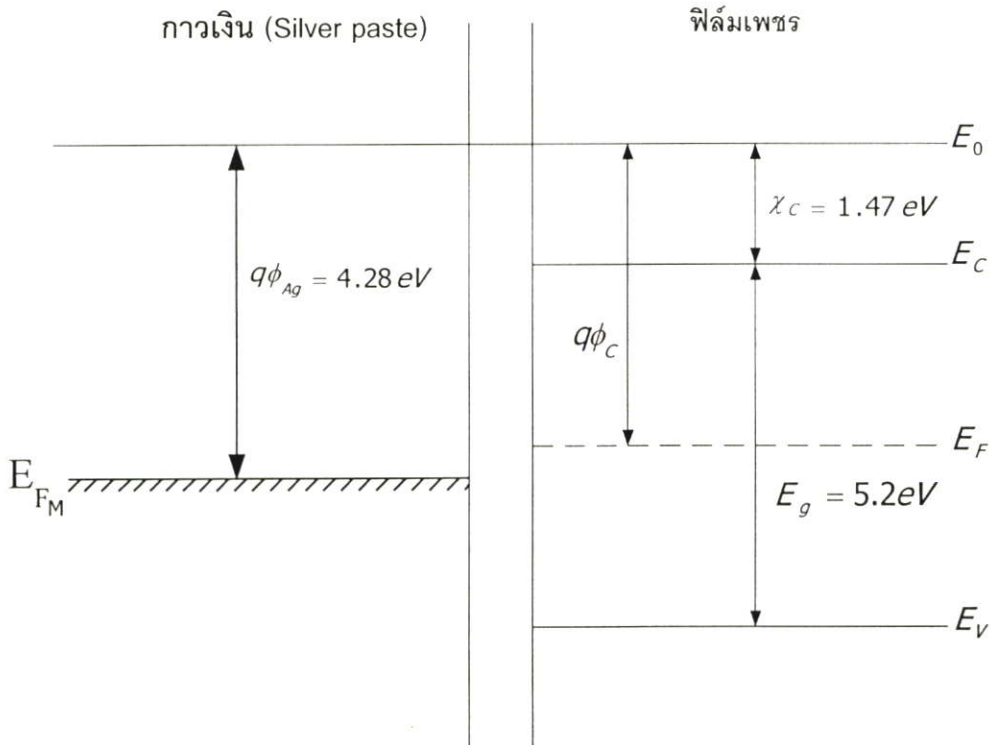


รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของรอยต่อโลหะกาวเงินกับฟิล์มเพชร

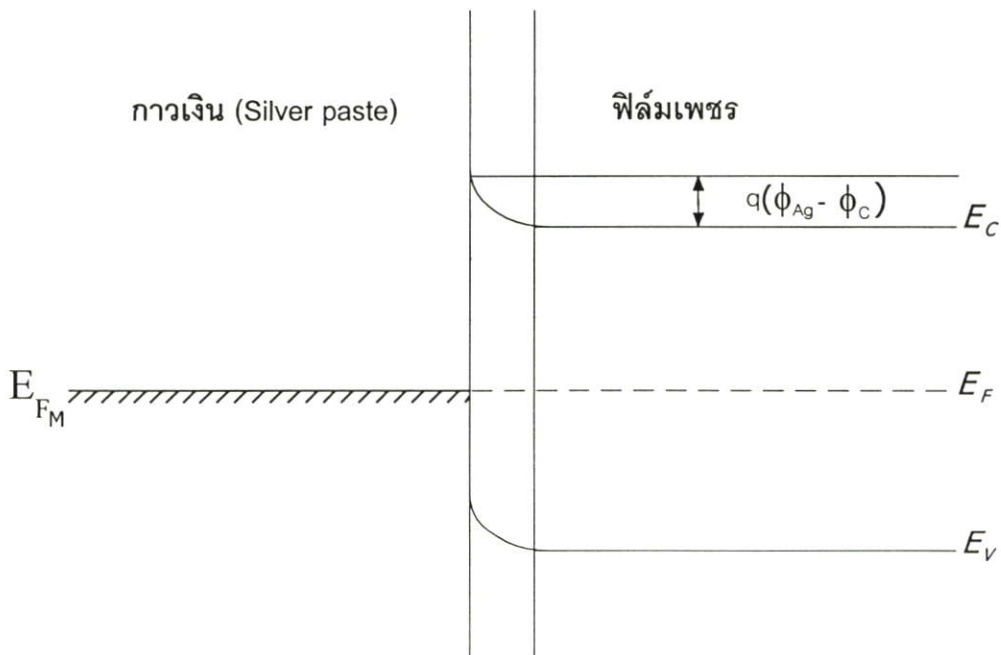


รูปที่ 4.10 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะกาวเงินกับฟิล์มเพชร

กาวเงิน (Silver paste) เป็นวัสดุในการยึดติดลวดตัวนำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยกาวใช้งานแพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรม แต่เป็นวัสดุที่มีราคาสูง กาวเงินถูกนำมาใช้งานในการทำรอยต่อ โหม้มีระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับลวดตัวนำ เนื่องจากกาวเงินเป็นสารละลายของโลหะเงิน ดังนั้นจะพิจารณาคุณสมบัติต่างๆเช่นเดียวกับโลหะเงิน



รูปที่ 4.11 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิกในทางอุดมคติ ก่อนสัมผัส

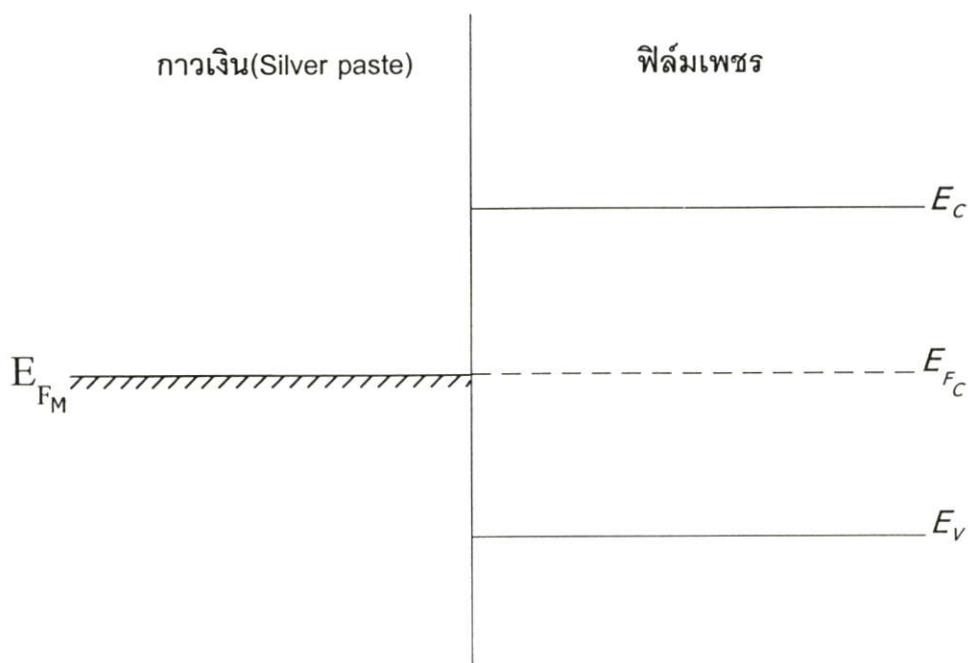


รูปที่ 4.12 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิกในทางอุดมคติ หลังสัมผัส

จากค่าฟังก์ชันงานของเงินมีค่าเท่ากับ 4.28 eV และจาก $q\phi_c$ ของเพชรมีค่าเท่ากับ 4.07 eV ดังนั้นทางอุดมคติควรมีก่าแพ่งศักย์ที่เกิดขบวนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระของสารกึ่งตัวนำเพชรมีค่าเท่ากับ

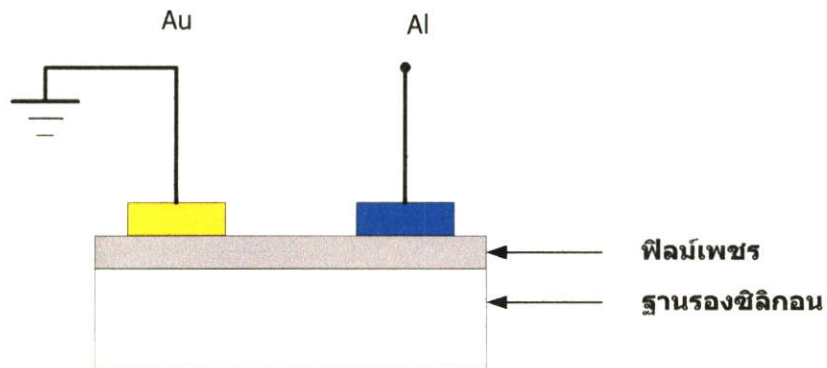
$$\phi_{Ag} - \phi_c = 4.28 - 4.07 = 0.21 \text{ V}$$

จากผลการทดลองจะพบว่าคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน แสดงคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะกาวเงินกับสารกึ่งตัวนำเพชรเป็นรอยต่อแบบโอห์มิก ดังนั้นอาจเป็นผลอันเนื่องมาจากสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส (Surface states) เช่นเดียวกับรอยต่อระหว่างโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชร ระดับพลังงานนี้จะมีคุณสมบัติและทำหน้าที่เป็น ระดับจับโฮล (Hole Trapped) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัสนี้จะหักล้างค่าก่าแพ่งศักย์ที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เป็นผลทำให้ประจุพาหะไหลได้อย่างสะดวก และจากค่าความชันที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันคือค่าความนำไฟฟ้า จากผลของสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัสทำให้เกิดสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส จากรูปที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะกาวเงินกับสารกึ่งตัวนำเพชรมีค่าสูงกว่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะกาวเงินกับสารกึ่งตัวนำเพชร แสดงว่ารอยต่อระหว่างโลหะกาวเงินกับสารกึ่งตัวนำมีสภาพความต้านทานน้อยกว่า หรือมีค่าความนำไฟฟ้ามากกว่านั่นเอง เนื่องมาจากค่า $q(\phi_m - \phi_c)$ ของรอยต่อโลหะกาวเงินกับสารกึ่งตัวนำเพชรมีค่าน้อยกว่านั่นเอง

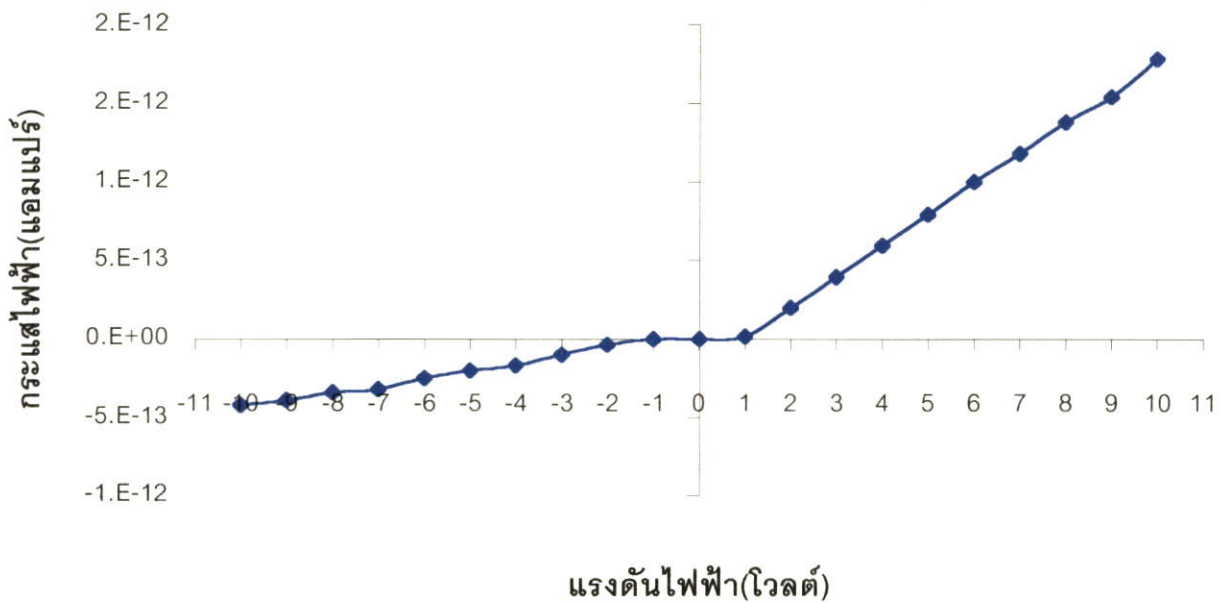


รูปที่ 4.13 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะทองคำกับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิดอินทรีนซิก เนื่องมาจากสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัส หลังสัมผัส

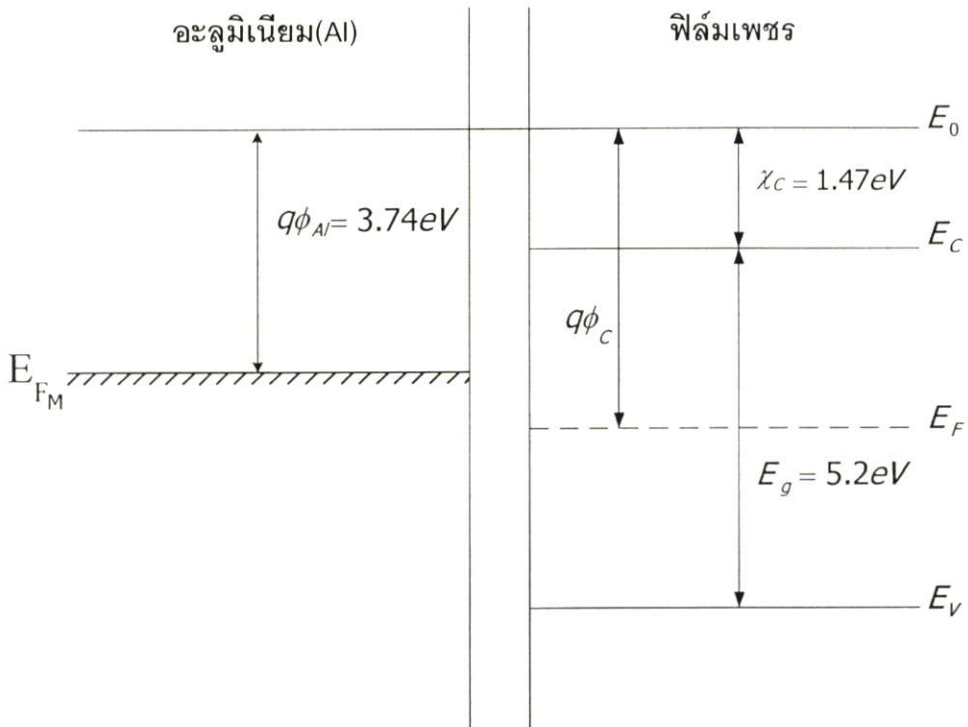
4.4.3 ผลการทดลองรอยต่อโลหะอะลูมิเนียม(Al) กับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่สร้างจากกระบวนการ Combustion Activation CVD.



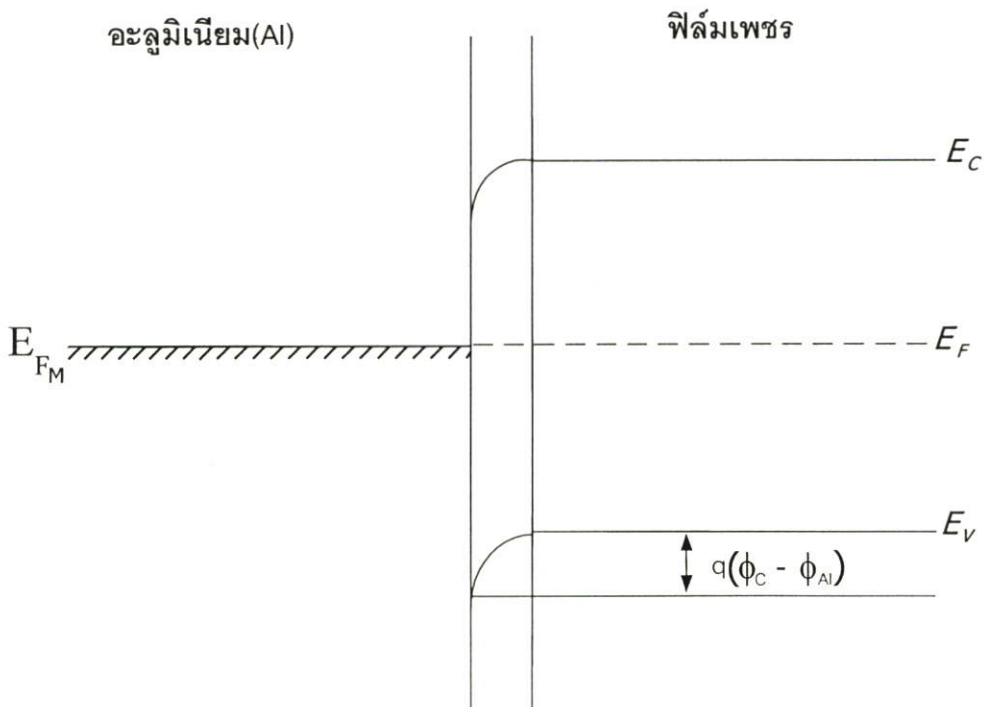
รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.15 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.16 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกในทางอุดมคติ ก่อนสัมผัส

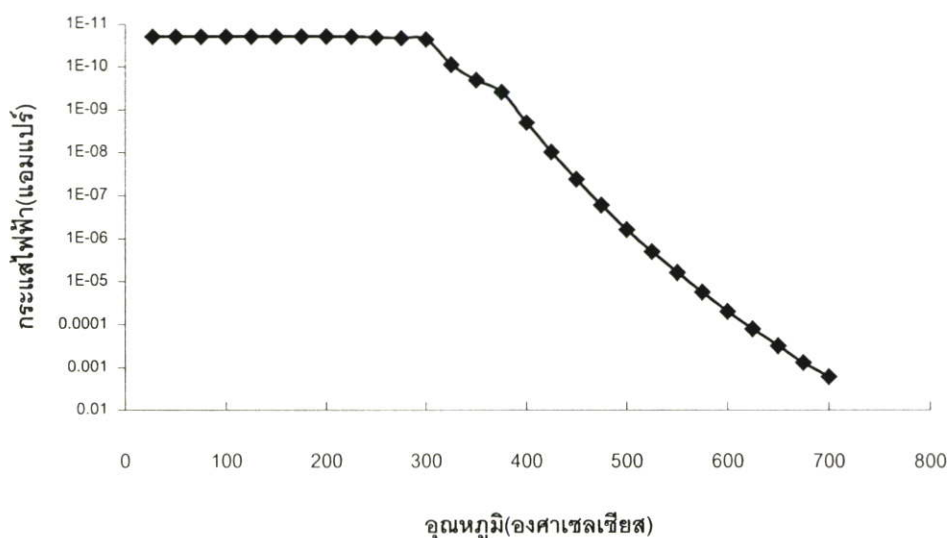


รูปที่ 4.17 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกในทางอุดมคติ หลังสัมผัส

จากรูปที่ 4.15 คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรไม่เป็นเชิงเส้น จะสังเกตเห็นว่ามีแรงดันตกคร่อมที่รอยต่อ โดยจำเป็นต้องให้แรงดันค่าหนึ่งจึงจะมีการนำกระแสซึ่งมีค่าแรงดันเท่ากับ V ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร จะเห็นว่าฟังก์ชันงานของอะลูมิเนียม ($q\phi_{Al}$) มีค่าเท่ากับ 3.74 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของฟิล์มเพชร จึงเกิดกำแพงศักย์เพื่อกีดขวางการไหลของกระแสในแถบความนำของฟิล์มเพชร เป็นผลทำให้เกิดกำแพงศักย์กีดขวางการไหลของกระแสดังแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อพิจารณา ความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันงานโลหะกับสารกึ่งตัวนำเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการเอาชนะกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นจากรอยต่อมีค่าเท่ากับ $\phi_c - \phi_{al} = 0.65 \text{ V}$ และเมื่อพิจารณาจะพบว่า รอยต่อโลหะอะลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรเมื่อได้รับแรงดันถึงค่าหนึ่งจึงจะมีกระแสไหลผ่านรอยต่อซึ่งเรียกแรงดันนี้ว่า ค่าศักย์สัมผัส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.0 V ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกัน

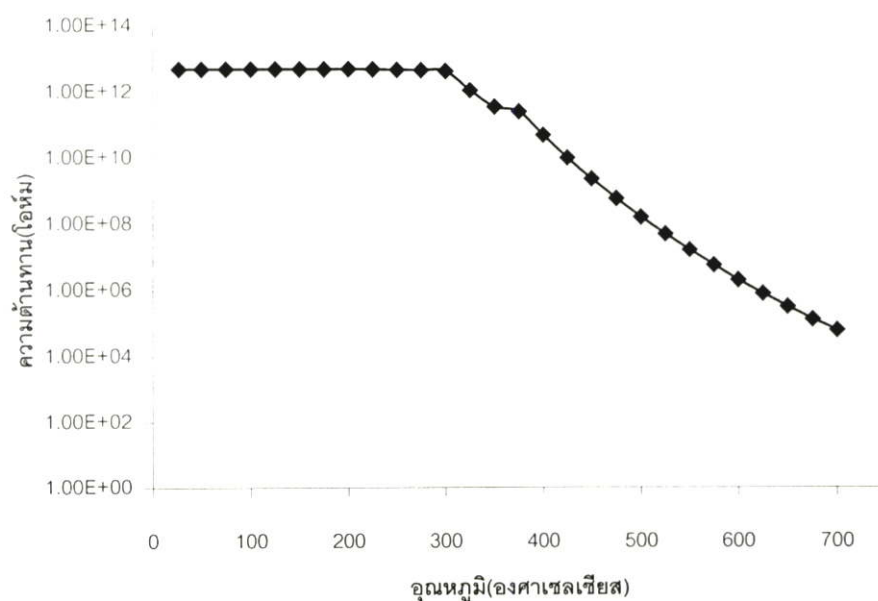
4.5 ผลการวิเคราะห์ตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร

ผลการวัดค่ากระแสกับอุณหภูมิของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชรโดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.18 เมื่อทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับอุณหภูมิของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร

และจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต้านทานในวงจรที่สามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร

จากโครงสร้างของตัวต้านทานไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์มเพชรดังรูปที่ 3.10 โดยพื้นที่ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีขนาด $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ขั้วโลหะทองคำขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที และมีความหนาประมาณ $20 \text{ }\mu\text{m}$

สภาพความพิกัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเพชร(ρ) มีค่าเท่ากับ

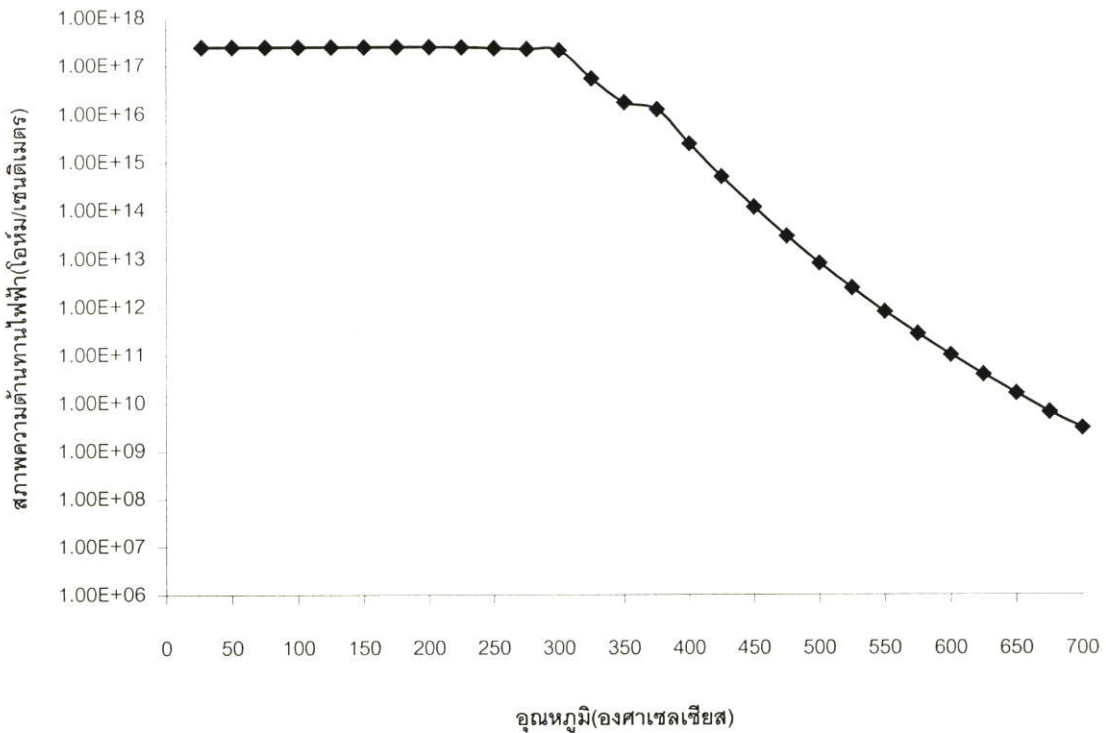
$$\rho = RA/L \quad (4.2)$$

โดยที่ ρ คือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (Ohm/cm)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วโลหะ(cm^2)

L คือ ความหนาของฟิล์มเพชร(cm)

ดังนั้นสามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานของฟิล์มเพชรและอุณหภูมิดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านกับอุณหภูมิของตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชร

4.6 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของประจุพาหะและช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ Combustion Activation CVD

จากการทดสอบด้วย Seebeck Effect ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากวิธี Combustion Activation CVD เป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic) นั่นคือจำนวนประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าจากสมการที่ 2.28 จึงเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\rho = 1 / e n_i (\mu_e + \mu_h) \quad (4.4)$$

โดย

n_i คือ ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะชนิดหนึ่งชนิดใดของสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

μ_e คือ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ

μ_h คือ ความคล่องตัวของโฮลของสารกึ่งตัวนำ

ดังนั้น จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการ 4.4 จะได้สมการ

$$n_i = 1 / \rho (\mu_e + \mu_h) \quad (4.5)$$

จากสมการของความหนาแน่นของประจุพาหะชนิดใดชนิดหนึ่งในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค
จะได้ว่า

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (4.6)$$

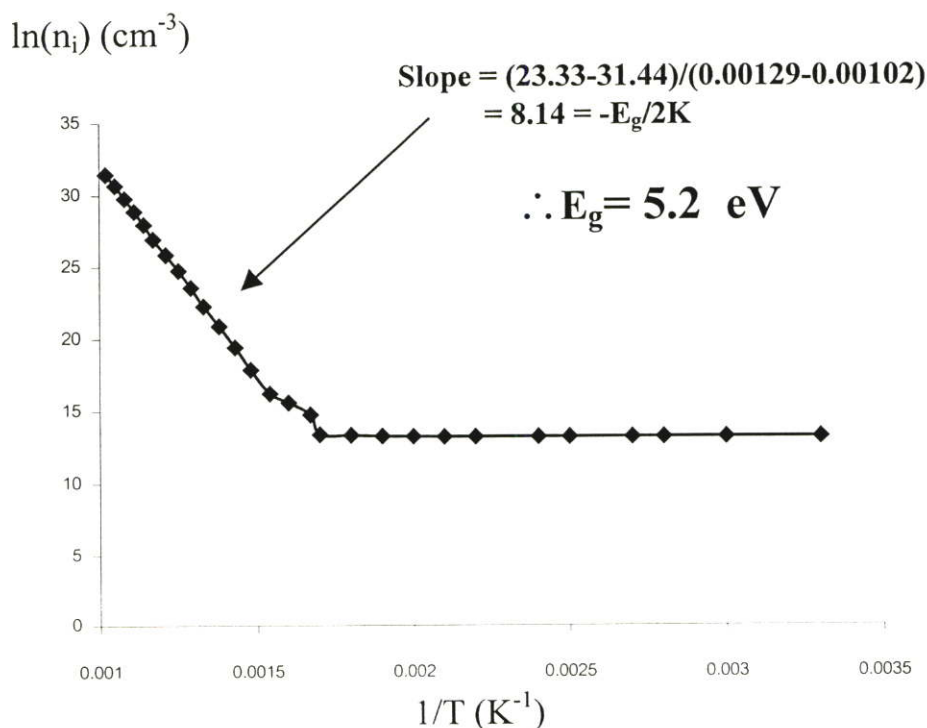
หรือ

$$\ln(n) = \ln(N_c N_v)^{1/2} - \frac{E_g}{2kT} \quad (4.7)$$

ดังนั้น

$$\ln(n) = -\frac{E_g}{2k} \frac{1}{T} + \ln(N_c N_v)^{1/2} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ 4.8 จะพบว่าเป็นสมการเส้นตรง ซึ่งความชันมีค่าเท่ากับ $-E_g/2k$ ในกราฟ
ดังนั้นถ้าเรารู้ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(n_i)$ กับ $1/T$ จะทำให้เราสามารถคำนวณ
หาค่าความกว้างช่องว่างพลังงาน E_g ของสารนั้นได้ ดังนั้นจากสมการที่ 4.5 เมื่อนำผลของกราฟ
ในรูปที่ 4.20 มาพล็อตในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(n_i)$ กับ $1/T$ จะได้กราฟดังรูป 4.21

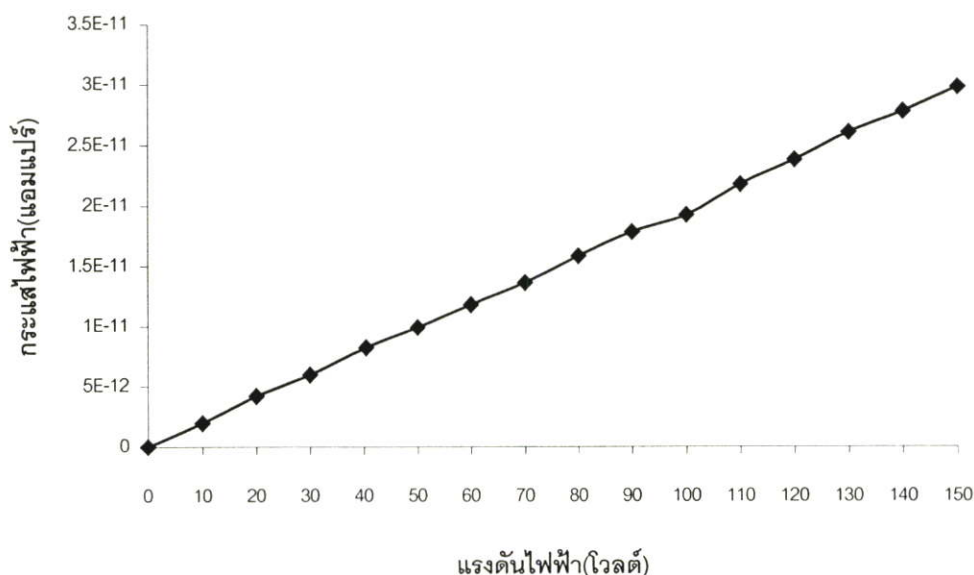


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(n_i)$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.21 เมื่อคำนวณหาความชันของกราฟจะได้ความชันของกราฟในย่านที่ 1 เท่ากับ 5.2 eV ซึ่งค่าความชันนี้จะเป็น ช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการ Combustion Activation CVD ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้นี้จะมีค่าใกล้เคียงเมื่อเทียบกับเพชรในธรรมชาติที่เป็นผลึกเดี่ยว Single Crystal ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.5 eV อาจเนื่องมาจากความ การเจือปนของคาร์บอนในรูปอื่นเช่น แกรไฟต์ เป็นต้น และความไม่สมบูรณ์ของผลึกเพชร ดังเห็น ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

4.7 ค่า Breakdown Field ของสารกึ่งตัวนำเพชร

เมื่อทำการป้อนแรงดันคร่อมวัสดุที่มีความหนาค่าหนึ่งจนถึงแรงดันค่าหนึ่งแล้วทำให้เกิด กระแสไหลเป็นจำนวนมากผ่านวัสดุนั้นในทันทีทันใดเรียกว่าเกิด การพังทลาย (Breakdown) ค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการพังทลายนี้เรียกว่า ค่า Breakdown Field หรือ ค่าความคงทน ไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) จากการทดลองฟิล์มเพชรที่มีความหนา 20 μm โดยทำการต่อ วงจรดังรูปที่ 3.12 เนื่องจากห้องปฏิบัติการมีแหล่งจ่ายแรงดันได้สูงสุดเพียง 150 V จึงทำการจ่าย แรงดัน 0-150 V ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน เป็นดังกราฟดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรที่มีความหนา 20 μm

จากผลการทดลองจะพบว่าขณะที่ให้แรงดันไฟฟ้า 150 V กับฟิล์มเพชรที่มีความหนา 20 μm จะยังไม่มีปรากฏการณ์พังทลายดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ฟิล์มเพชรได้จาก

$$\text{Electric Field} = V/d \quad (4.9)$$

เมื่อ V คือ แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นงานฟิล์มเพชร (V)

d คือ ค่าความหนาของฟิล์มเพชร (cm)

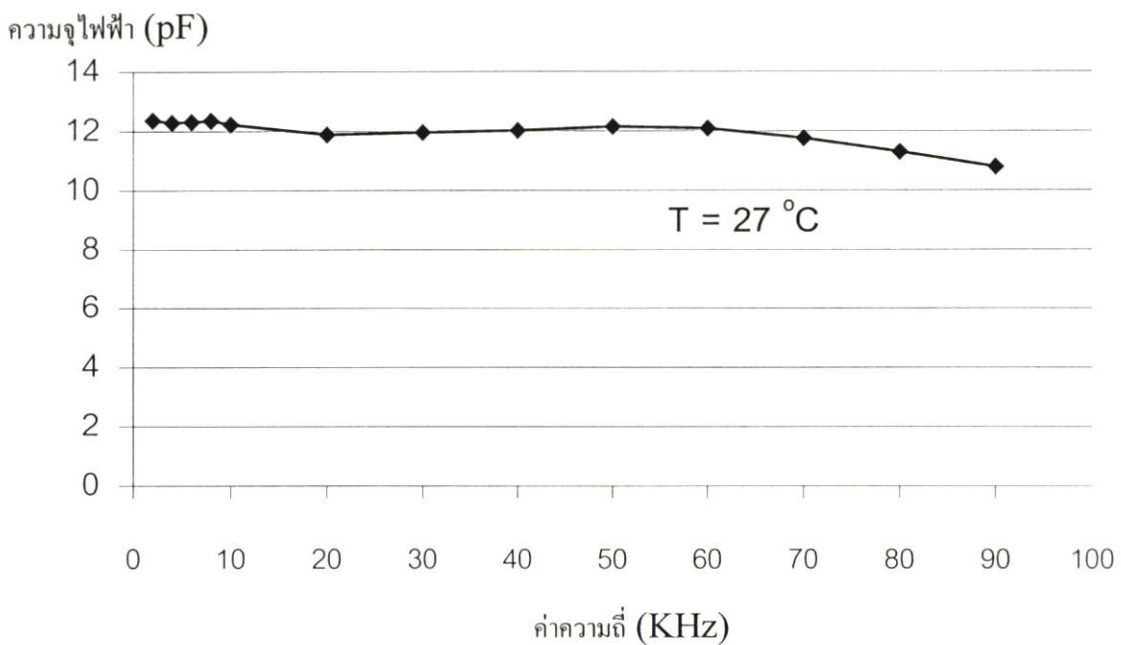
ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{Electric Field} &= 150/(20 \times 10^{-4}) \\ &= 7.5 \times 10^4 \text{ V/cm} \end{aligned}$$

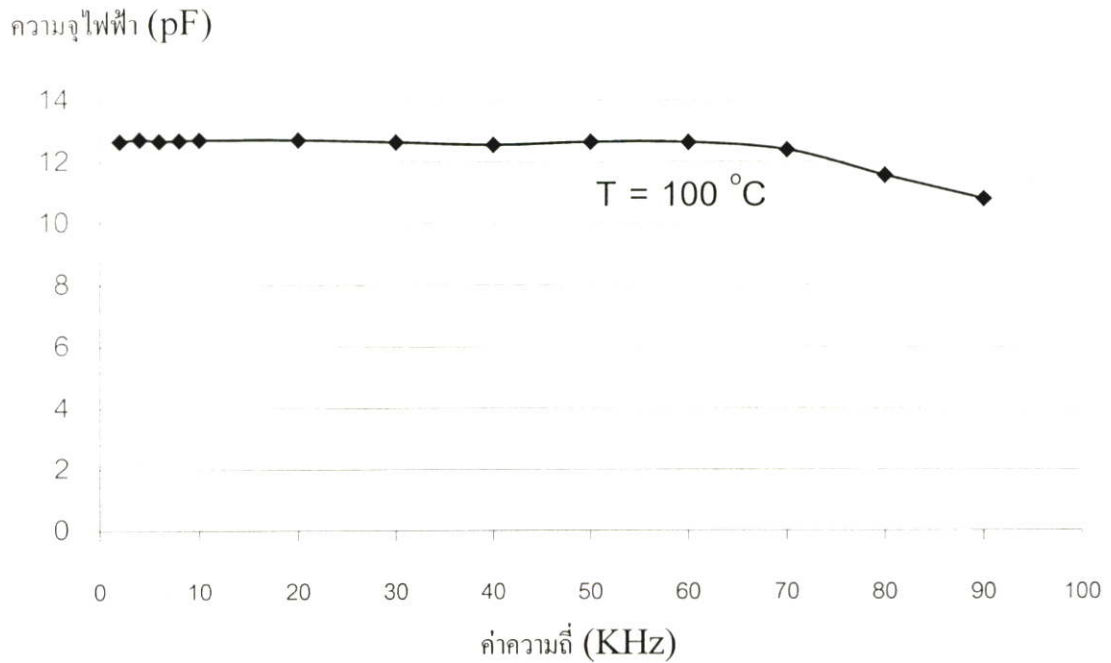
เราจึงกล่าวได้ว่าค่า Breakdown Field ของฟิล์มเพชรจะมีค่ามากกว่า $7.5 \times 10^4 \text{ V/cm}$

4.8 ผลการวิเคราะห์ตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชร

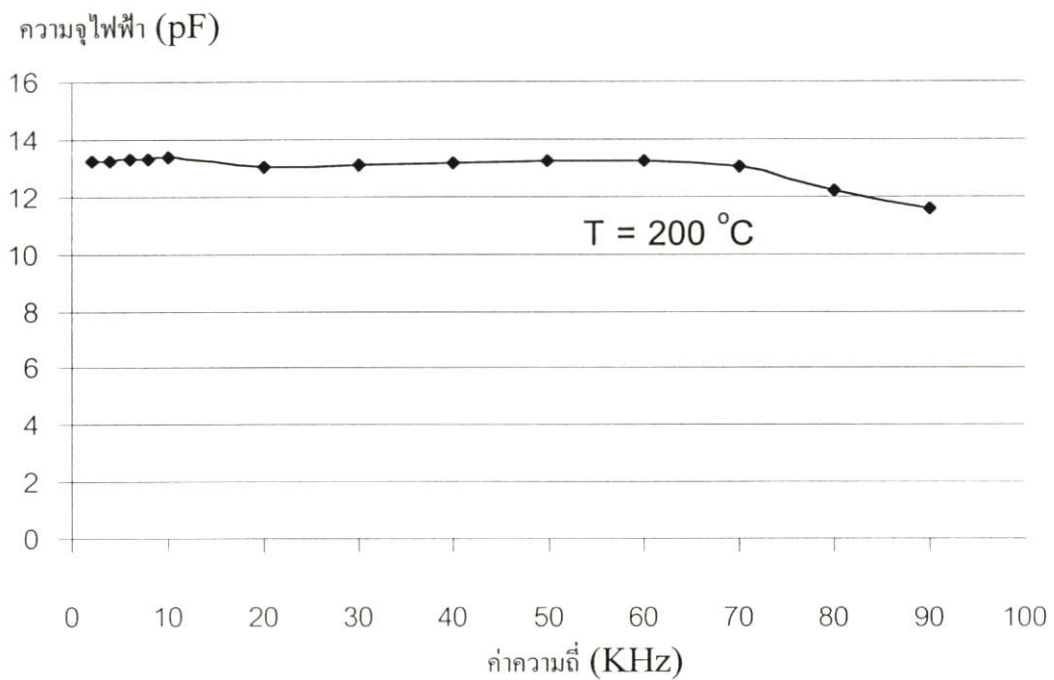
ผลการทดลองวัดค่า C-V ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่อุณหภูมิ 27 , 200 และ 300 องศาเซลเซียส ความถี่ค่าต่างๆ ด้วยเครื่องวัด PMC 3100A ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.23 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

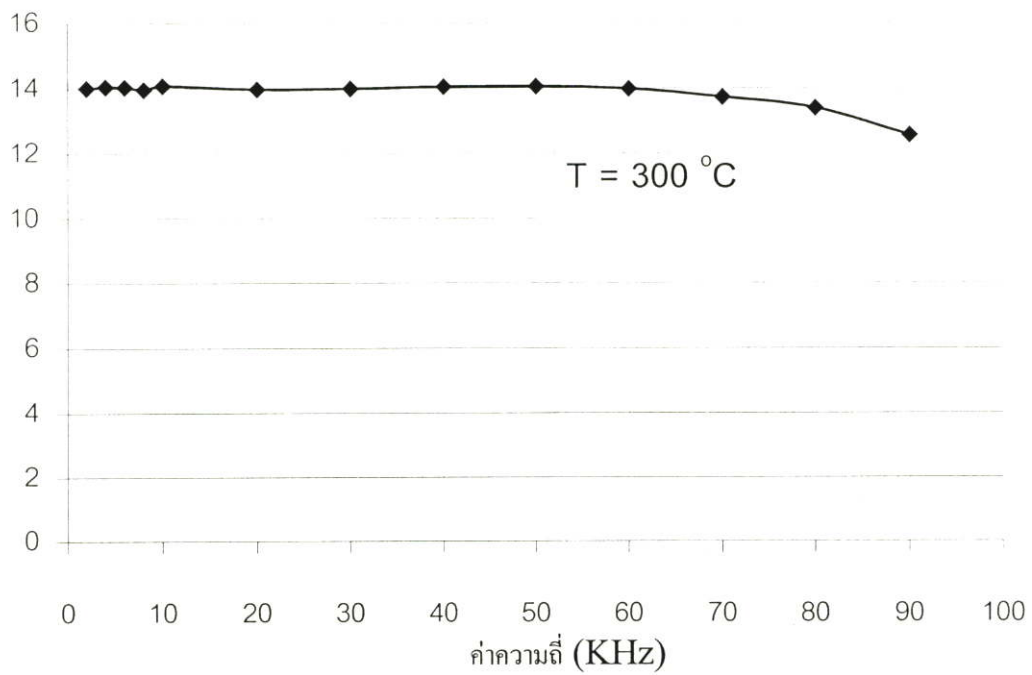


รูปที่ 4.24 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



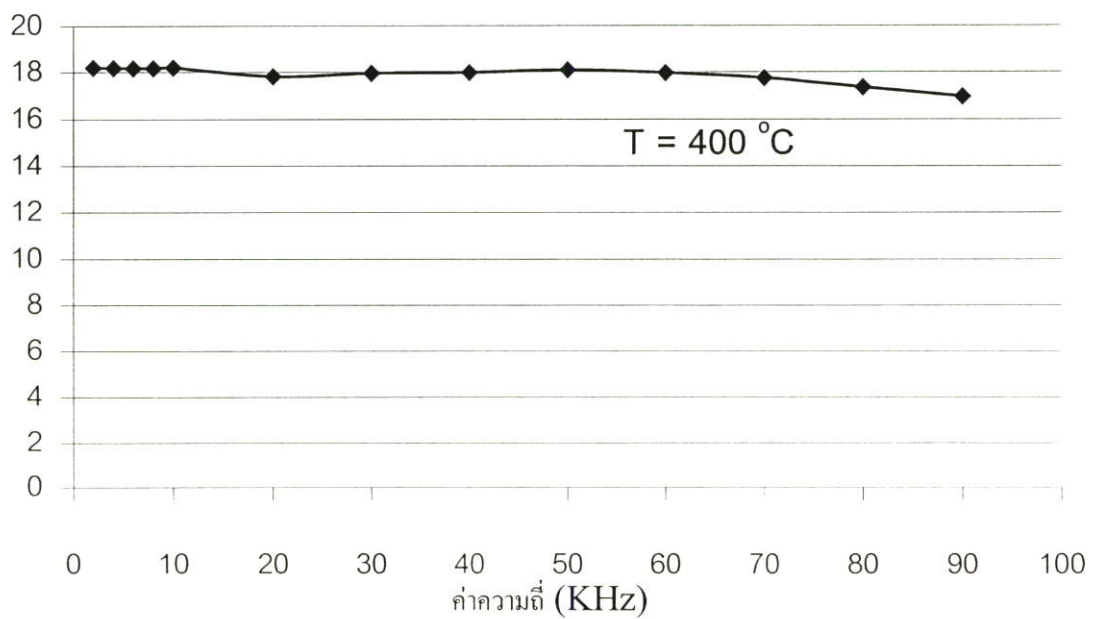
รูปที่ 4.25 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

ความจุไฟฟ้า (pF)

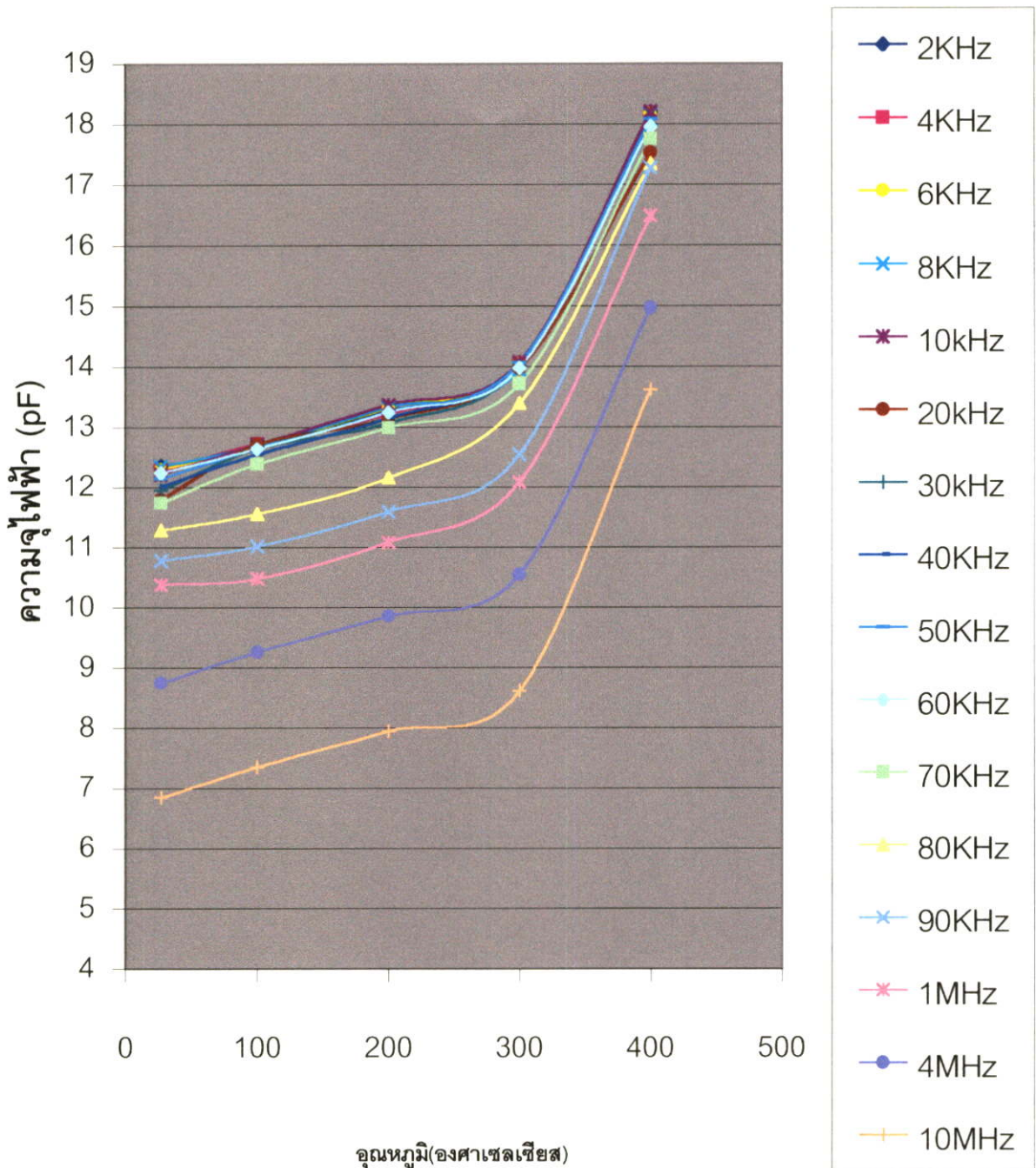


รูปที่ 4.26 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ความจุไฟฟ้า (pF)



รูปที่ 4.27 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



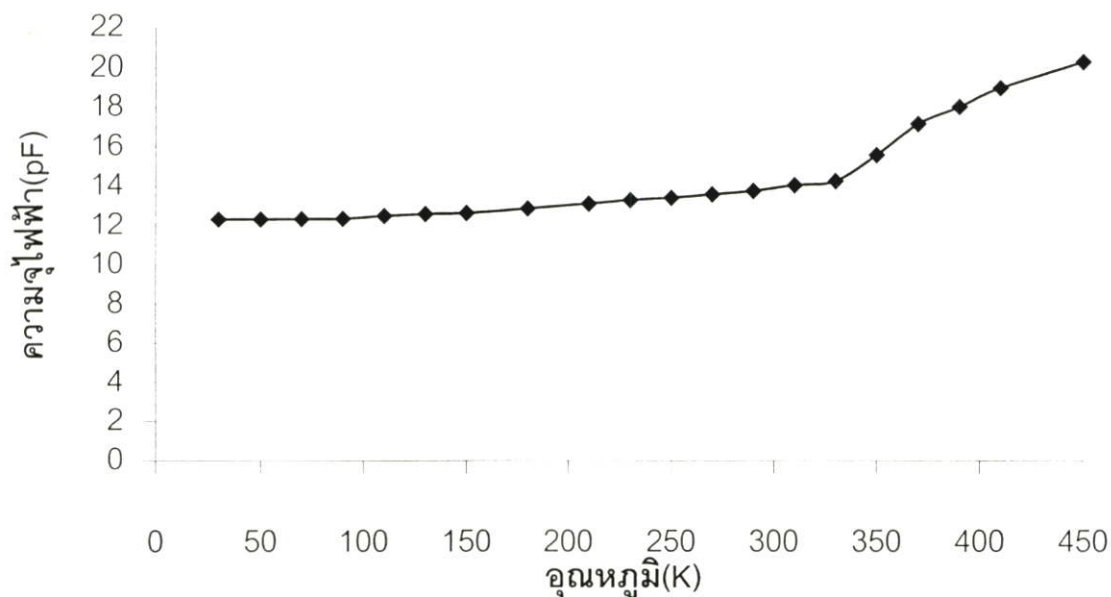
รูปที่ 4.28 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่ความถี่ต่างๆ และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ด้วยเครื่อง PMC 3100A

ผลการทดลองวัดค่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเครื่อง YHP 4271B โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์ ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งชุดการทดลองดังรูปที่ 3.12 ได้ผลการทดลองดัง ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่แรงดัน 10 โวลต์คงที่

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความจุไฟฟ้า (pF)
30	12.30
50	12.31
70	12.32
90	12.35
110	12.50
130	12.58
150	12.64
180	12.85
210	13.04
230	13.25
250	13.40
270	13.57
290	13.75
310	13.08
330	13.22
350	15.66
370	17.22
390	18.12
410	19.01
450	20.30

จากตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ผลการทดลองวัด Capacitance ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากฟิล์มเพชรที่แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์มเพชร ที่อุณหภูมิ 27, 200 และ 300 องศาเซลเซียส ผลที่ได้แสดงดังกราฟรูปที่ 4.29 ในการทดลองนี้กำหนดให้ที่ความต่างศักย์เท่ากัน และความถี่เท่ากัน จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากฟิล์มเพชรที่ใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกได้รับพลังงานความร้อนมากขึ้น ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระเกิดขึ้น โดยการกระตุ้นจากพลังงานภายนอกนี้เรียกว่า ขบวนการเกิดพาหะ (Generation) โดยอิเล็กตรอนจะไหลไปทางขั้วบวกและโฮลไหลไปทางขั้วลบทำให้เสมือนมี plate ซึ่งเกิดจากประจุ ทำให้เสมือนว่าระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุ (d) มีค่าลดลง ทำให้ค่าของตัวเก็บประจุมีค่ามากขึ้นตามสมการ ที่ 2.26 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มเพชรดังรูปที่ 4.29 จะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 0.6 pF ต่ออุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และจากรูปที่ 4.28 พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความถี่ต่ำกว่า 60 KHz ดังนั้นตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Combustion Activation CVD จะสามารถทำงานตอบสนองภายใต้ความถี่ 60 KHz

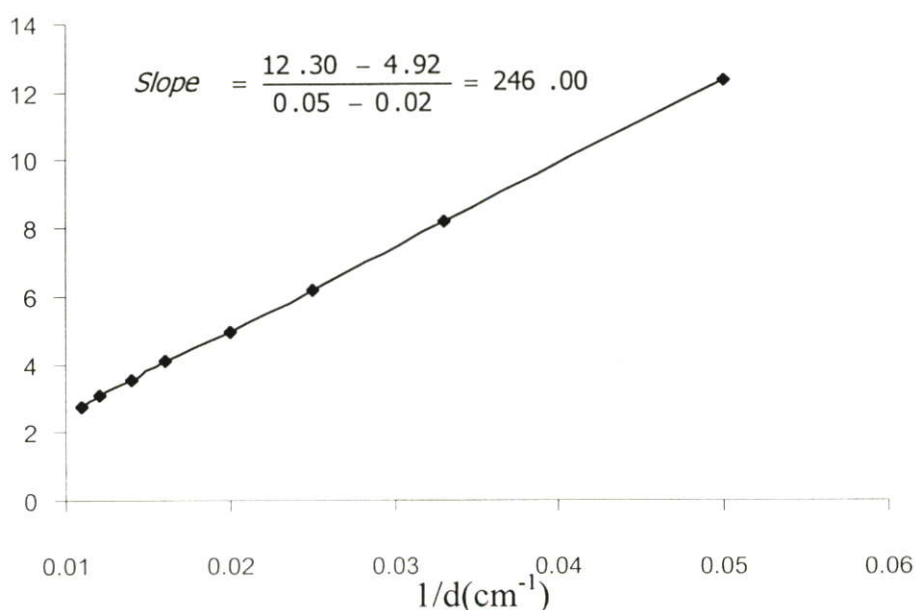
จากการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง YHP 4271B โดยทำการแปรค่าความหนาของฟิล์มเพชร โดยมีความหนา 20 μm , 30 μm , 40 μm , 50 μm และ 60 μm พื้นที่ของแผ่นโลหะกาวเงินมีขนาด 2.2X2.2 mm^2 โดยโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.13 จะได้ผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองวัดความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง PMC 3100A โดยทำการแปรค่าความหนาของฟิล์มเพชร

ความหนาของฟิล์มเพชร, d (μm)	ค่าความจุไฟฟ้า, C (pF)
20	12.31
30	8.22
40	6.15
50	4.92
60	4.12
70	3.52
80	3.10
90	2.73

จากตารางที่ 4.2 เมื่อนำไปพล็อตเป็นกราฟพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/d$ กับค่าความจุไฟฟ้าจะได้กราฟดังรูปที่ 4.30 เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.33 จะพบว่า slope ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/d$ กับ ความจุไฟฟ้า ก็คือ $\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A$ นั่นเอง

ความจุไฟฟ้า (pF)



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าของฟิล์มเพชรกับส่วนกลับความหนาของฟิล์มเพชร

ดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 5.74 ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่ามีความใกล้เคียงกับเพชรในธรรมชาติซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 5.7

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

ผลการวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติและข้อดีข้อเสียของฟิล์มเพชรที่สร้างจากกระบวนการ Combustion activation CVD โดยกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนี้อาศัยหลักการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของแหล่งจ่าย ออกซิเจน (O_2) และ อะเซทิลีน (C_2H_2) ซึ่งเป็นกระบวนการที่คิดค้นขึ้นใหม่ โดยมีอัตราการเกิดเพชรที่สูง เครื่องมือจัดหาได้ง่าย จากกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร กำหนดอัตราส่วนโดยปริมาตรของ O_2/C_2H_2 ที่ 0.7-0.98 โดยใช้ฐานรองเป็นซิลิกอนที่ทำการขัดด้วยครีမ်เพชรขนาด $5 \mu m$ ควบคุมอุณหภูมิฐานรองในช่วง 700-800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเติบโตประมาณ $60 \mu m/ชั่วโมง$ ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีระนาบ {111} และสามารถตรวจสอบคุณภาพของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จาก Raman spectroscopy พบว่ายอดคลื่นแรกของกราฟอยู่ที่ $1333 cm^{-1}$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่ายอดคลื่นแรกของผลึกเพชรในธรรมชาติซึ่งยอดคลื่นแรกของกราฟอยู่ที่ $1332 cm^{-1}$ แต่อย่างไรก็ตามจากค่ายอดคลื่นที่สองที่มีค่าประมาณ $1550 cm^{-1}$ จะพบว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีการเจือปนของ Amorphous Carbon ซึ่งเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอน ซึ่ง Amorphous Carbon ที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร แต่จากค่าความเข้มของยอดคลื่นที่ต่ำเมื่อเทียบกับยอดคลื่นแรกแสดงว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์มีคุณภาพดี จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้นี้จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆดังนี้

1. จากการทดสอบด้วย Seebeck effect จะพบว่ากัลวานอมิเตอร์ยังชี้ที่ตำแหน่งศูนย์ และแม้ว่าจะมีการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียสแก่เข็มนกัลวานอมิเตอร์ยังคงชี้ที่ตำแหน่งศูนย์เช่นเดิม ดังนั้นจำนวนประจุพาหะอิเล็กตรอนและประจุพาหะโฮลมีค่าเท่ากัน จึงสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้เป็นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก
2. ในการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปใช้งานต่างๆ จำเป็นมีการสร้างขั้วโลหะกับฟิล์มเพชร ซึ่งจะต้องพิจารณาคงสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรเพื่อเลือกชนิดของรอยต่อในการนำไปใช้งาน โดยจากการทดสอบรอยต่อโลหะ ทองคำ (Au), อะลูมิเนียม (Al) และ กาวเงิน (Silver Paste) จะพบว่า ทองคำ และ กาวเงิน มีคุณสมบัติรอยต่อโอห์มิก ซึ่งกระแสสามารถไหลได้สะดวก ดังนั้นโลหะทองคำ และ กาวเงิน จึงถูกเลือกในการนำไปใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับฟิล์มเพชร และขั้วโลหะกาวเงินมีความนำไฟฟ้าสูงกว่าขั้วโลหะทองคำ
3. แต่ในกรณีขั้วโลหะอะลูมิเนียมจะคุณสมบัติรอยต่อเรกติไฟร์ ซึ่งจะเห็นว่ามีกำแพงศักย์เกิดขึ้น และมีแรงดันซีดีเริ่มที่ 1.0 V ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแตกต่างของ

- ฟังก์ชันงานของเพชรกับฟังก์ชันงานของอะลูมิเนียมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.66 eV ซึ่งเป็นค่ากำแพงศักย์ในทางอุดมคติ
4. เมื่อทำการตรวจสอบตัวต้านทานที่สร้างจากฟิล์มเพชรจะพบว่าค่า สภาพความต้านทานของฟิล์มเพชร จะมีค่าประมาณ $2.52 \times 10^{17} \Omega\text{-cm}$ ที่อุณหภูมิห้องและพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานจะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของสารกึ่งตัวนำ
 5. จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านและอุณหภูมิ จะพบว่าค่าสภาพความต้านทานของเพชรจะเปลี่ยนน้อยมากเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ดังนั้นเพชรจึงสามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้
 6. เมื่อพิจารณาสภาพความต้านทานจะสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของประจุพาหะชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งนำไปสู่ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 5.2 eV ค่าที่ได้นี้จะมีความใกล้เคียงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของเพชรในธรรมชาติ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.5 eV
 7. จากการทดสอบหาค่า Breakdown Field ของฟิล์มเพชรพบว่า Breakdown Field ของฟิล์มเพชรจะมีค่ามากกว่า $7.5 \times 10^4 \text{ V/cm}$
 8. เมื่อนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มาทำการสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยใช้ฟิล์มเพชรเป็นแผ่นไดอิเล็กตริก และกาเวเงินเป็นแผ่นตัวนำ จากการทดลองพบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากฟิล์มเพชรที่ใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกเป็นสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนมากขึ้น ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระเกิดขึ้น ซึ่งกระตุ้นจากพลังงานภายนอกนี้เรียกว่า ขบวนการเกิดพาหะ (Generation) โดยอิเล็กตรอนจะไหลไปทางขั้วบวกและโฮลไหลไปทางขั้วลบทำให้เสมือนมี plate ซึ่งเกิดจากประจุ ทำให้เสมือนวาระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุ (d) มีค่าลดลง
 9. เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ไฟฟ้า พบว่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มเพชรมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความถี่ต่ำกว่า 60 KHz ดังนั้นตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Combustion Activation CVD จะสามารถทำงานตอบสนองภายใต้ความถี่ 60 KHz
 10. จากการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความหนาของฟิล์มเพชร จะพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 5.74 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเพชรในธรรมชาติซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 5.7

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Kittel, "Introduction to Solid State Physics", John Wiley & Sons, New York, Sixth Edition
- [2] A.K. Ghosh, C. Fishman and T. Feng. "Theory of the Electrical and Photovoltaic Properties of Polycrystalline Silicon." ,J. Appl.Phys. 1980, pp. 407
- [3] Robert F. David. **Diamond Films and Coatings**. U.S.A. : Noyes Publications. 1993.
- [4] Lawrence S. Pan , Don R. Kania. **Diamond : Electronic Properties and Applications**. Boston : Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [5] K.E. Spear, J.P. Dismuke. **Synthetic Diamond : Emerging CVD Science and Technology**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [6] "Diamond Films For Electric Packing", NASA, USA.
- [7] Teompong Pheekul " Study on Electrical Characteristics of p-Type Diamond/n-Type Silicon Heterojunction Diodes," Dotoral Thesis., Tokai University Kyushu Campus.
- [8] คุณิต เครื่องงาม "สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ พลาสติก เทคโนโลยี และ การใช้งานต่าง เล่ม 1" สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] Alan L. Fehrenbruch , Richard H. Bube **Fundamentals of Solar cells**. Academic press 1983 pp. 333
- [10] นาวิณ อุทัยวัฒนานนท์, โยชิน วงศ์ประเสริฐ, สันติ ชาติรูประชีวิน, รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง "การสังเคราะห์ผลึกเพชรโดยวิธีการ Combustion Activation ในบรรยากาศบนฐานรองซิลิกอนที่มีการขัดพื้นผิว" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 20 วันที่ 13-14 พฤศจิกายน 2540 หน้า 507

ภาคผนวก ก



รูปที่ 1 เครื่องวัดอุณหภูมิด้วยการแผ่รังสี 3M Heat Tracer Radiation Thermometer

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

นายนาวิน อุทัยวัฒนานนท์

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2518

สถานที่เกิด

จังหวัด กรุงเทพมหานคร

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์)

สถานที่สำเร็จการศึกษา

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2538