



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์



RCH
ย 842ก
2556

b. 12700186
i.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 137846
วันเดือนปี ๕ 6 ค.ศ. 2558

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาอุปกรณ์วัดรังสีด้วยฟิล์มเพชร

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2556

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 495,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 สิงหาคม 2555 ถึง 28 กันยายน 2556

โยธิน วงศ์ประเสริฐ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาอุปกรณ์วัดรังสีด้วยฟิล์มเพชร โดยจะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในสามโครงสร้างได้แก่ โครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิก-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ไดโอด โครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิก และโครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิก-โลหะ เพื่อทำการวัดรังสีเอ็กซ์โดยทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า พื้นฐานของไดโอดฟิล์มเพชรก่อนและหลังได้รับการฉายรังสีเอ็กซ์เปรียบเทียบทำการไบอัสตรงและย้อนกลับ

คำสำคัญ : อุปกรณ์วัดรังสี ฟิล์มเพชร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Research Title: Study on radiation detector by diamond films

Researcher: Yothin Wongprasert

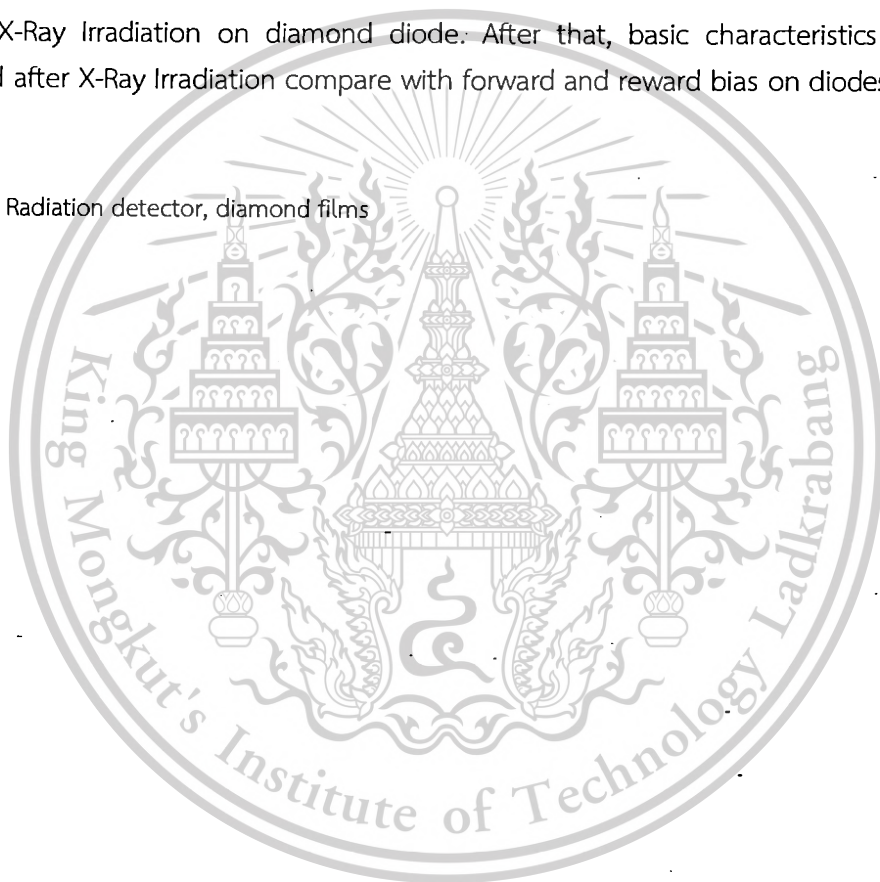
Faculty: Engineering

Department: Electronics engineering

ABSTRACT

This research presents the Study on radiation detector by diamond films in three diode structure such as metal-diamond intrinsic-semiconductor(MIS), metal-diamond intrinsic (MS) and metal-diamond intrinsic – metal (MIM) . This detector studies about effect of X-Ray Irradiation on diamond diode. After that, basic characteristics of diodes before and after X-Ray Irradiation compare with forward and reward bias on diodes.

Keywords : Radiation detector, diamond films



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณผู้ที่ให้การช่วยเหลือหรือให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการวิจัย และการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2556

โยธิน วงศ์ประเสริฐ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.3 หลักการและขั้นตอนการวัดรังสี.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 เครื่องมือในการวิเคราะห์.....	20
3.2 การเตรียมตัวอย่าง.....	23
3.3 การทดลอง.....	24
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	25
4.1 ผลการทดลองสมบัติทางไฟฟ้า.....	25
4.2 ผลการทดลองวัดรังสีเอ็กซ์.....	26
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	27
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	27
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	27
รายงานสรุปการเงิน.....	28
บรรณานุกรม.....	29
ประวัตินักวิจัย.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สมบัติของวัสดุสารกึ่งตัวนำ.....	2
2.1 กระบวนการนำกระแสผ่านชั้นฉนวนพื้นฐานในไดโอดโครงสร้าง MIS.....	16
3.1 สรุปเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	26
4.1 ค่า Inter-planar spacing ของเพชรสังเคราะห์ (ASTM (6-675)).....	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ไดอะแกรมแถบพลังงานของซอติคไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	8
2.2 ลักษณะไดโอดโครงสร้าง MIS.....	10
2.3 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติภาวะสมดุลความร้อน.....	10
2.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของพีเอ็นไดโอดก่อนและหลังฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 55 keV และ 70 keV ที่เวลา 55 และ 205 วินาที.....	12
2.5 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง.....	13
2.6 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	14
2.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสซอติคไดโอดและไดโอดแบบพี-เอ็น.....	15
2.8 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงปลอดประจุ.....	17
2.9 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงกลับประจุพาหะ.....	17
2.10 ลักษณะแถบพลังงานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำของไดโอดในช่วงกลับประจุพาหะ.....	18
2.11 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น space charge เทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิว.....	21
2.12 (ก) แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ (ข) การกระจายของประจุภาวะส่วนกลับประจุของไดโอด.....	20
3.1 ครีမ်เพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิคอนขนาดเมล็ดผลึก 0.25 ไมครอน.....	25
3.2 ภาพถ่ายพื้นผิวของฐานรองซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการเตรียมฐานรอง.....	25
3.3 การสร้างอุปกรณ์วัดรังสีโครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิก-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	28
3.4 การสร้างอุปกรณ์วัดรังสีโครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิก.....	29
3.5 การสร้างอุปกรณ์วัดรังสีโครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิก-โลหะ.....	30
4.1 ภาพถ่ายจาก SEM.....	31
4.2 X-ray diffraction.....	32
4.3 ค่า Raman spectrum ของฟิล์มเพชร.....	33
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ.....	34
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน R/R _i ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (30 °C ถึง 400 °C).....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในการสร้างอุปกรณ์วัดรังสีชนิดที่มีโครงสร้างจากวัสดุฟิล์มบางเพชรชนิดพี/อินทริน ซิก-ซิลิคอน/เอ็น-ซิลิคอน ซึ่งฟิล์มเพชรเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติที่เด่นเป็นพิเศษ ทั้งทางกายภาพ ทางฟิสิกส์ ทางไฟฟ้า และทางแสงหลายประการเช่น ฟิล์มเพชรที่มีช่องว่างแถบพลังงานสูงถึง 5.45 eV มีความทนทานต่อสารเคมี มีความหนาแน่นสูงประมาณ 2.8-3.5 g/cm³ ทนต่อการกัดกร่อน เป็นตัวนำความร้อนที่ดี มีค่า Dielectric constant ต่ำประมาณ 5.6 มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงเช่นตัวตรวจวัดแสง(Photo detector)หรือตัวตรวจวัดรังสี(radiation detector)โดยโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดตัวนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับโครงสร้างของอุปกรณ์วัดรังสีชนิด พี-ไอ-เอ็น ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดรังสีที่มีความไวแสงสูงมากชนิดหนึ่ง แต่อุปกรณ์วัดรังสีชนิดใหม่ที่สร้างขึ้นนี้แตกต่างจากอุปกรณ์วัดรังสีชนิด พี-ไอ-เอ็นแบบปกติ คือการนำเอาฟิล์มบางเพชรชนิดพีซึ่งเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำตัวใหม่อีกชนิดหนึ่งมาใช้แทนสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นเช่น ซิลิคอน เยอรมันเนียม หรือสารประกอบในกลุ่ม III-V ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

อุปกรณ์ตรวจวัดแสงและรังสีถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเช่น ในชุดควบคุมการเปิด-ปิดแบบไร้สายใช้ตรวจนับจำนวนและตรวจสอบคุณภาพของสินค้าในทางอุตสาหกรรม ใช้เป็นตัวรับสัญญาณทางไกลในระบบสื่อสารความเร็วสูง และใช้ในการตรวจวัดรังสีต่างๆ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้งานในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของผลึก โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทธาตุเดี่ยว (Element semiconductor) และประเภทสารประกอบ (Compound Semiconductor)

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

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

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

เอกสารนี้และเมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยสามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ด้วยเทคนิคต่างๆ อนุญาตให้ฟิล์มเพชรถูกนำมาใช้งานการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประยุกต์ใช้งานต่างๆอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Photonic devices) ซึ่งเมื่อพิจารณาสมบัติเปรียบเทียบได้ดังตาราง

ตารางที่ 1.1 สมบัติของวัสดุสารกึ่งตัวนำ

Properties	Single-crystal Diamond	CVD Diamond	Silicon
Nature of band-gap	Indirect	Indirect	Indirect
Electronic band-gap (300 K)	5.45 eV	5.45 eV	1.12
Electron Mobility(cm ² /V.s)	2200	1350-1500	1350
Hole Mobility(cm ² /V.s)	1600	480	480
Electron saturated velocity (cm/s)	2.7×10^7	2.7×10^7	1×10^7
Hole saturated velocity (cm/s)	1.05×10^7	1.05×10^7	0.9×10^7
Breakdown field (V/cm)	$1-20 \times 10^6$	-	0.3×10^6
Refractive index: (visible light)	2.40-2.46	2.34	3.4
Density (g/cm ³)	3.52	2.8-3.5	2.42
Dielectric constant: (300 K)	5.70	5.6	11.8
Thermal Conductivity(Watts/cm ⁻⁰ C)	20	-	1.5

อุปกรณ์ตัวรังสี คืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานปริมาณรังสีให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนมากมักสร้างมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในปัจจุบันนี้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น

1. โฟโตอิมิชันดีเทคเตอร์(Photoemission detector)
2. โฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor)
3. อุปกรณ์ตัวรังสีชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (metal-semiconductor photodiode)
4. อุปกรณ์ตัวรังสีชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ(metal-semiconductor-metal photodiode)
5. อุปกรณ์ตัวรังสีชนิดรอยต่อพี-เอ็น(p-n photodiode)
6. อุปกรณ์ตัวรังสี ชนิดอะวาลานซ์ (Avalanche PhotoDiode : APD)
7. อุปกรณ์ตัวรังสีชนิด พี-ไอ-เอ็น (p-i-n photodiode)

ซึ่งในแต่ละชนิดนั้นต่างก็มีคุณสมบัติการทำงานและข้อดี-ข้อเสีย ที่แตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและชนิดของตัวตรวจวัดแสง เนื่องจากฟิล์มเพอร์มีคุณสมบัติที่โดดเด่นอยู่หลายประการ เช่น มีความแข็งแรง, ทนทานต่อการกัดกร่อน, ทนต่อรังสี, นำความร้อนได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การดัดกลืนต่ำ, มีช่องว่างแถบพลังงานสูง, มีความหนาแน่นสูง, มีความทนทานต่อสารเคมี, มีค่า Dielectric constant ต่ำ, มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ และทนทานต่ออุณหภูมิ เป็นต้น จึงสามารถนำมาใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น นำมาเคลือบเพื่อเพิ่มความแข็งแรง, นำมาทำเป็นแผ่นระบายความร้อน, นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทนความร้อน, นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทงรังสี, ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงหรือ window layer เป็นต้น

นอกจากนี้แล้วยังนิยมนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด(Hetero junction และ Homo junction), หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทางแสง เช่น อุปกรณ์ตัวรังสีโครงสร้างโลหะ-ฟิล์มเพอร์-โลหะ, ตัวเอกสารตัวรังสีและวงจรรวม เป็นต้น

การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในงานวิจัยจึงเลือกฟิล์มเพชรนำมาทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดรังสี แต่ในตารางสมบัตินั้นเป็นเพชรผลึกเดี่ยว การสังเคราะห์ที่ได้จากทุกประเภทของฟิล์มเพชรจะมีสมบัติเป็นโพลีคริสตอลและสมบัติทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกเพชรนั้นๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- สร้างอุปกรณ์สังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ที่ได้พื้นที่ฟิล์มมาก
- นำฟิล์มสังเคราะห์มาออกแบบเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดรังสี
- ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าในการตอบสนองของรังสีย่านต่างๆ
- ประยุกต์นำไปใช้สร้างภาพจากข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการสร้างฟิล์มเพชรให้มีพื้นที่มากพอสำหรับสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีย่านความถี่ต่างๆ แบบหลายตัวบนหัววัดเดียวกัน ซึ่งต้องใช้กระบวนการแบบเลือกพื้นที่ของอุปกรณ์และต้องเป็นวิธีที่เหมาะสม โดยจำนวนของหัววัดจะมีผลต่อรายละเอียดของข้อมูลเพียงพอต่อการนำข้อมูลมาประมวลผลเป็นภาพหรือปริมาณความเข้มของรังสี และนอกจากรังสีแล้วจะทำการนำหัววัดทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อหัววัดได้รับรังสีชนิดต่างๆ เพื่อนำไปประยุกต์การใช้งานด้านอื่นๆ ต่อไป

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัย

- ศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรให้ได้พื้นที่และตำแหน่งตามกำหนด
- ศึกษาการสร้างโครงสร้างของฟิล์มให้เหมาะสมกับการวัดรังสี
- ศึกษาการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดกับรังสีชนิดต่างๆ
- เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาการศึกษาอุปกรณ์วัดรังสีด้วยฟิล์มเพชรนี้ จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรและทำการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าก่อนและหลังฉายรังสีที่ระดัความแรงและเวลาต่าง ๆ

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเพื่อค้นหาวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ ๆ อีกด้วย ชาติคาร์บอนจัดเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว(element semiconductor)เช่นเดียวกับซิลิคอนแต่ยังไม่มีการนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไวงาน(active device)เช่นซิลิคอนทั้งนี้เนื่องจากปกติโดยทั่วไปคาร์บอนมักจะอยู่ในรูปของผลึก หรืออาจอยู่ในรูปของกราฟิตซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี นอกจากนี้ยังอาจอยู่ในรูปของผลึกที่เรียกว่าเพชร(diamond) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดช่องว่างพลังงานกว้าง (Large band gap semiconductor) และเหมาะที่จะนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติพิเศษต่างจากซิลิคอนได้ปกติเพชรมักเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยอาศัยสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ความดันสูง ดังนั้นเพชรธรรมชาติจึงเกิดขึ้นที่ชั้นใต้ดินซึ่งลึกมากและใช้เวลานาน ทำให้เป็นวัสดุที่หายากประกอบกับเพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายอย่างที่เด่นเป็นพิเศษเหนือกว่าวัสดุอื่นๆ เช่น แข็งแรงที่สุด ทนต่อการกัดกร่อนมากที่สุด ทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถนำความร้อนได้ดีและมีคุณสมบัติเป็นวัสดุโปร่งแสง โดยเฉพาะเมื่อนำไปเจียรนัยจะเป็นเครื่องประดับที่มีความงดงามมากที่สุด ดังนั้นเพชรธรรมชาติจึงมีราคาแพงเหมาะที่จะเป็นเครื่องประดับมากกว่า อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของนักวิจัยจำนวนมาก ที่จะสังเคราะห์เพชรขึ้นมาเพื่อการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ รวมทั้งการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในที่สุดประมาณกลางปี ค.ศ. 1950 ก็มีรายงานถึงความสำเร็จในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการ High Pressure High Temperature หรือ HPHT และกระบวนการ Chemical Vapor Deposition หรือ CVD แต่ในระยะแรกๆ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรมีข้อจำกัด และสามารถสังเคราะห์ขึ้นบนวัสดุฐานรองที่เป็นเพชรเท่านั้น กระทั่งต่อมาราวปี ค.ศ. 1970 จึงประสบความสำเร็จสามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นบนแผ่นฐานรองที่ไม่ใช่วัสดุเพชรได้ ซึ่งความสำเร็จนับเป็นก้าวสำคัญเพราะเป็นการเปิดประตูกว้างสู่ตลาดเทคโนโลยีของเพชรอย่างแท้จริง ฟิล์มเพชรถูกนำไปประยุกต์ใช้ด้านต่างๆ อย่างกว้างขวางและจริงจังมากยิ่งขึ้น สำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากฟิล์มเพชร มีคุณสมบัติทางแสงที่เด่นหลายประการ จึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะนำไปประยุกต์ใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสง(Photonic Devices or Opto-Devices) โดยทำหน้าที่เป็นตัวอุปกรณ์ตรวจวัดแสง(Photo detector)

สำหรับคาร์บอนสามารถมีลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 2 รูปแบบคือ ผลึกกราฟิต และผลึกเพชร ซึ่งอะตอมในผลึกกราฟิต มีการเกาะเกี่ยวกันเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมและไม่มีการเชื่อมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันเหมือนวงแหวนหกเหลี่ยมของเพชร อีกทั้งคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ Trogonally กับอะตอมทั้งสามที่อยู่ใกล้เคียงกันด้วยพันธะแบบ sp^2 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่ากับ 1.42 \AA ระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ 3.35 \AA ค่าคงที่แลตทิสเท่ากับ 2.46 \AA

ส่วนผลึกเพชรมีโครงสร้างเป็นแบบโครงข่ายทรงเหลี่ยมสี่หน้า(Tetrahedral Network) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่ากับ 1.54 \AA โดยคาร์บอนแต่ละอะตอมจะเกาะกับอะตอมคาร์บอนอื่นอีก 4 อะตอมเป็นโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ชนิดซิกมาและมีวงโคจรอิเล็กตรอนเป็นแบบ sp^3 ที่แข็งแรงมาก ส่วนการจัดเรียงตัวของหนึ่งยูนิตเซลล์ จะประกอบไปด้วยอะตอมคาร์บอนแปดอะตอม

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่วากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดย 1/8 ของอะตอมจะอยู่ที่มุมทั้งแปด 1/2 ของอะตอมอยู่ที่แต่ละหน้าของยูนิตเซลล์และสุดท้ายมีสี่อะตอมฝังตัวอยู่ในยูนิตเซลล์

จากโครงสร้างของเพชรที่ประกอบด้วยพันธะทางเคมีแบบ covalent bond ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมาก จึงมีผลทำให้เพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าหลายประการที่เด่นเป็นพิเศษแตกต่างไปจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ คุณสมบัติที่สำคัญบางประการของเพชรสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

- มีความแข็งแรงสูง และทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีสูง
- ทนทานต่ออุณหภูมิ ทนต่อรังสีได้ดี และนำความร้อนได้ดี
- มีการขยายตัวเนื่องมาจากความร้อนที่ต่ำ

นอกจากนั้นฟิล์มเพชรยังมีคุณสมบัติทางแสงโดยมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่ำหรือ Low absorption coefficient (สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่า 5.5 eV.) และฟิล์มเพชรที่มีความบริสุทธิ์ จะมีความโปร่งแสงสูง คุณสมบัติข้อนี้ทำให้เพชรมีความเหมาะสมที่จะถูกใช้งานเป็นชั้นหน้าต่างรับแสง หรือ ชั้นวินโดว์(Window layer) ในอุปกรณ์ทางแสง(Photonic devices) คุณสมบัติอื่นๆที่สำคัญของผลึกเพชร และฟิล์มเพชรที่ได้จากกระบวนการ CVD สามารถเทียบกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนซึ่งใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆในปัจจุบันได้ดังตารางที่ 1.1

เนื่องจากฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติที่โดดเด่นอยู่หลายประการ เช่น มีความแข็งแรง, ทนทานต่อการกัดกร่อน, ทนต่อรังสี, นำความร้อนได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ, มีช่องว่างแถบพลังงานสูง, มีความหนาแน่นสูง, มีความทนทานต่อสารเคมี, มีค่า Dielectric constant ต่ำ, มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ และทนทานต่ออุณหภูมิ เป็นต้น จึงสามารถนำมาใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น นำมาเคลือบเพื่อเพิ่มความแข็ง, นำมาทำเป็นแผ่นระบายความร้อน, นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทนความร้อน, นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทนรังสี, ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงหรือ window layer เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังนิยมนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด(Hetero junction และ Homo junction) หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทางแสง เช่น โฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-ฟิล์มเพชร-โลหะตัวตรวจจับรังสีและวงจรรวม เป็นต้น

รังสีเอ็กซ์ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันยกตัวอย่างเช่น ในด้านการแพทย์ที่ใช้ฟิล์มภาพเอ็กซ์เรย์ช่วยในการวินิจฉัยโรค ด้านความปลอดภัย ช่วยในการตรวจค้นหาอาวุธ หรือสิ่งต้องสงสัยที่ซุกซ่อนอยู่ในวัตถุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ด้านการเกษตรกรรม รังสีเอ็กซ์สามารถช่วยในการถนอมอาหาร และด้านอุตสาหกรรม รังสีเอ็กซ์ช่วยตรวจรอยร้าวของวัสดุสินค้า หรือรอยเชื่อมต่อต่างๆ เป็นต้น ส่วนทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำก็เริ่มมีการนำรังสีเอ็กซ์มาใช้ในงานวิจัย ในช่วงแรกเริ่มงานวิจัยที่ทำการศึกษารายรังสีเอ็กซ์พบว่าจะใช้พลังงานการฉายรังสีไม่เหมาะสมแก่ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์นั้นแย่ง ทั้งกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงที่ลดลง กระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้น และอายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง เนื่องจากการฉายรังสีที่พลังงานสูงไปส่งผลทำให้เกิดความเสียหายและจุดบกพร่อง (Defect) ในโครงสร้างอุปกรณ์ ต่อมาได้มีนักวิจัยที่ทำการศึกษาลักษณะและเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสมแก่ตัวไดโอดพีเอ็น พบว่าหลังการฉายรังสีที่พลังงานและเวลาเหมาะสมสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของไดโอดพีเอ็น ค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 1000 เท่า เมื่อเทียบกับก่อนฉายรังสีและค่ากระแสรั่วไหลมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้มีค่าตัวแปรอื่น ได้แก่ ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance) ก็มีค่าลดลงเช่นกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการฉายรังสีเอ็กซ์ออกมาอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับการฉายรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.01-10 นาโนเมตร คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์คล้ายคลึงกับแสงสว่างธรรมดาเป็นส่วนใหญ่ แต่คุณสมบัติพิเศษของรังสีเอ็กซ์ คือ มีอำนาจทะลุทะลวง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผ่านวัตถุต่างๆ ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแน่นทึบ และน้ำหนักของวัตถุที่รังสีเอกซ์ผ่าน นอกจากนั้น ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมี ชีวะ และอื่นๆอีกด้วย ในเบื้องต้นมีการใช้รังสีเอกซ์สำหรับถ่ายภาพ เพื่อการวินิจฉัยโรคและงานผลึกศาสตร์ (Crystallography) รังสีเอกซ์เป็นการแผ่รังสีแบบแตกตัวเป็นไอออน และมีอันตรายต่อมนุษย์

ทฤษฎีอิเล็กตรอนสมัยปัจจุบันอธิบายถึงการเกิดรังสีเอกซ์ว่า ธาตุประกอบด้วย อะตอมจำนวนมากในอะตอมแต่ละตัวมีนิวเคลียสเป็นใจกลาง และมีอิเล็กตรอนวิ่งวนเป็นชั้นๆ ธาตุเบาจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่น้อยชั้น และธาตุหนักมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่หลายชั้น เมื่ออะตอมธาตุหนึ่งถูกยิงด้วยอิเล็กตรอนจะทำให้ อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในถูกชนกระเด็นออกมาในรูปรังสี ถ้าอิเล็กตรอนที่ชนเข้าไปมีพลังงานมาก จะชนอิเล็กตรอนในชั้นลึกๆ ทำให้ได้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานมากเรียกว่า "ฮาร์ดเอกซ์เรย์" (hard X-ray) ถ้าอิเล็กตรอนที่ชนมีพลังงานน้อยเข้าไปได้ไม่ลึกนัก จะเรียกรังสีนี้ว่า "ซอฟต์เอกซ์เรย์" (soft X-ray) ลักษณะและคุณสมบัติของเอกซ์เรย์

1. เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีช่วงคลื่นสั้นมาก คืออยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.04-1000 Å หรือ อยู่ในช่วงระหว่างรังสีแกมมา กับ รังสีอัลตราไวโอเล็ต
2. มีคุณสมบัติเหมือนแสงสว่างธรรมดา เป็นต้นว่า เดินทางเป็นเส้นตรง ถ้าเดินทางในสุญญากาศแล้วเดินทางด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ 186,000 ไมล์ต่อวินาที หรือ 3×10^{10} เซนติเมตร/วินาที นอกจากนั้นแล้วยังมีการสะท้อนกลับ หักเห และ เบี่ยงเบนได้ เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา
3. ไม่หักเหโดยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า
4. เกิดจากการที่อนุภาคอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งไปชนเป้า (Target) อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้ จะไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ ที่อยู่ในวงโคจรของอะตอม ของเป้า ให้หลุดกระเด็น ออกนอกวงโคจร
5. ทำให้เกิดการเรืองแสง (Fluorescence และ Phosphorescence) ในสารพิเศษบางอย่าง
6. ดูดกลืน (Absorbed) โดยสสาร (Matter) ทุกชนิดมากบ้างน้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และน้ำหนักของอะตอมของสสารนั้น
7. ทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้า (Ionization) เมื่อผ่านไปในอากาศหรือก๊าซ
8. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เมื่อเอกซ์เรย์ไปถูกฟิล์มถ่ายรูป จะทำให้ฟิล์มนั้นดำ จึงนำผลอันนี้ มาใช้ในการบันทึกภาพรังสีลงบนแผ่น ฟิล์มเอกซ์เรย์
9. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวะ เป็นต้นว่า ทำให้เซลล์ของร่างกายเปลี่ยนแปลง หรือ เกิดการผ่าเหล่า (Genetic mutation) ถ้าได้รับรังสีเป็น จำนวนมาก และนานพอ
10. มีอำนาจในการทะลุทะลวง (Penetration) สูง สามารถทะลุผ่าน เนื้อหนังของมนุษย์ และ สัตว์ได้ แต่ไม่สามารถทะลุผ่าน แผ่นตะกั่ว หรือคอนกรีต หนาๆ ได้

การเกิดรังสีเอกซ์นั้นเกิดจากปรากฏการณ์ที่อนุภาคของอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงไปชนเป้า (Target) ผลทำให้เกิดเป็นเอกซ์เรย์และความร้อน การเกิดของเอกซ์เรย์นี้อาศัยองค์ประกอบสำคัญ 5 ประการ คือ

1. ทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอน หรือ การแยกอิเล็กตรอนออกจากอะตอมของโลหะอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้น หรือแยกจากอะตอม ของโลหะ ที่ทำเป็นไส้หลอดเอกซ์เรย์ โดยการที่เรา ผ่านกระแสไฟฟ้า เข้าไปในไส้หลอด (Filament) จนกระทั่ง ไส้หลอดร้อนขึ้น ประมาณ 2000 C หรือมากกว่านั้น จะมีผลทำให้เกิด เทอร์มิโอนิกอิมิชัน (Thermionic Emission) คือ อิเล็กตรอน หลุดออกจาก เซลล์ หรือวงโคจรของมัน เมื่อถูกความร้อน อิเล็กตรอนที่หลุดออกมา นี้ จะมาออกกันอยู่รอบๆ ผิวหน้าของโลหะ จนกลายเป็นกลุ่ม (Cloud) เรียกว่า Space charge สาเหตุที่อิเล็กตรอน ไม่สามารถหลุดพ้น ไปจากผิวหน้าโลหะ เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน และอะตอม ของโลหะยังมีอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. การทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุด และเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงวิธีที่จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมไปได้ คือ ต้องหาสิ่งที่มีพลังงาน หรือแรงดึงดูด มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน กับอะตอม ของโลหะ มาดึงดูดอิเล็กตรอน สิ่งนั้นก็ คือ ไฟฟ้าแรงสูง (High voltage) ไฟฟ้าแรงสูงนี้ นอกจากจะทำให้อิเล็กตรอน หลุดจากผิวหน้าของโลหะ แล้ว ยังทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หรือวิ่งไปด้วยความเร็วสูง กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ ต้องทำให้ไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบให้ต่างกัน ความต่างศักย์นี้ ถ้ายังมีค่ามากขึ้นเท่าใด ก็ยิ่งทำให้อิเล็กตรอน หลุดจากผิวหน้าของไส้หลอด ได้มาก และวิ่งไปด้วยความเร็วสูงขึ้น ความต่างศักย์ 100 Kilo-voltage จะทำให้อิเล็กตรอน มีความเร็ว เท่ากับประมาณ 165 km/sec

3. การทำให้เส้นทางที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านไป ต้องไม่มีสิ่งกีดขวางจึงจะทำให้ อิเล็กตรอนวิ่งไป ด้วยความเร็วสูงดังนั้น ภายในหลอดเอ็กซ์เรย์ จึงเป็นสุญญากาศ เพราะถ้ามีอากาศ หรือก๊าซอยู่ภายในหลอด แม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม ความเร็วของอิเล็กตรอนจะลดลง เนื่องจากเกิดไอออนไนเซชัน (Ionization)

4. การทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้มข้น (Concentration of electron) จะต้องมีวิธีการที่จะทำให้ อิเล็กตรอน เคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางเดียวกัน คือ พุ่งไปหาจุดโฟกัสของเป้าด้วยปริมาณ (ความเข้มข้น) ที่มากพอสมควร ซึ่งทำให้ได้โดยการใช้ เครื่องมือที่เรียกว่า "Electron focusing device" คอยควบคุม ให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ ไปตกในบริเวณจุด โฟกัสของเป้า

5. การทำให้อิเล็กตรอนหยุดวิ่งในทันทีทันใด การที่จะทำให้อิเล็กตรอน ที่วิ่งมาด้วยความเร็วสูง นี้หยุดวิ่ง ในทันทีทันใด ทำได้โดยหาวัตถุมานั้น หรือขวางอิเล็กตรอน วัตถุนั้นก็คือ เป้า (Target) ผลที่เกิดขึ้น คือ เกิดการชน หรือ กระทบกันระหว่างอิเล็กตรอน กับเป้าอย่างแรง อิเล็กตรอนดังกล่าว จะไปชนอิเล็กตรอน ที่อยู่ในวงโคจร ของอะตอมของเป้า นั้น ให้หลุดกระเด็นออกนอกวงโคจร และจะมีอิเล็กตรอน จากวงโคจรอื่นๆ ที่อยู่ถัดไป วิ่งเข้ามาแทน แต่เนื่องจาก พลังงาน ของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจร จะไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมา ในรูปของเอ็กซ์เรย์และความร้อน (ส่วนใหญ่จะเป็นความร้อนมากกว่า) กล่าวคือ จากพลังงาน ของอิเล็กตรอนทั้งหมด ที่วิ่งไปสู่เป้า นั้น 99.8% จะเปลี่ยนเป็นความร้อน และ 0.2 % เป็นเอ็กซ์เรย์

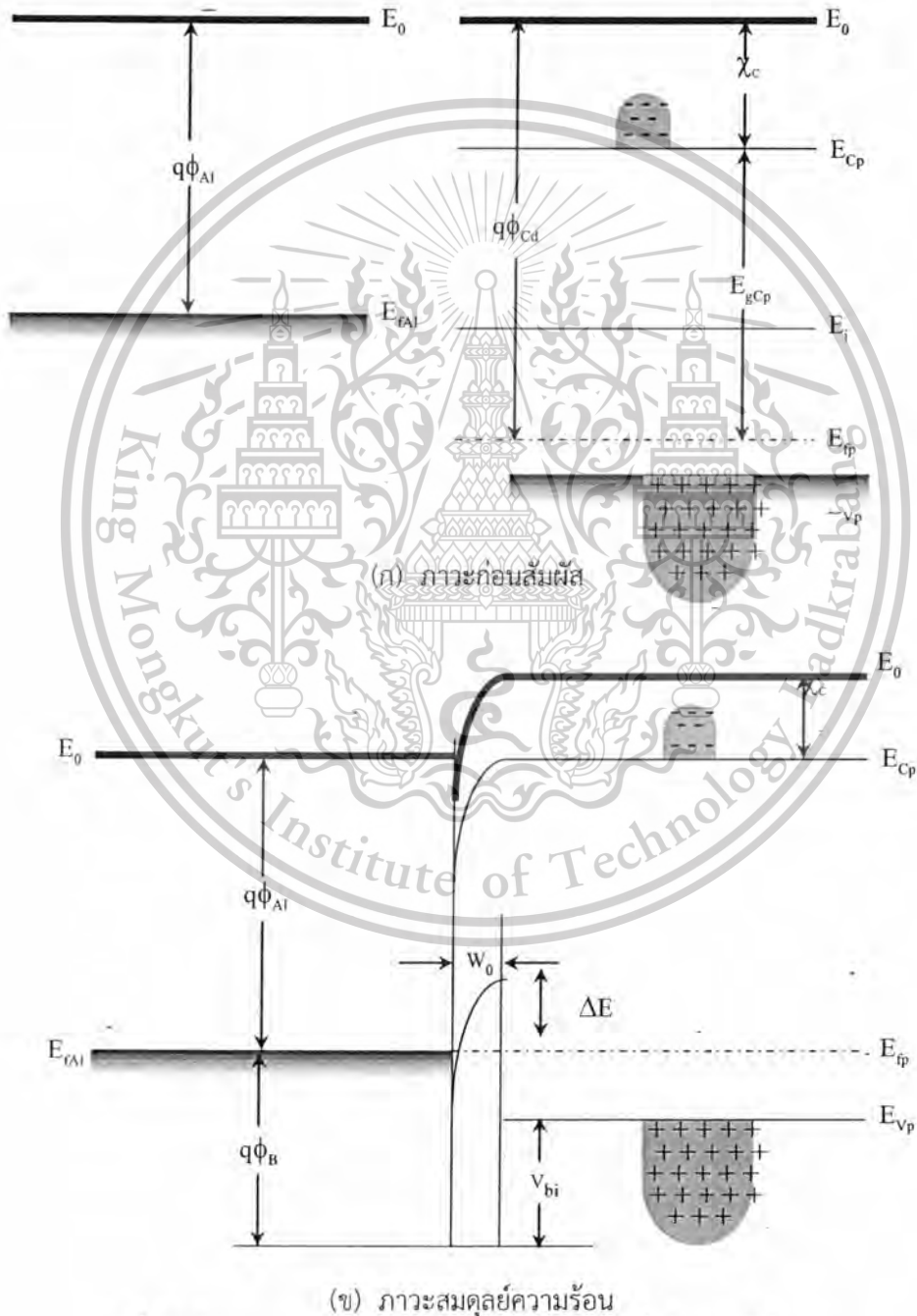
สารกึ่งตัวนำเพชรที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการ CVD แบบความร้อนได้โดยง่าย อีกทั้งยังสามารถสร้างรอยสัมผัสขึ้นระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการเป็นพื้นฐานที่จะนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารกึ่งตัวนำเพชรต่อไป เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานที่ได้เปรียบกว่าสารกึ่งตัวนำที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ ซิลิกอน และ เยอรมันเนียม อย่างที่ทราบกันแล้วว่ารอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะออลูมิเนียมนี้เป็นรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์หรือแบบขอตต์กินั้น สามารถนำมาทำเป็นไดโอดประเภทรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะได้เช่นกัน ขอตต์กินีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรจึงได้มีการทำการศึกษากันดังจะกล่าวต่อไปนี้

2.2 ขอตต์กินีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร

ขอตต์กินีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรเป็นไดโอดที่อาศัยคุณสมบัติจากรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะ โดยในที่นี้จะพิจารณารอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพี และโลหะออลูมิเนียม ดังแสดงแบบจำลองแถบพลังงานก่อนสัมผัสกันไว้ในรูปที่ 2.1(ก) เมื่อเปรียบเทียบความต่างของระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะออลูมิเนียม (E_{F_A}) และของฟิล์มเพชรชนิดพี (E_{F_P}) กับระดับพลังงานสุญญากาศ (E_0) ขณะยังไม่ได้สัมผัสกันนั้น จะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่า ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันของฟังก์ชันงาน (work function) ของทั้งสองวัสดุ นั่นคือเมื่อมีการสัมผัสกันเกิดขึ้นดังในรูปที่ 2.1(ข) จะทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นการถ่ายเทหรือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานที่สูงกว่า (อิเล็กตรอนจากโลหะออลูมิเนียม) ข้ามรอยสัมผัสไปยังระดับพลังงานที่ต่ำกว่า (ฟิล์มเพชรชนิดพี) จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลความร้อน (ระดับ

พลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกัน) เป็นผลให้เกิดการโค้งงอของระดับพลังงานอื่นในส่วน
 ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี หรือนั่นคือ ทำให้เกิดกำแพงศักย์ (Barrier Height : ϕ_B) ขึ้นบริเวณรอยสัมผัสของ
 ฟิล์มเพชรชนิดพีกับพื้นผิวของโลหะอลูมิเนียม และพบว่าขณะที่อิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัส
 ไปทำให้เกิดการรวมตัวกับประจุโฮลที่ระดับวาเลนซ์บริเวณพื้นผิวของฟิล์มเพชรชนิดพี ทำให้เกิดบริเวณปลอด
 ประจุ (depletion region) ขึ้นในระยะ W_0 หรือเกิดศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in voltage : V_{bi}) ขึ้น จะเห็นว่า
 ค่ากำแพงศักย์ขึ้นจากโลหะอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี ($q\phi_B$) ในภาวะสมดุลย์ความร้อน



รูปที่ 2.1 โดอะแกรมแถบพลังงานของขอตักไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$q\phi_B = V_{bi} + \Delta E$$

$$\Delta E = q\chi_C + E_{gC} - q\phi_{Al}$$

และเมื่อมีการนำไฟฟ้าขึ้น จะมีปริมาณกระแสไหล (I) ดังสมการ

$$I = I_S [\exp(qV_A / kT) - 1]$$

โดยจะมีค่า I_S เป็นกระแสในสภาวะสมดุลความร้อน ($V = 0$) เป็น

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

และ

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

โดยที่

- $q\phi_B$ = ค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส
- $q\phi_{Al}$ = ฟังก์ชันงานของอลูมิเนียม
- $q\phi_{Cd}$ = ฟังก์ชันงานของฟิล์มเพชรชนิดพี
- $q\chi_C$ = อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของฟิล์มเพชร
- $q\phi_B$ = กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี
- E_0 = ระดับพลังงานที่สูญญากาศ
- E_{fAl} = ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะอลูมิเนียม
- E_i = ระดับพลังงานอินทรินซิก
- E_{fP} = ระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชรชนิดพี
- E_{gCd} = ช่องว่างพลังงานของฟิล์มเพชร
- W_0 = ระยะปลอดประจุพาหะในชั้นฟิล์มเพชร
- I_S = กระแสอิ่มตัวของไดโอด ในขณะที่ $V = 0$
- A = พื้นที่ของรอยสัมผัส
- A^* = ค่าคงที่ Richardson
- m_h^* = มวลยังผลโฮลของเพชร = 3.64×10^{-31} kg

จากที่อธิบายข้างต้น จะเห็นว่า ซอตต์กีไดโอดมีคุณสมบัติของการเรกติไฟร์ได้อย่างดี แต่ก็พบว่า ในทางปฏิบัติจริง ซอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้ มีกระแสรั่วไหลย้อนกลับเกิดขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกระแสไหลไปข้างหน้า หรือนั่นคืออัตราการกรองการไหลของกระแสต่ำ (Low current rectification ratio) ซึ่งเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ต่อการประยุกต์ใช้งานบางประเภท ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะลดปัญหาของการเกิดกระแสรั่วไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นกับรอยสัมผัสแบบนี้ นั่นคือทำการเพิ่มชั้นฉนวนขึ้นระหว่างรอยสัมผัสไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แบบขอตต์กี้ โดยในที่นี้จะทำการศึกษากการใช้ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกเป็นชั้นฉนวนชั้น เพราะฉะนั้นจึงควรมาทำความเข้าใจทฤษฎีที่น่าจะสอดคล้องกับแนวความคิดที่จะนำมาแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสร้างขอตต์กี้ ไดโอดนี้ ในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงการทำความเข้าใจการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ ดังต่อไปนี้

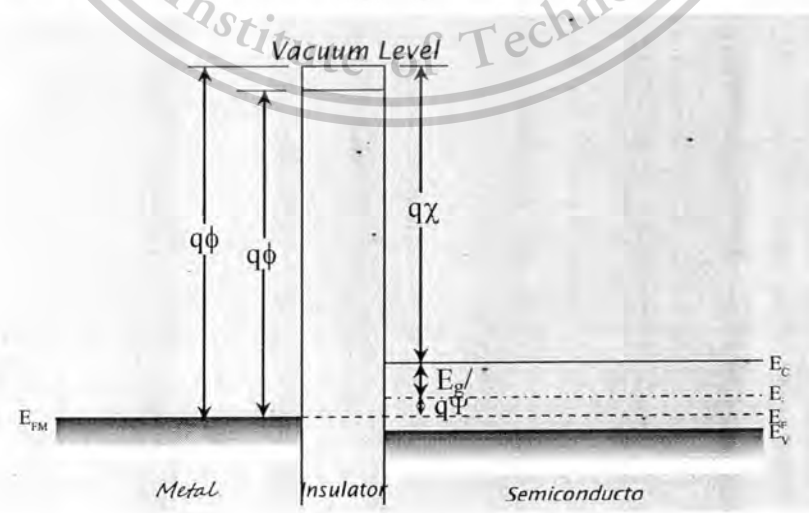
2.3 ไดโอดโครงสร้าง MIS (Metal-Insulator-Semiconductor Diode)

ในปี ค.ศ.1951 Moll และ Pfann&Garette ได้เสนอโครงสร้าง MIS หรือโครงสร้างรอยต่อของโลหะ (metal) / ฉนวน (insulator) / สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ขึ้นเป็นครั้งแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และในเวลาต่อมาก็มี Frankl และ Lindner จึงทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของโครงสร้าง MIS ดังนั้นในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงทฤษฎีของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติโดยเลือกพิจารณาเฉพาะกรณีของชั้นสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี ดังแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 ลักษณะไดโอดโครงสร้าง MIS

ภาวะสมดุลย์ทางความร้อน ในรูปที่ 2.3 แสดงถึงลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ ขณะอยู่ในภาวะสมดุลย์ความร้อน หรือไม่มีแรงดันไบอัสจากภายนอกมากระทำ ($V=0$)



รูปที่ 2.3 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติภาวะสมดุลย์ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถนิยามคุณสมบัติของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติได้ดังต่อไปนี้

1. ค่าความแตกต่างของพลังงานฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (ϕ_{ms}) ในภาวะสมดุลย์ ความร้อนเป็นศูนย์ หรือนั่นคือ ช่วงระดับพลังงานแบนราบ (flat-band condition) ดังแสดงในสมการ

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

โดยที่ ϕ_{ms} = ค่าต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

ϕ_m = ฟังก์ชันงานของโลหะ

χ_s = อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ

E_g = แแถบพลังงานช่องว่างของสารกึ่งตัวนำ

ψ_B = ค่าต่างของกัาแฟงศักย์ระหว่างระดับ E_f กับระดับ E_i

ϕ_B = กัาแฟงศักย์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

2. ประจุต่าง ๆ ไม่สามารถปรากฏอยู่ในโครงสร้างได้แม้ในกรณีที่มีการให้ไบอัส โดยประจุเหล่านี้จะปรากฏในสารกึ่งตัวนำในปริมาณเท่ากับในชั้นโลหะ แต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกันที่บริเวณพื้นผิวที่ติดกับชั้นฉนวน

3. ประจุพาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นฉนวนภายใต้กรณีการให้ไบอัส นั่นคือ พิกัดความต้านทานของฉนวนมีค่าเป็นอนันต์

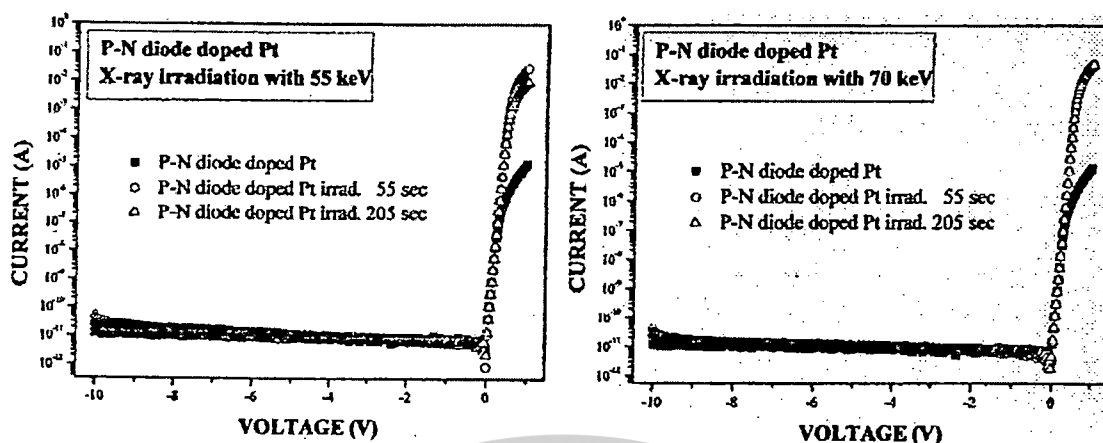
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวอย่างบทความงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงกระแสทางด้านไบอัสตรงของไดโอดพีเอ็นโดยใช้รังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ ในการทดลองใช้พลังงานการฉายรังสี 55 keV และ 70 keV ที่เวลาการฉายรังสี 55 และ 205 วินาที จากการทดลองพบว่า ทั้งสองค่าพลังงานและเวลาการฉายรังสีมีค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีเอ็กซ์ช่วยปรับปรุงกระแสด้านไบอัสตรงของไดโอดพีเอ็นได้ ดังรูปที่ 2.4 ในบทความนี้ยังคำนวณหาค่าอายุการรวมตัวของพาหะ (Recombination lifetime) ซึ่งจะมีค่าลดลงจากก่อนฉายรังสีโดยใช้พลังงานการฉายรังสี 55 keV และ 70 keV เวลาการรวมตัวลดลงจาก 55 μ s เป็น 45 μ s และ 48 μ s ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของพีเอ็นไดโอดก่อนและหลังฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 55 keV และ 70 keV ที่เวลา 55 และ 205 วินาที

จากงานวิจัยข้างต้นกล่าวไว้ หลังจากไดโอดพีเอ็นได้รับพลังงานและเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มที่กระแสรั่วไหลลดลงเช่นกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะใช้เทคนิควิธีการฉายรังสีเอ็กซ์มาศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีดตักยไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือปนพลทินัม โดยเริ่มจากการหาพลังงานและเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสมสำหรับตัวซีดตักยไดโอด จากนั้นจะทำการศึกษาผลของรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและตัวแปรอื่นๆ ที่ได้รับผลกระทบจากการฉายรังสีต่อไป เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ ได้อีกด้วย

2.5 หลักการและขั้นตอนการวิเคราะห์

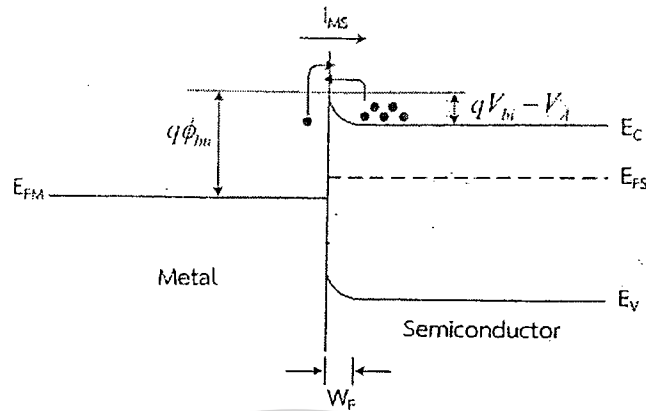
รอยสัมผัสซีดตักยในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัส

ไบอัสตรง เมื่อให้แรงดันไบอัส (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายใน ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงซีดตักยเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงซีดตักยมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

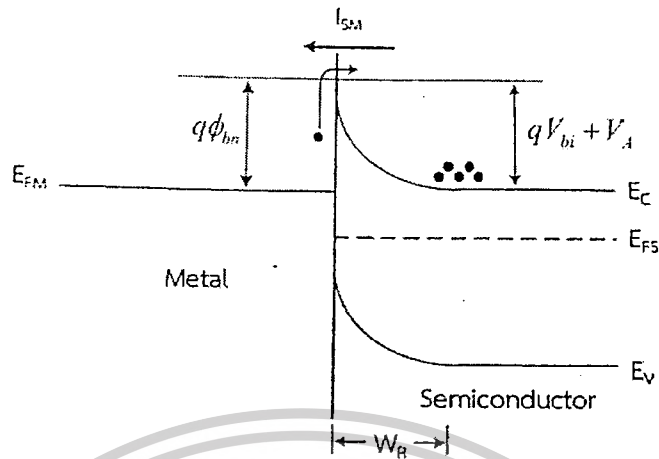
โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการ

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1\right]$$

โดยที่

- A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
- R คือ ค่าคงตัวรีชาร์ดสัน n-Si มีค่า $110 A.cm^2.K^{-2}$
- ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ขั้วต่อตักย
- q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} C$
- k คือ ค่าคงที่โบสตันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} eV/K$
- T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
- V_A คือ แรงดันไบอัส

ไบอัสย้อนกลับ เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(-V_{bi} + V_A)$ และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น กังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ขั้วต่อตักยเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ

$$I_R = A R T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right)$$

โดยที่

- A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
- R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน n-Si มีค่า $110 A \cdot cm^2 \cdot K^{-2}$
- ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ขั้วตติยก
- q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} C$
- k คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} eV/K$
- T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
- V_A คือ แรงดันไบอัส

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion width: W_d) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการ โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีความกว้างขึ้นตาม

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}}$$

โดย

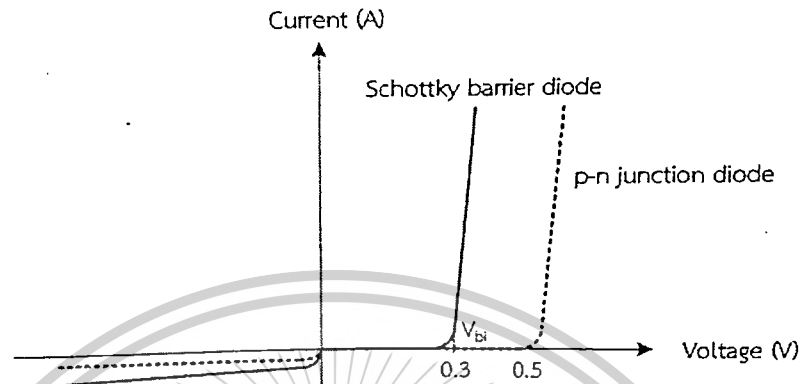
- ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
- q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} C$
- N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
- V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
- V_A คือ แรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดตักกี



รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดตักกีและไดโอดแบบพี-เอ็น

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสแบบแครคตีไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับรอยต่อ พี-เอ็น คือ ยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว เมื่อได้รับไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก (กระแสรั่วไหล) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พบว่าแรงดันภายใน (built-in voltage: V_{bi}) ของรอยสัมผัสชนิดตักกีมีค่าต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น โดยมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ส่วนรอยต่อ พี-เอ็น จะมีค่าประมาณ 0.5-0.7 V แต่กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดตักกีมีค่าสูงกว่ารอยต่อ พี-เอ็น เป็นผลมาจากผิวสัมผัสระหว่างผิวโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โดยจะมีค่ากระแสรั่วไหลมากกว่ารอยต่อพี-เอ็น ประมาณ 10^4 เท่า

ภายในโครงสร้างดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงทำให้ระดับพลังงานวาเลนซ์ที่บริเวณรอยต่อกับฉนวนมีลักษณะโค้งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ความหนาแน่นของประจุพาหะโฮลที่บริเวณพื้นผิวสารกึ่งตัวนำมีปริมาณสูงขึ้นเกิดการสะสมของประจุพาหะส่วนมากโฮล (accumulation of hole majority carriers) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เนื่องจากในทางอุดมคติแล้วถือว่าการนำไฟฟ้าในชั้นฉนวนนี้มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในความเป็นจริงแล้วพบว่า ฉนวนสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยสนามไฟฟ้าสูง ๆ โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ลักษณะการไหลของกระแสผ่านชั้นฉนวน หรือการนำไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS นี้มิได้หลายลักษณะซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับการไหลของกระแสผ่านชั้นฉนวนแบบ Schottky emission เป็นลักษณะการนำไฟฟ้าเดียวกันกับการนำไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดตักกี นั่นคือ ขึ้นอยู่กับความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.1 กระบวนการนำกระแสผ่านชั้นฉนวนพื้นฐานในไดโอดโครงสร้าง MIS

รูปแบบการนำกระแส	สมการความสัมพันธ์
Schottky Emission	$I = \left(\frac{4\pi q m_h^* k^2}{h^3} \right) \cdot A T^2 \exp \left[\frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/4\pi\epsilon_i d})}{kT} \right]$
Frenkel - Poolè Emission	$I \approx \frac{AV}{d} \exp \left[\frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/\pi\epsilon_i d})}{kT} \right]$
Tunnel or Field Emission	$I \approx \frac{AV^2}{d^2} \exp \left[\frac{4d\sqrt{(2m_h^*)} (q\phi_B)^{3/2}}{3q h V} \right]$

ส่วนในลักษณะการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poolè emission มีลักษณะการไหลคล้ายกับ Schottky emission แต่ว่าการไหลของกระแสผ่านเข้าไปในชั้นของฉนวนนี้ ประจุพาหะส่วนใหญ่จะถูกเทร็ปด้วยสถานะพลังงานว่างภายในชั้นฉนวนนี้ ซึ่งจะต้องได้รับพลังงานจากภายนอกที่สูงขึ้น ได้แก่ การให้ไบอัสหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้น และสำหรับลักษณะการไหลของกระแสแบบ Tunnel emission เป็นลักษณะการไหลของกระแสที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิเลย

ภาวะการให้ไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) เมื่อให้ศักดาบวกที่ชั้นโลหะและศักดาลบที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ จะทำให้แถบจำลองแถบพลังงานของไดโอดในภาวะสมดุลย์จากรูปที่ 2.8 เปลี่ยนแปลงเป็นรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 โดยสามารถแยกพิจารณาได้ 2 ช่วงดังนี้

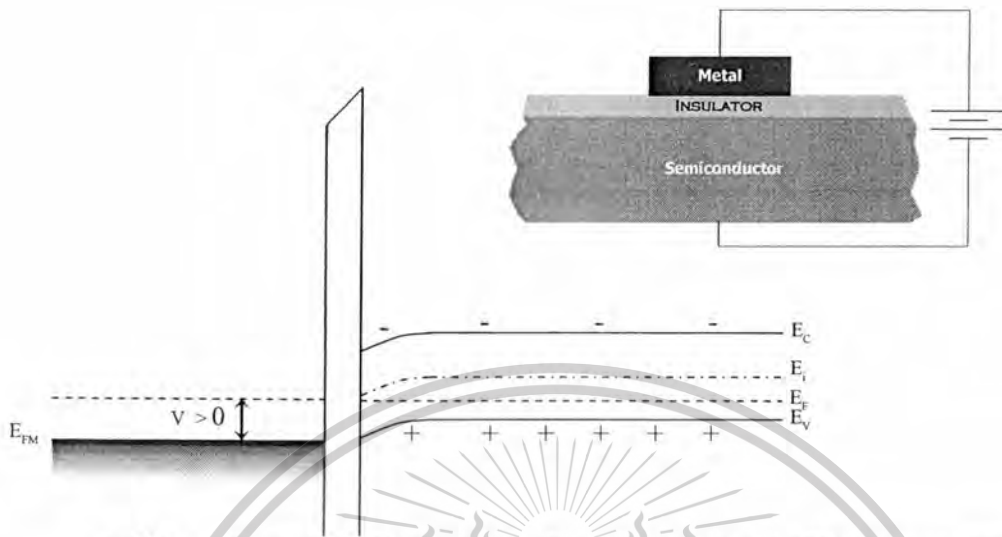
1) ช่วงปลอดประจุ (Depletion of majority carrier) เป็นช่วงที่เริ่มให้ไบอัสบวกแก่ชั้นโลหะ ทำให้ประจุพาหะส่วนมากโฮลของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยต่อกับฉนวนเกิดการรวมตัว (recombination) กับประจุลบที่ถูกส่งผ่านมา เกิดเป็นช่วงปลอดประจุพาหะ ประจุโฮลที่ระดับพลังงานวาเลนซ์จึงมีพลังงานลดลง ทำให้แถบพลังงานวาเลนซ์มีลักษณะโค้งงอออกจากระดับพลังงานเฟอร์มิดังแสดงในรูปที่ 2.8

2) ช่วงส่วนกลับประจุพาหะ (Inversion) เมื่อให้ศักดาบวกเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากช่วงปลอดประจุพาหะดังที่กล่าวข้างต้นจนกระทั่งพลังงานที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับค่าแกงศักย์ของสารกึ่งตัวนำ จะเป็นช่วงที่ปริมาณประจุพาหะของทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณพื้นผิวมีค่าเท่ากัน ($n_s = p_s = n_i$) หรือเป็นช่วงที่ระดับพลังงานอินทรินซิกตัดกับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำนั่นเองดังแสดงในรูปที่ 2.9

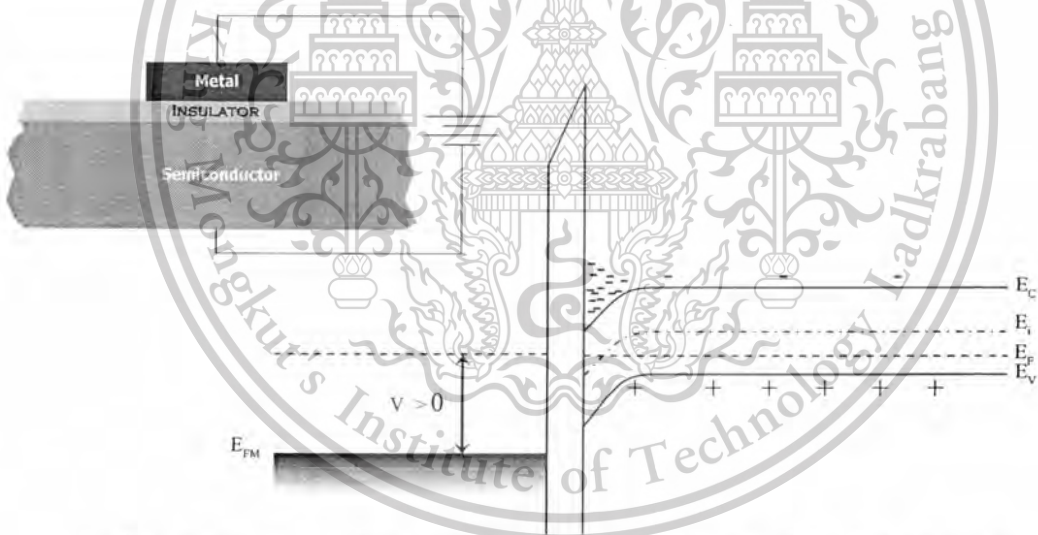
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.8 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงปloedประจุ



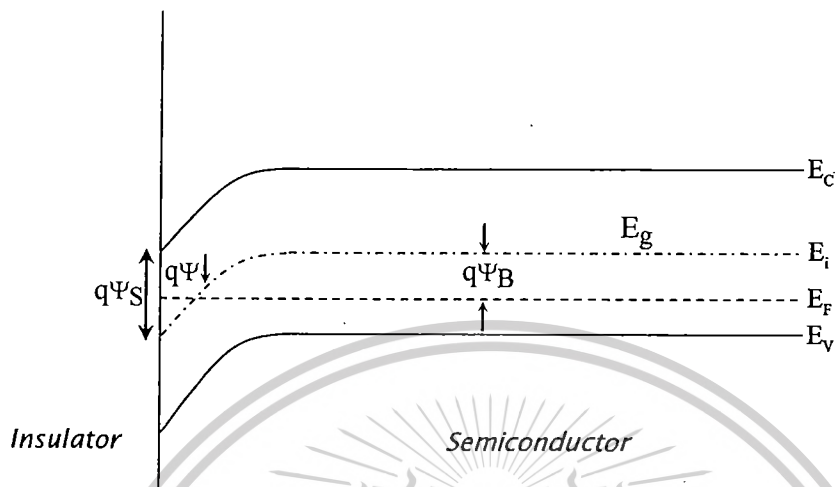
รูปที่ 2.9 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงกลับประจุพาหะ

และถ้าไบอัสต่อจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำ (semiconductor surface potential ; ψ_s) สูงกว่าค่าก้ำแพงศักย์ของสารกึ่งตัวนำ ($\psi_s > \psi_B$) ปริมาณประจุพาหะส่วนน้อยอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิวจะมีมากกว่าประจุพาหะส่วนมากโฮล หรือเป็นช่วงที่ระดับพลังงานอินทรินซิกข้ามผ่านระดับพลังงานเฟอร์มิลงมาดังแสดงในรูปที่ 2.10 เช่นกันทำให้เกิดเป็นช่วงส่วนกลับประจุพาหะขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.10 ลักษณะแถบพลังงานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำของไดโอด ในช่วงกลับประจุพาหะ

ถ้าพิจารณาถึงรายละเอียดในโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.11 กำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ หรือ ค่า ψ ให้มีค่าเป็นศูนย์ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำชนิดพีบริเวณส่วนสัมผัสกับชั้นโลหะนี้เป็น ψ_s และความหนาแน่นของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีกำหนดได้ดังนี้

$$n_p = n_{p0} \exp(q\psi / kT) = n_{p0} \exp(\beta\psi)$$

$$p_p = p_{p0} \exp(-q\psi / kT) = p_{p0} \exp(-\beta\psi)$$

โดยในที่นี้ ψ เป็นบวจากจากการพิจารณาในรูปที่ 2.12

n_{p0}, p_{p0} = ความหนาแน่นประจุพาหะอิเล็กตรอน, โฮล ในเนื้อสารกึ่งตัวนำภาวะสมดุล

$$\beta \equiv q/kT$$

ในการทำงานเดียวกัน ถ้าหากพิจารณาค่าความหนาแน่นประจุพาหะที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ (n_s, p_s) จะมีค่าเท่ากับ

$$n_s = n_{p0} \exp(\beta\psi_s)$$

$$p_s = p_{p0} \exp(-\beta\psi_s)$$

จากสมการของ Poisson ศักย์ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำในรูปของระยะทางจะได้

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

เอกสารนี้โดยที่เอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใ้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดให้
- $\rho(x)$ = ความหนาแน่นของ space charge ทั้งหมด
 - ϵ_s = ค่า permittivity ของสารกึ่งตัวนำ
 - N_D^+ = ความหนาแน่นของไอออนสารเจือผู้ให้
 - N_A^+ = ความหนาแน่นของไอออนสารเจือผู้รับ

ถ้าพิจารณาที่ภายในเนื้อสารนอกเหนือบริเวณพื้นผิว จะพบสภาพเป็นกลางของประจุไฟฟ้า นั่นคือ

$$\rho(x) = 0 \quad \longrightarrow \quad \psi = 0$$

จะได้

ดังนั้น สมการ Poisson จะได้

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[p_{p0} (e^{-\beta\psi} - 1) - n_{p0} (e^{\beta\psi} - 1) \right]$$

อินทิเกรตสมการ (2.13) ตั้งแต่เนื้อสารจนถึงพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ

$$\int_0^{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) dx = -\frac{q}{\epsilon_s} \int_0^{\psi} \left[p_{p0} (e^{-\beta\psi} - 1) - n_{p0} (e^{\beta\psi} - 1) \right] \psi d\psi$$

กำหนดให้ ค่าสนามไฟฟ้า ; $E = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$ เพราะฉะนั้นจะได้

$$E^2 = \left(\frac{2kT}{q} \right)^2 \left(\frac{q p_{p0} \beta}{2\epsilon_s} \right) \left[\left(e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1 \right) + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left(e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1 \right) \right]$$

และกำหนดให้ L_D (the extrinsic Debye length) สำหรับโฮล และค่า $F\left(\beta\psi, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$ ดังนี้

$$L_D \equiv \sqrt{\frac{2kT\epsilon_s}{p_{p0}q^2}} \equiv \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q p_{p0} \beta}}$$

และ

$$F\left(\beta\psi, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) \equiv \left[\left(e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1 \right) + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left(e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1 \right) \right]^{1/2} \geq 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ดังนั้นจะได้ค่าสนามไฟฟ้าเป็น
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$E = -\frac{\partial\psi}{\partial x} = \pm \frac{2kT}{qL_D} F\left(\beta\psi, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$$

จะมีค่าเป็นบวกเมื่อ $\psi > 0$ และมีค่าเป็นลบเมื่อ $\psi < 0$ และสำหรับค่าสนามไฟฟ้าที่พื้นผิว (E_s) จะมีค่าดังสมการเมื่อให้ค่า $\psi = \psi_s$

$$E_s = \pm \frac{2kT}{qL_D} F\left(\beta\psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$$

และจากกฎของเกาส์ จะได้ค่า space charge ดังนี้

$$Q_s = \epsilon_s E_s = \pm \frac{2\epsilon_s kT}{qL_D} F\left(\beta\psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$$

ในการหาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฮล ; Δp และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ; Δn ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อค่าศักดา ψ ที่พื้นผิวเปลี่ยนตั้งแต่ศูนย์ถึงค่า ψ_s จะต้องคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_{po} \int_0^{\infty} (e^{-\beta\psi} - 1) dx \\ &= \frac{q p_{po} L_D}{2kT} \int_0^{\infty} \frac{(e^{-\beta\psi} - 1)}{\psi_s F\left(\beta\psi, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)} d\psi \quad \text{cm}^{-2} \end{aligned}$$

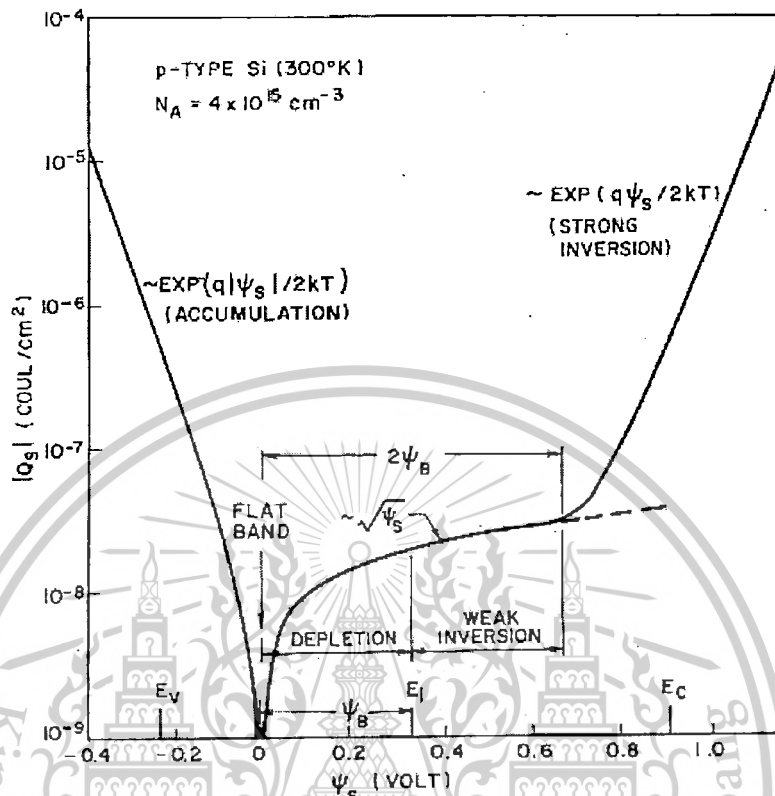
$$\begin{aligned} \Delta n &= n_{po} \int_0^{\infty} (e^{\beta\psi} - 1) dx \\ &= \frac{q n_{po} L_D}{2kT} \int_0^{\infty} \frac{(e^{\beta\psi} - 1)}{\psi_s F\left(\beta\psi, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)} d\psi \quad \text{cm}^{-2} \end{aligned}$$

จากสมการจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ space charge : Q_s อยู่ในฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ : ψ_s ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.11 ใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีสามารถแยกพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น space charge เทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิว

โดยใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี $N_A = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิห้อง

1. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า ψ_s เป็นลบแล้ว ความหนาแน่นของ space charge จะเป็นบวก หรือ $Q_s \approx \exp(q|\psi_s|/2kT)$ ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณสะสมประจุ (Accumulation region) นั่นเอง
2. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า $\psi_s = 0$ แล้ว ค่า $Q_s = 0$ ด้วย หรืออยู่ในช่วงระดับพลังงานแบนราบ
3. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า $0 < \psi_s < \psi_B$ แล้ว ค่า Q_s เป็นลบ หรือ $Q_s \approx -\sqrt{\psi_s}$ นั่นคือกรณีช่วงปลอดประจุพาหะ
4. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า $\psi_s > \psi_B$ แล้ว ค่า $Q_s \approx -\exp(q\psi_s/2kT)$ เป็นกรณีช่วงส่วนกลับของประจุพาหะ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟข้างต้น จะได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเมื่อ

$$\psi_s(\text{inv}) \approx 2\psi_B = \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

ส่วนค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณ space-charge ของสารกึ่งตัวนำสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$C_D \equiv \frac{\partial Q_s}{\partial \psi_s} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2}L_D} \frac{\left[1 - e^{-\beta\psi_s} + (n_{p0}/p_{p0})e^{\beta\psi_s} - 1\right]}{F(\beta\psi_s, n_{p0}/p_{p0})} \quad \text{F/cm}^2$$

ถ้าพิจารณาในช่วงระดับพลังงานแบนราบ ($\psi_s = 0$) ค่า C_D จะมีค่า

$$C_D (\text{flat-band}) = \epsilon_s / L_D \quad \text{F/cm}^2$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด เป็นเพียงการพิจารณาที่สารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับชั้นฉนวนเท่านั้น แต่ถ้าพิจารณาโดยรวมทั้งโครงสร้าง MIS ในอุดมคติจากรูปที่ 2.12(ก) แล้ว จะเห็นว่า ศักตาไฟฟ้า (V) ที่ให้ตกคร่อมไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคตินี้ ทำให้เกิดความแตกต่างของฟังก์ชันงานขึ้นเนื่องจากเกิดศักตาไฟฟ้าตกคร่อมภายในโครงสร้างนี้ 2 ส่วนย่อยได้แก่ ศักตาดตกคร่อมชั้นฉนวน (V_i) และศักตาดตกคร่อมที่พื้นผิวสัมผัสของชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ψ_s) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$V = V_i + \psi_s$$

โดยที่

$$V_i = \frac{Q_s d}{\epsilon_i} \left(\equiv \frac{Q_s}{C_i} \right)$$

และค่า Q_s ในที่นี้สามารถดูได้จากการกระจายของประจุด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประจุกับระยะ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.12(ข) โดยมีความหนาแน่นของประจุในระบบดังสมการ

$$-Q_M = Q_n + qN_A W = Q_s$$

โดยที่ Q_M = ความหนาแน่นประจุที่ชั้นโลหะ

Q_n = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณส่วนกลับประจุ

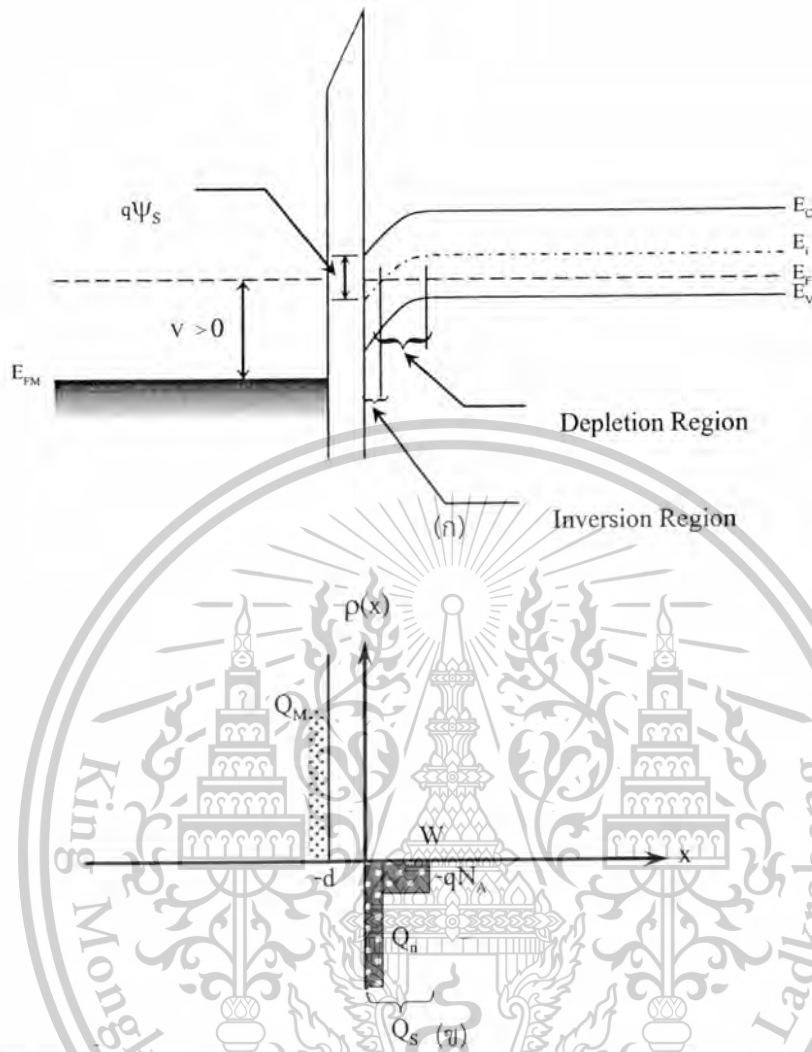
$qN_A W$ = ความหนาแน่นของไอออนผู้รับในบริเวณ space-charge ความกว้าง W

Q_s = ความหนาแน่นของประจุที่รอยสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.12 (ก) แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ
(ข) การกระจายของประจุภาวะส่วนกลับประจุของไดโอด

นอกจากนั้นจะเห็นได้อีกว่า ค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมด (C) ของไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ประกอบด้วย ความจุไฟฟ้าที่ชั้นฉนวน (C_i) อนุกรมอยู่กับความจุไฟฟ้าบริเวณ space-charge ที่ชั้นสารกึ่งตัวนำ (C_D) ดังต่อไปนี้

$$C = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad \text{F/cm}^2$$

ซึ่งจากสมการจะได้ค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ระดับพลังงานแบนราบ (flat-band condition) หรือที่ $\psi_s = 0$ ดังนี้

$$C_{FB}(\psi_s = 0) = \frac{\epsilon_i}{\sqrt{2} \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_{sv}} \right)} = \frac{\epsilon_i}{\left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_{sv}} \right) \sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{p_0 q}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะทางเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้นำเสนอการสร้างอุปกรณ์วัดรังสีด้วยฟิล์มเพชร ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและซิลิกอนชนิดเอ็นและโลหะทองคำโดยทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดในสามโครงสร้างได้แก่ โลหะ-เพชรอินทรีนซิก-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โลหะ-เพชรอินทรีนซิก และโลหะ-เพชรอินทรีนซิก-โลหะ ซึ่งจะต้องผ่านการเตรียมการอยู่หลายขั้นตอน เช่นการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเบื้องต้น การขัดแผ่นซิลิกอน การสร้างฟิล์มเพชร การทำขั้วโลหะ รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่สร้างได้

3.1 กระบวนการสร้างอุปกรณ์วัดรังสีด้วยฟิล์มเพชร

การทดลองนี้เลือกใช้ซิลิกอนเป็นฐานรองในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยใช้ซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบ (100) มีความหนาประมาณ 400 ไมครอน ก่อนที่จะนำฐานรองซิลิกอนนี้ไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จำเป็นต้องทำความสะอาดเบื้องต้น และเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอนดังนี้

- การทำความสะอาดผิวหน้าฐานรองซิลิกอน
 - กำจัดเศษฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกบนผิวหน้าซิลิกอนในน้ำ DI (Deionized water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง
 - ลอกชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าฐานรองด้วยสารละลายกรด HF 5% แล้วล้างออกด้วยน้ำ DI
 - กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะบริเวณผิวหน้าโดยการต้มด้วยกรดไนตริก (HNO_3 acid) ล้างกรด HNO_3 ด้วยการต้มในน้ำ DI และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
 - กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มด้วยสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene)
 - ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง
- การเตรียมผิวหน้าฐานรอง

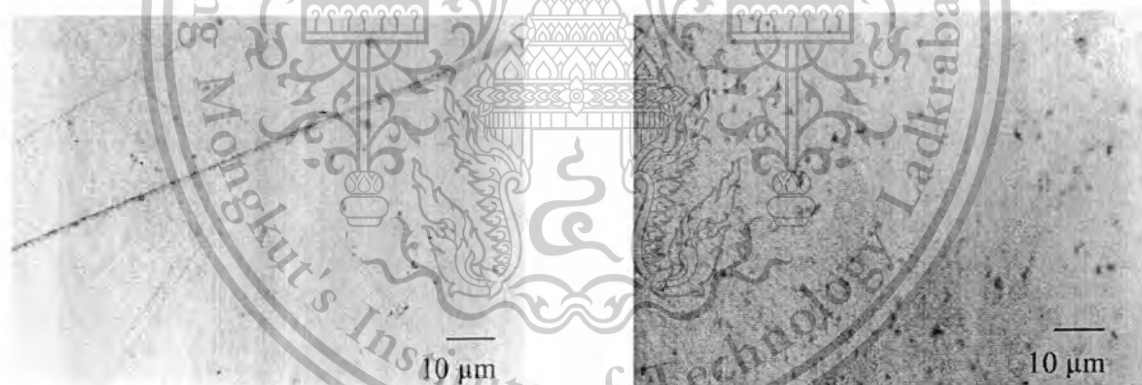
หลังจากทำความสะอาดเบื้องต้นกับฐานรองซิลิกอนครบทุกขั้นตอน แล้วจะทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอนก่อนนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เพื่อเป็นการกระตุ้นฐานรองให้มีความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรเร็วขึ้น โดยในการทดลองนี้ เลือกใช้การขัดด้วยครีมเพชรเป็นการเตรียมผิวหน้าฐานรอง ครีมเพชรที่ใช้ขัดมีขนาดของเม็ดผลึก 0.25 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนอีกครั้งเพื่อล้างครีมเพชรออกด้วยวิธีดังต่อไปนี้

- ต้มแผ่นซิลิกอนในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนเพื่อล้างครีมเพชรออก
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซิโตนโดยสั่นในเครื่องสั่นความถี่สูง
- ล้างอะซิโตนออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- กำจัดชั้นออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้นอีกครั้งด้วยสารละลายกรด HF 5%
- ล้างกรด HF 5% ออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง



รูปที่ 3.1 ครีมเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิกอนขนาดเมล็ดผลึก 0.25 ไมครอน

จากนั้น นำแผ่นซิลิกอนนี้ไปตรวจสอบรอยขีดที่ เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งลักษณะผิวหน้าที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชรนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นฐานรองที่พร้อมจะนำไปสังเคราะห์ฟิล์มต่าง ๆ ได้ต่อไป



(a) ขัดด้วยครีมเพชร

(b) อัลตราโซนิกในผงเพชร

รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายพื้นผิวของฐานรองซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการเตรียมฐานรอง

- กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD

การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรในวิทยานิพนธ์นี้จะในวิธีการ CVD แบบ Hot-Filament (HFCVD) โดยจะเพิ่มแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปใน Chamber ซึ่งจะทำให้สังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้พื้นที่ที่กว้างกว่าเทคนิคเดิม โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดก๊าซไฮโดรเจนทั้ง 2 ถัง เข้าสู่ Chamber เป็นเวลาประมาณ 15 นาที เพื่อให้บรรยากาศใน Chamber เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียวศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. ปิดวาล์ว 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนถึงที่ 1 ไหลผ่านแหล่งจ่ายเพื่อพาไอระเหยของแอลกอฮอล์เข้า Chamber โดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow meter ขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนถึงที่ 2 ยังคงจ่ายก๊าซไฮโดรเจน โดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow meter โดยไอระเหยของแอลกอฮอล์จะรวมกับก๊าซไฮโดรเจนที่ท่อรวม ก๊าซดังรูปที่ 3.2

3. ค่อยๆเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับไส้หลอดทั้งสแตนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ 2,000 °C แล้วจึงปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพอร์สซิลิกอนกับไส้หลอดทั้งสแตนให้มีระยะห่างประมาณ 2 มิลลิเมตร โดยสามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ตามระยะเวลาที่ต้องการ

4. เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างฟิล์มเพชรแล้วค่อยๆลดระยะห่างระหว่างแผ่นพอร์สซิลิกอนกับไส้หลอดทั้งสแตนประมาณ 3 เซนติเมตร จากนั้นค่อยๆลดกระแสไฟฟ้า แล้วจึงปิดแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรเจนทั้งสองถัง รอจนกระทั่งไม่มีก๊าซไฮโดรเจนค้างใน Chamber แล้วจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปสู่กระบวนการถัดไป

- กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Combustion Activation CVD

การสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation ก็เช่นเดียวกันเป็นการใช้หลักการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ระหว่างออกซิเจนกับอะเซทิลีนซึ่งเป็นก๊าซที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเงื่อนไขของการสังเคราะห์คือทำให้เหลือก๊าซอะเซทิลีน และการเผาไหม้ตัวเองทำให้เกิดความร้อนจนสามารถทำให้ก๊าซอะเซทิลีนแตกตัวออกเป็นธาตุคาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดการเผาไหม้ครั้งที่สองกับก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำตามลำดับ เมื่อทราบเงื่อนไขของการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธีนี้จึงมีปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมปัจจัยของวิธีการสังเคราะห์นี้ให้เป็นไปตามเงื่อนไขโดยพิจารณาจากคุณสมบัติของหัวเชื่อมและการปรับอัตราการไหลของ ก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีนค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการนิเวศลิเอชันและฟิล์มเพชรสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 โดยแต่ละส่วนของการทดลองจะเลือกตัวแปรต่างๆ ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สรุปเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ตัวแปร	เงื่อนไขการทดลอง
ความดัน	1 บรรยากาศ
อัตราส่วนก๊าซออกซิเจนกับอะเซทิลีน	0.9 โดยปริมาตร
ก๊าซออกซิเจน (cc/min)	99.5% , อัตราการไหล 450cc/min
ก๊าซอะเซทิลีน (cc/min)	99.95% , อัตราการไหล 500 cc/min
ขนาดของหัวเชื่อม	100
ฐานรอง	ซิลิคอนขัดด้วยครีมเพชร ซิลิคอนไดออกไซด์โซนิกในผงเพชร
อุณหภูมิฐานรอง	800 °C
ระยะห่างระหว่างเปลวกับฐานรอง	เปลวชั้นกลาง และเปลวชั้นนอก (0.1 - 1.1 mm)
เวลาในการสังเคราะห์	5 - 20 นาที

- การสร้างรอยต่อโลหะกับฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในการศึกษานี้จะสร้างรอยต่อชนิดโอห์มมิก ฟิล์มเพชรที่ได้มีระดับช่องว่างแถบพลังงาน $\sim 5.5 \text{ eV}$ โดยใช้พื้นฐานการสร้างรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเช่นเดียวกันไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเลือกชนิดของโลหะซึ่งมีฟังก์ชันงานต่างกันเป็นเงื่อนไขการสร้างนั้นว่าจะได้รอยต่อชนิดใด ก่อนที่จะทำการสร้างรอยต่อนั้นจะต้องนำฟิล์มที่ได้ไปทำความสะอาด เพื่อกำจัดส่วนของคาร์บอนที่ไม่ใช่โครงสร้างเพชร ออกดังนี้

- ต้มในสารละลายอิมิตัวของ CrO_3 กับ H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 170°C 3 นาที
- ล้างด้วยสารละลายเดือด H_2O_2 และ 30 % NH_4OH ในอัตราส่วน 1:1
- ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ DI
- เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อทำความสะอาดฟิล์มเพชรแล้ว นำฟิล์มเพชรมาทำขั้วโลหะโดยการเคลือบในสุญญากาศ ซึ่งเลือกโลหะ ได้ดังนี้

- เคลือบทองคำเพื่อทำรอยต่อโอห์มมิก
- นำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 890°C 12 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

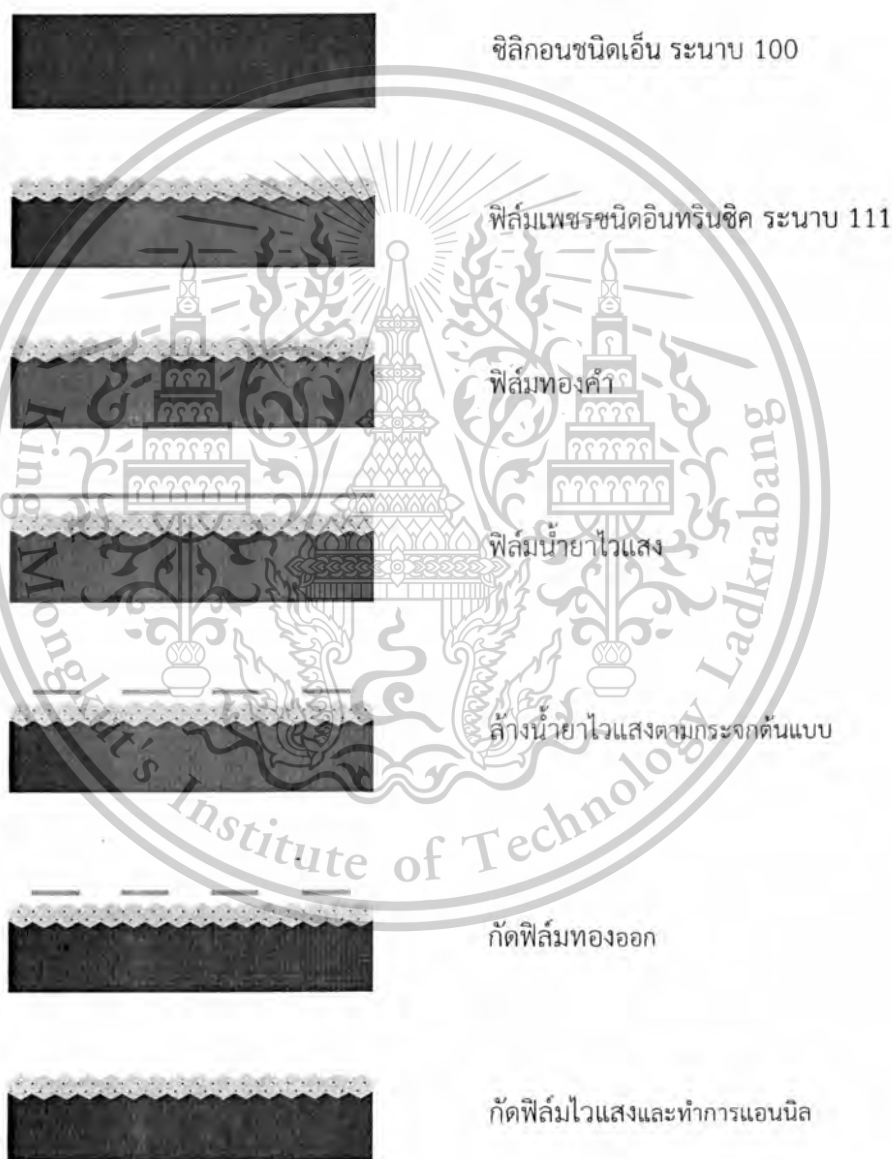
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2 การสร้างอุปกรณ์วัดรังสีโครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิค-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

กระบวนการสร้างมีขั้นตอนดังนี้

- นำแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น หนา 100 ไปทำการเตรียมผิวด้วยการอัลตราโซนิกในผงเพชร
- นำฐานรองซิลิกอนทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธี Combustion activation CVD ตามเงื่อนไขของความหนาและระนาบ
- ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบ
- ทำการลอกทองส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด $HCl+HNO_3$



รูปที่ 3.3 การสร้างอุปกรณ์วัดรังสีโครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิค-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

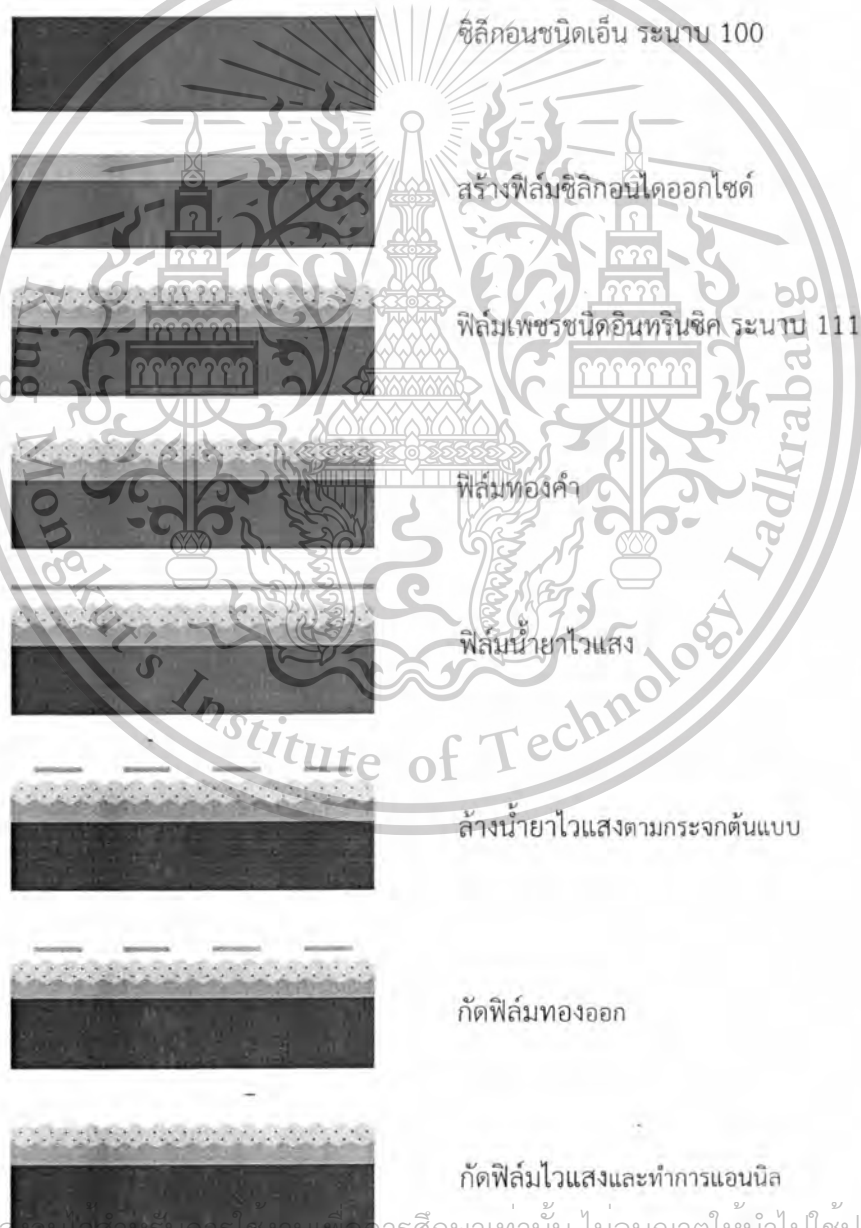
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 การสร้างอุปกรณ์วัดรังสีโครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิค

กระบวนการสร้างมีขั้นตอนดังนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น หนา 100 ทำความสะอาดและสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 1,000 nm.
- นำแผ่นซิลิคอนพร้อมซิลิคอนไดออกไซด์ไปทำการเตรียมผิวด้วยการอัลตราโซนิคในผงเพชร
- นำฐานรองซิลิคอนทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคด้วยวิธี Combustion activation CVD ตามเงื่อนไขของความหนาและระนาบ
- ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบ
- ทำการลอกทองส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด $HCl+HNO_3$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อที่บุคคลอื่นที่ และต้องยกย่องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

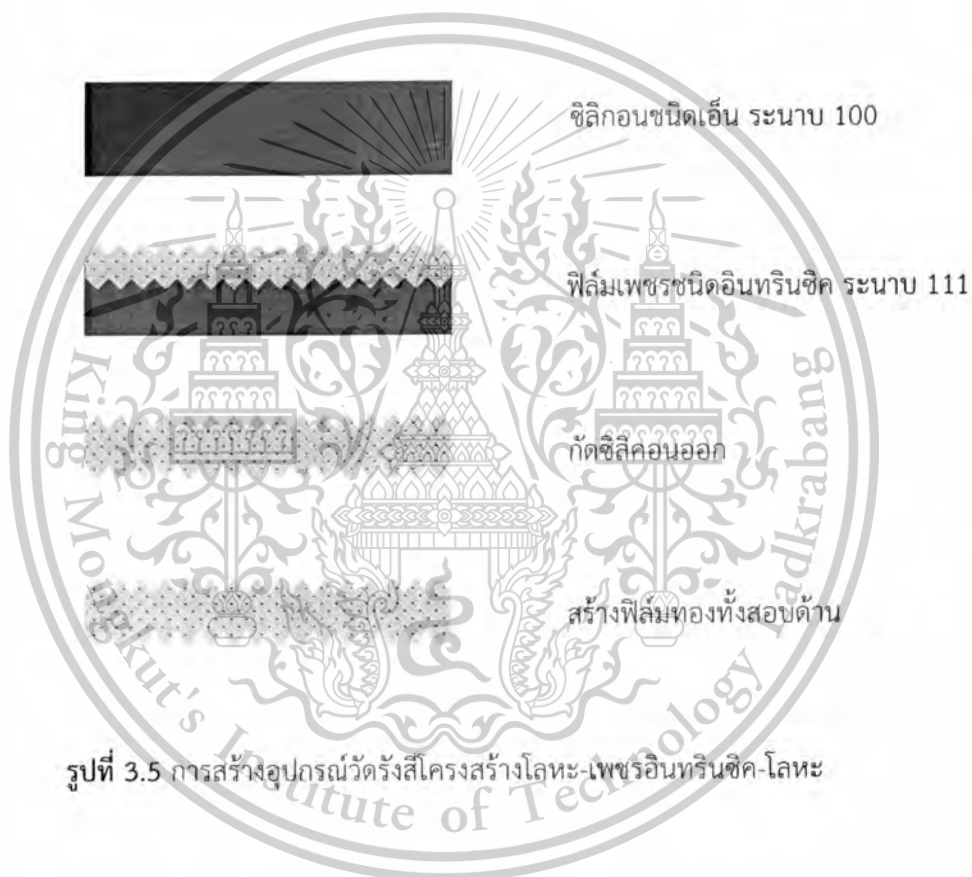
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4 การสร้างอุปกรณ์วัดรังสีโครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิก-โลหะ

กระบวนการสร้างมีขั้นตอนดังนี้

- นำแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น หนา 100 ไปทำการเตรียมผิวด้วยการอัลตราโซนิกในผงเพชร
- นำฐานรองซิลิกอนทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกด้วยวิธี Combustion activation CVD ตามเงื่อนไขของความหนา 0.1 มม
- ทำการกัดเอาซิลิกอนไดออกไซด์ออกให้เหลือแต่ฟิล์มเพชร
- ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศทั้งสองด้าน
- ทำสร้างลวดเชื่อมขั้วโลหะ



รูปที่ 3.5 การสร้างอุปกรณ์วัดรังสีโครงสร้างโลหะ-เพชรอินทรีนซิก-โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4 ผลการวิจัย

เมื่อทำการทดลองชิ้นงานและเงื่อนไขในการทดลองต่างๆ สามารถสรุปและแยกข้อมูลได้เป็นสามส่วนคือ แยกตามโครงสร้างของอุปกรณ์วัดแต่ละโครงสร้าง

4.1 วัดสมบัติของฟิล์มเพชร

ความหนาแน่นของการนิวคลีโอเซชันจะใช้ภาพถ่าย SEM ซึ่งแสดงทั้งความหนาแน่นของการเกิดนิวคลีโอเซชัน ขนาดเฉลี่ยของผลึก ความสม่ำเสมอ ลักษณะพื้นผิวที่ผ่านกระบวนการเตรียมฐานรอง และความเรียบของฟิล์มเพชร โดยทั่วไปความหนาแน่นในการเกิดนิวคลีโอเซชันมากเป็นผลให้ฟิล์มมีความเรียบมากและมีความสม่ำเสมอของฟิล์ม การนิวคลีโอเซชันมีปัจจัยที่สำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจาก SEM

การวิเคราะห์ระนาบของฟิล์มเพชรนั้นจะต้องใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาตัวแปรของโครงสร้างผลึก และลักษณะของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นได้โดยทั่วไปการใช้เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อการตรวจสอบระนาบที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จาก Bragg's law

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

เมื่อทำการทดสอบว่าระนาบที่ได้จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนั้นเป็นระนาบ {111} {100} และระนาบรวม ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะได้ว่าอย่างชิ้นงานระนาบ {111} {100} และระนาบรวม เป็นดังรูปที่ 4.2 โดยจะนำเสนอตัวอย่างการคำนวณจากการวัดแต่ละชิ้นงานซึ่งให้ยอดกราฟแตกต่างกันแล้วแต่ระนาบที่เกิดขึ้น โดยแต่ละยอดกราฟสามารถหาค่า Inter-planar spacing (d) ได้ดังนี้

จากกราฟรูปที่ 4.2 พบว่ามียอดกราฟแรกที่ตั้งตำแหน่งมุม 44° นั่นคือ
 $2\theta = 44$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

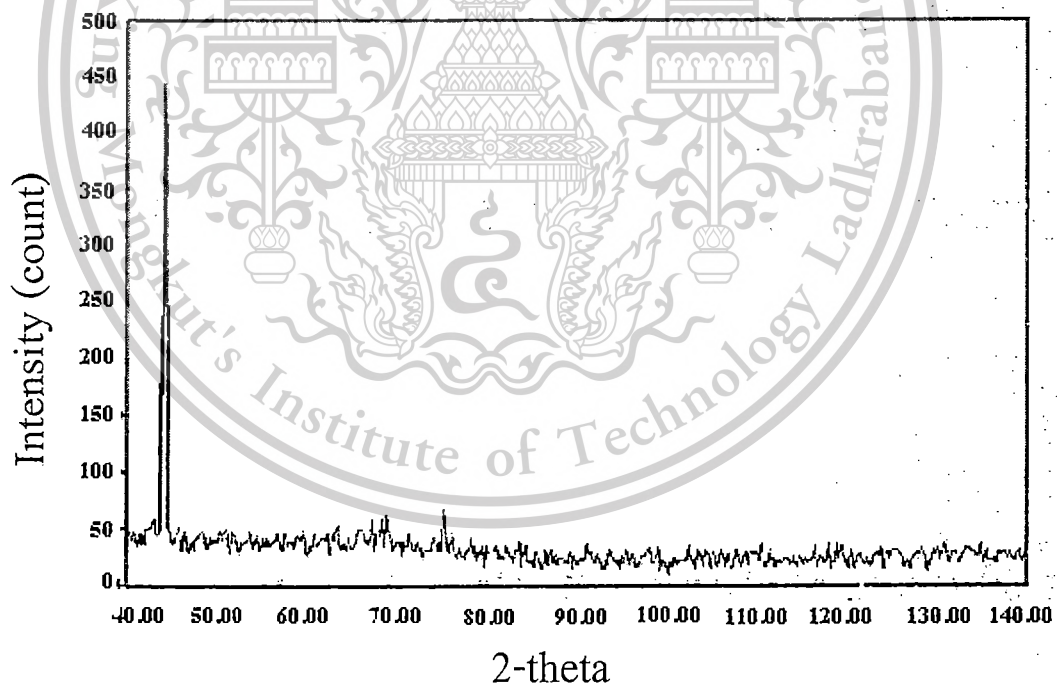
$$\theta = 22^\circ$$

และเนื่องจากค่าที่ได้จากการวัดเป็นค่าจากการเลี้ยวเบนลำดับแรก ($n=1$) แหล่งจ่ายรังสีเอ็กซ์ที่ใช้เป็นของ $\text{Cu}_{K\alpha}$ ซึ่งจะมีค่าความยาวคลื่น 1.5418 Å นำค่าที่ได้แทนใน Bragg's law

$$2d \sin 22^\circ = (1)(1.5418) \text{ \AA}$$

$$d = \frac{1 \times 1.5418}{2 \times \sin 22^\circ} = 2.059 \text{ \AA}$$

เมื่อทำการคำนวณในทำนองเดียวกัน ในการวิเคราะห์ด้วย XRD ของยอดกราฟ 4.2 จะมียอดกราฟต่างกันเมื่อทำการคำนวณตามตัวอย่างแล้ว และเทียบค่า Inter-planar spacing ที่คำนวณได้กับค่ามาตรฐาน ASTM(6-675) แสดงได้ในตารางที่ 4.1 พบว่าที่ค่า $d \approx 2.059 \text{ \AA}$ จะมี Miller indices h, k, l เป็น 1, 1, 1 ส่วนที่ค่า $d \approx 1.263 \text{ \AA}$ มีค่า h, k, l เป็น 2, 2, 0 $d \approx 1.077 \text{ \AA}$ มีค่า h, k, l เป็น 3, 1, 1 และ $d \approx 0.891 \text{ \AA}$ มีค่า h, k, l เป็น 4, 0, 0 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 X-ray diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

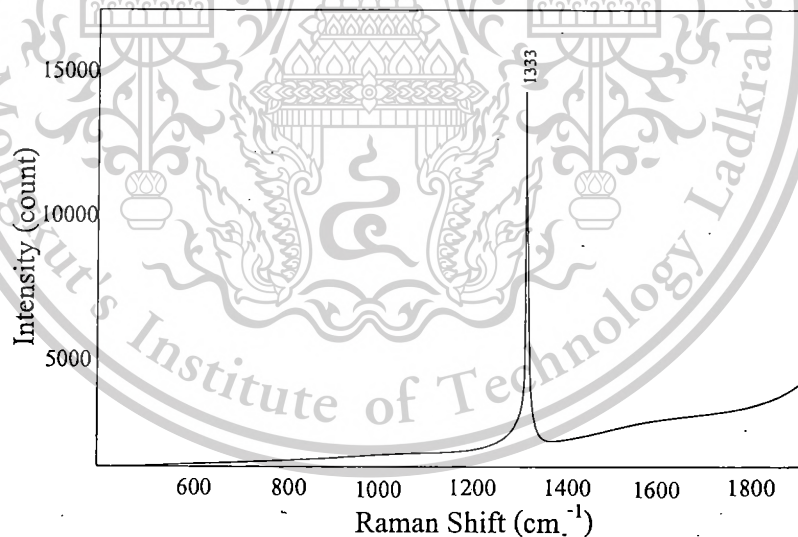
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.1 ค่า Inter-planar spacing ของเพชรสังเคราะห์ (ASTM (6-675))

ASTM 6-675		อุณหภูมิฐานรอง ($^{\circ}\text{C}$)		
(hkl)	Inter-planar spacing (\AA)	560-820 {111} plane	840-880 {100} plane	900-1,040 Mixing plane
111	2.06	2.059	2.059	2.059
220	1.261	1.263	1.263	1.258
311	1.0754	1.077	1.077	1.073
400	0.8916	-	0.891	0.891
FWHM (cm^{-1})		5.4	3.6	2.7

จากตารางที่ 4.1 พบว่าระนาบหลักของเพชรที่ตรวจสอบได้มี 4 ชนิดคือ ระนาบ (111), ระนาบ (220), ระนาบ (311) และระนาบ (400) สังเกตได้ว่าระนาบของการเลี้ยวเบนจะเป็นจำนวนคู่หรือคี่ทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างผลึกของเพชรมีลักษณะสมดุเป็นผลึกแบบ Cubic

การวิเคราะห์นั้นจะสังเกตได้จากค่า Raman spectrum ในรูป 4.3 ปรากฏยอดคลื่นที่ $1,333 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นยอดคลื่นของเพชรสังเคราะห์ ส่วนในเปลวไฟชั้นนอกปรากฏยอดคลื่นที่ 520 cm^{-1} ซึ่งเป็นยอดคลื่นของฐานรองซิลิคอนและไม่ปรากฏยอดคลื่นอื่นๆ ซึ่งแสดงว่าฟิล์มมีความหนาคลุมผิวฐานรองจนหมดแล้ว



รูปที่ 4.3 ค่า Raman spectrum ของฟิล์มเพชร

4.2 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องทราบว่ามีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สภาพความต้านทานลดลง เพราะมีประจุพาหะเกิดเพิ่มขึ้นทั้งโฮลและอิเล็กตรอนจึงทำให้ความต้านทานลดลง คุณสมบัตินี้เป็นลักษณะพิเศษของสารกึ่งตัวนำ

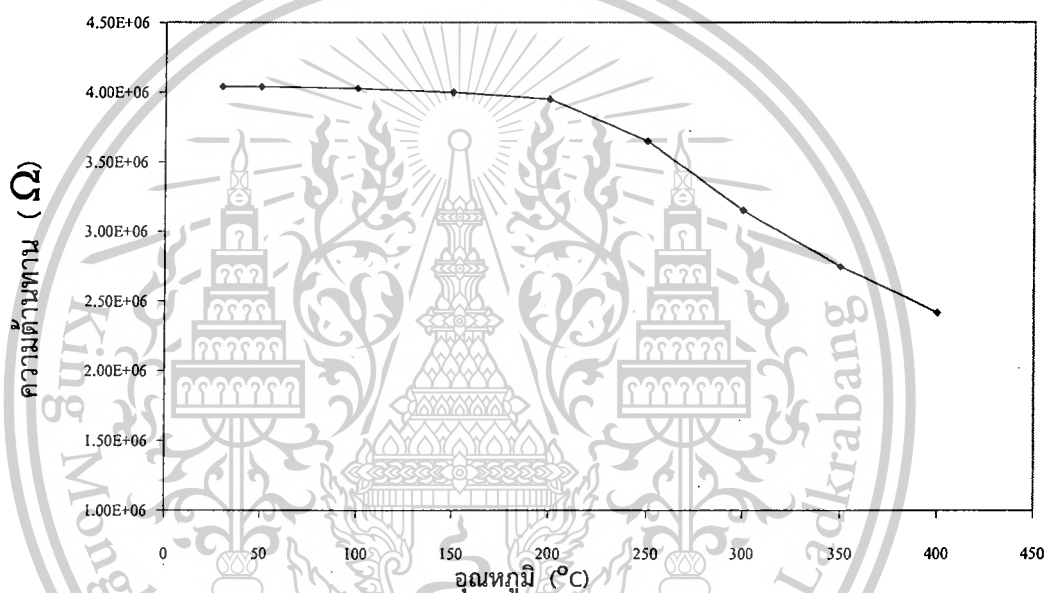
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในการศึกษานี้จะใช้การวัดความต้านทานภายในเตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ด้วยเครื่อง Takedariken digital multimeter สามารถวัดความต้านทานได้ตั้งแต่ $0.0\text{--}4.04\text{ M}\Omega$ แต่ก่อนที่จะทำการทดลองจำเป็นต้องสังเคราะห์รอยต่อโลหะเพื่อจะทำการเชื่อมต่อสายลวดออกมาจากเตาเผา เมื่อพิจารณาตามตารางที่ 2 พบว่า โลหะที่จะนำมาทำเป็นรอยต่อต้องเป็นแบบโอห์มมิกเพื่อให้รอยต่อไม่มีผลต่อความต้านทานและมีจุดหลอมเหลวสูงซึ่งได้แก่ ทองคำ (Au) และ เงิน (Ag) การสังเคราะห์รอยต่อด้วยทองคำ จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ขนาดพื้นที่ $3 \times 3\text{ mm}^2$ มีความหนาประมาณ $15\text{ }\mu\text{m}$

โดยตัวต้านทานที่สังเคราะห์จากฟิล์มเพชรนี้ จะมีค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง (30°C) เท่ากับ $4.04\text{ M}\Omega$ จากนั้นทำการแปรค่าอุณหภูมิตั้งแต่ 30°C ถึง 400°C เพื่อดูค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังผลที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.4



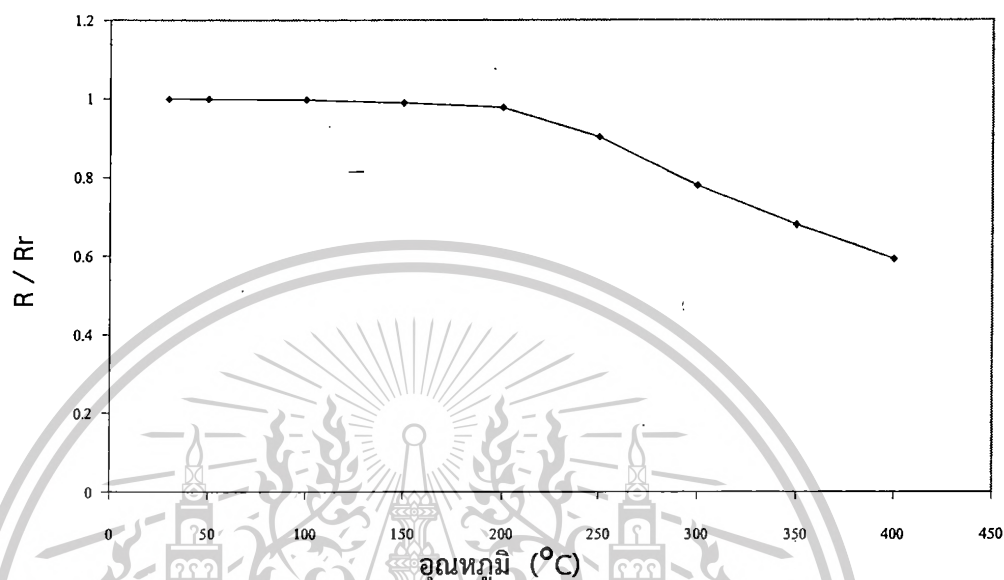
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.4 พบว่าตัวต้านทานที่สังเคราะห์จากฟิล์มเพชรแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ นั่นคือที่อุณหภูมิเพิ่มฟิล์มเพชรจะมีค่าความต้านทานจะลดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200°C และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250°C ขึ้นไปค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดเป็น $2.42\text{ M}\Omega$ ที่อุณหภูมิ 400°C แต่ด้วยขีดจำกัดในการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรในการวัดที่อุณหภูมิสูง จึงได้ทำการวัดค่าความต้านของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Hewlett packard semiconductor / Component test system และ Curve tracer สามารถวัดค่าความต้านทานได้

มากกว่า $1 \times 10^{10}\text{ }\Omega$ ซึ่งการวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานกับอุณหภูมิก็เพียงพอสำหรับการสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ และเมื่อต้องการทราบการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้อง R/R_r แสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ และ R_r คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง (30°C) การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30°C จนถึง 200°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยกว่าที่ $0.000\text{--}0.022$ ที่อุณหภูมิ 250°C นี้ได้แก่ค่าความต้านทานจะการค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงมากขึ้น จึงพอสรุปได้ว่าฟิล์มเพชรนี้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200°C ซึ่งสามารถนำไปใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิสูงได้



รูปที่ 4.5. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน R/Rr ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (30°C ถึง 400°C)

การวิเคราะห์ชนิดประจุพาหะด้วยเทคนิค Seebeck effect ในการทำการทดลองได้จ่ายความร้อนกับเข็มร้อนอุณหภูมิประมาณ 100°C เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกัลวานอ-มิเตอร์ได้อย่างเด่นชัดขึ้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ขึ้นตัวอย่างฟิล์มชนิดพีจากวิธี Hot filament CVD ผลที่ได้คือ กัลวานอ-มิเตอร์ชี้ตำแหน่งบวกซึ่งหมายถึงพาหะโฮลนั่นเอง เมื่อวิเคราะห์ว่าฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี Combustion activation กัลวานอ-มิเตอร์ชี้ไปยังตำแหน่งศูนย์ แสดงว่าจำนวนพาหะที่เคลื่อนที่จากเข็มร้อนไปยังเข็มเย็นนั้นมีเท่ากันทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้ไม่เกิดความต่างศักย์ระหว่างเข็มร้อนและเข็มเย็นขึ้น จึงสรุปได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีน ซิค ดังนั้นจึงทำการวัดด้วยเครื่องวัดความต้านทานสูง ซึ่งวัดความต้านทานของฟิล์มเพชรชนิดนี้ได้ $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$

4.3 การวัดรังสีของอุปกรณ์ตรวจวัด

เมื่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการวัดค่ากระแส-แรงดันและความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์วัดรังสีทั้งสามโครงสร้างก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ ในการวัดค่ากระแส-แรงดันไดโอดจะถูกบิอนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -50 ถึง 50 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 10 V และนำขึ้นงานมาศึกษาผลของการฉายรังสีเอกซ์ซึ่งแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ทำการทดลอง ในการทดลองจะทำการเปลี่ยนค่าพลังงานโดยใช้ค่าพลังงานในการฉาย 85 keV ซึ่งใช้เวลาในการฉายรังสี 60 วินาที ก่อนที่จะนำอุปกรณ์วัดรังสีทั้งสามโครงสร้างไปฉายรังสีเอกซ์นั้น อันดับแรกต้องศึกษาผลของการตอบสนองก่อนฉายรังสีผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไปอัสตรงและย้อนกลับพบว่าไม่มีการนำกระแสเนื่องจากความเป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามสูงจึงไม่มีผลในการนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การที่กระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงค่าแถบพลังงานต้องห้ามมีค่าสูงมากทำให้ไม่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล อีกทั้งยังเป็นสารกึ่งตัวนำประเภทอินโดเรคทำให้อาจถูกแถบพลังงานต่างๆดักจับไว้ ในส่วนของกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับก็มีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของอุปกรณ์ทั้งสามโครงสร้างพบว่า

- โครงสร้าง MIS มีการรั่วของกระแสในระดับ 10 nA ซึ่งอาจเกิดจากการสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกบางเกินไปทำให้มีอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นสามารถเคลื่อนที่มายังขั้วทองคำได้ และเมื่อนำโครงสร้าง MIS นี้สัมผัสกับก๊าซไนโตรเจนในบรรยากาศจะมีผลให้ผิวหน้าของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกมีค่าความต้านทานลดลงตามธรรมชาติ

- โครงสร้าง MS มีการลดลงของกระแสรั่วย้อนกลับเนื่องจากได้สร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อลดปัญหากระแสพาสซีวส่วนน้อยจากฐานรองซิลิคอนได้ แต่ตัวแปรสำคัญคือการออกแบบความกว้างและระยะห่างของลวดสายโลหะ

- โครงสร้าง MIM มีการสร้างได้ยากเนื่องจากต้องสร้างฟิล์มเพชรให้มีความหนาเพียงพอกับการรักษาสภาพความเป็นฟิล์มเพชรให้มากที่สุด ในการทดลองใช้เวลาอย่างน้อย 2 ชม. ต่อการสร้างฟิล์มเพชร อีกทั้งต้องทำการกัดฐานรองซิลิคอนออกก่อนต้องทำด้วยความระมัดระวังไม่ให้ฟิล์มเพชรหลุดออกเมื่อฐานรองถูกกัดออกไป โดยโครงสร้างนี้ทำได้ยากที่สุดส่วน ส่วนผลการวัดพบว่าให้การตอบสนองดีที่สุดเนื่องจากการไบอัสให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลสามารถเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดีอิสระ กล่าวคือสามารถทำการไบอัสตรงและย้อนกลับได้ทั้งสองขั้วแต่จะแตกต่างกันเล็กน้อยจากค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลไม่เท่ากัน แต่เนื่องจากฟิล์มที่ได้เป็นฟิล์มประเภทโพลีคริสตัลไลน์ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงระหว่าง 1.5 – 1.8 เท่าของเพชรผลึกเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอุปกรณ์วัดรังสีด้วยฟิล์มเพชรเป็นตัวเปรียบเทียบด้วยความเข้มข้นค่าต่างๆ โดยมีผลการทดลองสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

รายงานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะทำการศึกษาอุปกรณ์วัดรังสีด้วยโครงสร้างต่างๆ ผลกระทบของการรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานสรุปได้ดังนี้

- ในโครงสร้าง MIS เหมาะสำหรับการวัดรังสีที่มีพลังงานไม่สูงเพราะในส่วนของสารกึ่งตัวนำนั้นสามารถวัดได้ในระดับหนึ่งและส่วนของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนชิคจะเป็นส่วนช่วยในการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล อีกทั้งยังมีความทนต่อการชนทางกายภาพของรังสีที่กระทำต่อผิวหน้าอุปกรณ์วัดรังสีได้
- ในโครงสร้าง MS เป็นโครงสร้างที่สามารถวัดรังสีในระดับปานกลางได้เป็นอย่างดีและเป็นโครงสร้างที่ง่ายในการสร้าง
- ในโครงสร้าง MIM เป็นโครงสร้างที่มีการตอบสนองที่ดีที่สุด แต่เนื่องจากความหนาของฟิล์มเพชรต้องมากพอให้โครงสร้างคงสภาพได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเป็นเวลานานกว่า 10 ชม.

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองได้สร้างฟิล์มเพชรขึ้นในรูปของโพลีคริสตัลไลน์ทำให้ผลการทดลองมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากขนาดของผลึกและเกรนของวัสดุไม่เท่ากันทำให้ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน ในการออกแบบพบว่าโครงสร้าง MIM มีการตอบสนองที่ดีที่สุดในอนาคตจะต้องพัฒนาฟิล์มเพชรให้เป็นรูปผลึกเดี่ยว ซึ่งการสังเคราะห์ที่ง่ายที่สุดคือการสังเคราะห์ผลึกเพชรแบบแบนโดยสมบัติของผลึกเพชรแบบแบนจะมีสมบัติเหมือนผลึกเดี่ยวและใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ เพื่อความละเอียดและความไวในการวัดควรจะมีการเพิ่มแรงดันในการไบอัสให้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รายงานสรุปการเงิน
เลขที่โครงการ 2556A11802035
งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556


ชื่อมหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อโครงการ (ไทย)..... การศึกษาอุปกรณ์วัดรังสีด้วยฟิล์มเพชร
(อังกฤษ)..... Study on radiation detector by diamond films

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย ดร.โยธิน วงศ์ประเสริฐ
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2555 ถึงวันที่ 31 กันยายน 2556
ระยะเวลาดำเนินการ..... 1 ปี 6 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2555 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2557

หมวด	รายจ่าย			งบประมาณรวมทั้งโครงการ	คงเหลือ (หรือเกิน)
	รายจ่ายสะสมจากรายงานครั้งก่อน	ค่าใช้จ่ายงวดปัจจุบัน	รวมรายจ่ายสะสมจนถึงงวดปัจจุบัน		
1. ค่าตอบแทน					-
2. ค่าจ้าง					-
3. ค่าวัสดุ	495,000			495,000	-
4. ค่าใช้สอย					-
5. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ (โปรดระบุเป็นข้อย่อย)					-
รวม	495,000			495,000	-

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินคงเหลือ

จำนวนเงินที่ได้รับ 495,000 บาท
งวดที่ 1 247,500 บาท 50 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป) ...2555 / 12 / 28.....
งวดที่ 2 247,500 บาท 50 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป) ...2556 / 04 / 29.....
รวม ... 495,000 บาท


ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน
21 / เม.ย. / 2557

.....
ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

- [1] Detector circuits / Rudolf F. Graf : Graf, Rudolf F; 1997
- [2] Detectors for particle radiation / Konrad Kleinknecht : Kleinknecht, Konrad; 1998
- [3] Sensor array signal processing / Prabhakar S. Naidu : Naidu, Prabhakar; 2001
- [4] Sensor physics and technology ; 5 : Taylor, H. Rosemary; 1997
- [5] X-ray lasers / Raymond C. Elton : Elton, Raymond C; 1990
- [6] X-ray lasers 2004 : proceedings of the 9th International Conference on
- [7] X-ray Lasers held in Beijing, China, 24-28 May 2004 / edited by Jie Zhang : International Conference on X-ray Lasers; c2005
- [8] X-ray methods / Clive Whiston ; editor F. Elizabeth Prichard : Whiston, Clive; 1991
- [9] X-Ray metrology in semiconductor manufacturing / D. Keith Bowen, Brian K. Tanner : Bowen, D. Keith; 2006
- [10]Diamond films and coatings : development, properties, and applications / edited by Robert F. Davis ,1993



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

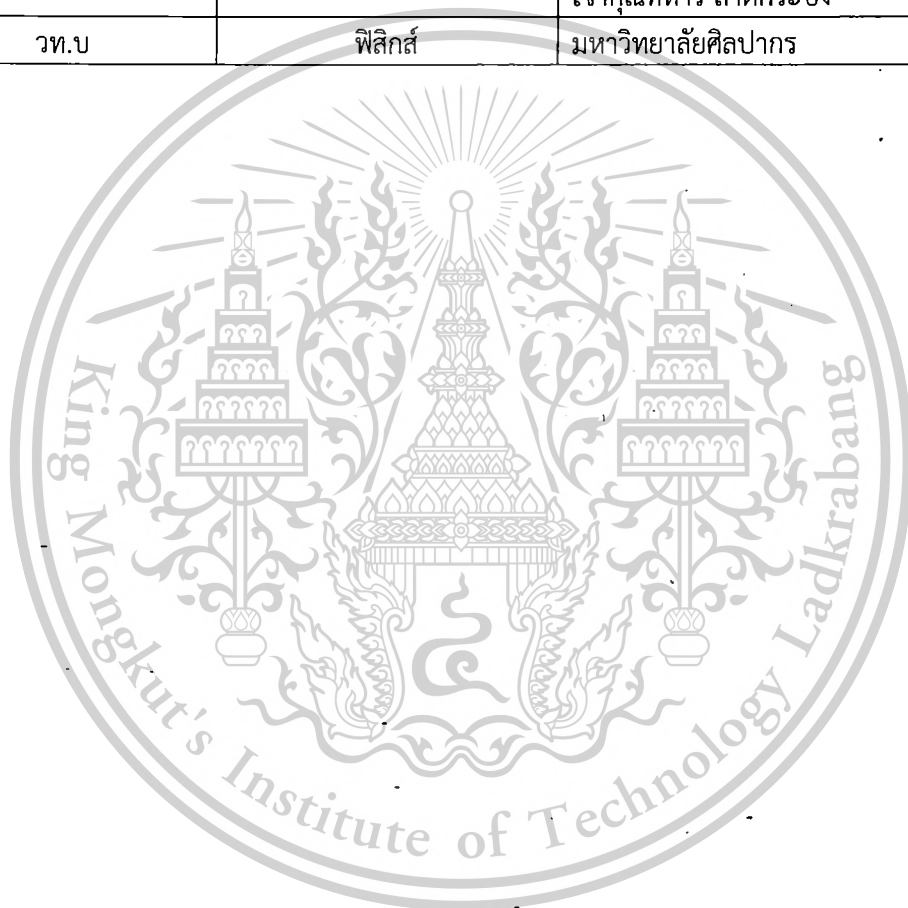
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

นายโยธิน วงศ์ประเสริฐ

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ด	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง	2549
วศ.ม	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง	2542
วท.บ	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	2538



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.