

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์แบบ MSM ชนิดฟิล์มเพชร

DIAMOND FILM MSM X-RAY DETECTOR



T117869



ศราวุธ เจ๊ะเซิน

SARAWUT JESEN

วพ.
ด 1690
2554

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **117869**
วัน,เดือน,ปี **22** ค.ศ. **2554**

12350100
b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

KMITL-2011-EN-M-040-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAMOND FILM MSM X-RAY DETECTOR



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

2011

KMITL-2011-EN- M-040-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2011

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ใช่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์แบบ MSM ชนิดฟิล์มเพชร
นักศึกษา	นายศราวุธ เจ๊ะเซ็น
รหัสประจำตัว	50060418
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2554
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอนระนาบ 100 โดยใช้กระบวนการ HFCVD (Hot Filament Chemical Vapor Deposition) มีแหล่งจ่ายเป็นก๊าซมีเทน ได้ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกมีความหนาประมาณ 7 μm และได้ทำการแยกพื้นที่ฟิล์มเพชรได้ขนาด $3 \times 3 \text{ mm}^2$ บนพื้นที่ซิลิคอน $23 \times 23 \text{ mm}^2$ จากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์ขอตติ์โฟโตไดโอดชนิดเพชร โดยใช้โลหะไทเทเนียม และทอง ในการสร้างรอยต่อโอห์มมิกด้านบน และใช้โลหะอลูมิเนียมในการสร้างรอยต่อขอตติ์ด้านล่าง มีค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลประมาณ 11 nA และสร้างอุปกรณ์ MSM (Metal-Semiconductor-Metal) โฟโตไดโอดชนิดเพชรโดยใช้โลหะอลูมิเนียมในการสร้างรอยต่อขอตติ์ทั้งด้านบนและด้านล่าง มีค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลประมาณ 13 nA โดยมีทิศทางให้พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้งเพื่อให้ลดผลของขอบเขตเกรนผลึก มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น ผลการตอบสนองทางด้านแสง UV ความเข้มแสง $32 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น พบว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรให้ค่ากระแสไฟฟ้าแสงสูงสุดคือ 28 nA และมากกว่าอุปกรณ์ขอตติ์โฟโตไดโอดชนิดเพชรคือ 7 nA และทำการแอนนัลอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่อุณหภูมิ $450 \text{ }^\circ\text{C}$ พบว่าที่เวลา 5 นาที อุปกรณ์ให้กระแสไฟฟ้ามืดน้อยที่สุดคือ 8 nA ที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้นของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรมีค่าความจุไฟฟ้าน้อยกว่าอุปกรณ์ขอตติ์โฟโตไดโอดชนิดเพชรคือ 50 pF และ 187 pF และพบว่าอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรมีเวลาการตอบสนองขาขึ้น น้อยกว่าอุปกรณ์ขอตติ์โฟโตไดโอดชนิดเพชรคือ 33 μs และ 65 μs ดังนั้นจึงควรเลือกอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรมาใช้งาน และยังพบอีกว่าที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น ของ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรสามารถตอบสนองได้ดีตามความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้น ที่เครื่องฉายรังสีเอกซ์ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785 ค่าเข้มของรังสีเอกซ์ 41 μSv มีค่ากระแสไฟฟ้า 1.3 nA และเมื่อฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 มีค่ากระแสไฟฟ้า 0.22 nA และพบว่าตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร มีประสิทธิภาพสูงสุดที่เวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 0.5 s และเมื่อนำไปฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 ปรากฏว่าสามารถตอบสนองได้ในเวลาที่สั้นลงถึง 0.1 s นั้น ไม่น่าจะอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา I และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Diamond Film MSM X-Ray Detector
Student	Mr. Sarawut Jesen
Student ID.	50060418
Degree	Master of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2011
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Somsak Cheirsirikul

ABSTRACT

This research presents the synthesizing diamond film on silicon (100) substrate processed by HFCVD (Hot Filament Chemical Vapor Deposition) in order to produce Schotthy and MSM photodiode device for detecting X-ray. Intrinsic diamond was synthesized by methane (CH_4) on silicon $23 \times 23 \text{ mm}^2$, diamond thickness $7 \mu\text{m}$, diamond size $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Schotthy photodiode device was constructed by titanium/gold (Ti/Au) which was ohmic junction on the top of diamond and aluminum (Al) which was Schotthy junction on the bottom of diamond, the leakage current of this device was 11 nA. Another device was MSM photodiode device. It was constructed by Aluminum (Al) which was Schotthy junction on the top and the bottom of diamond. The leakage current of this device was 13 nA. The carriers of both devices were able to move in the vertical direction to reduce the effect of grain boundaries. The condition of metal line was 12, 9, 6, 3 and 0 lines. The devices were investigated by UV light $32 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, the highest photo current of both device was 12 lines condition. However the photo current of MSM photodiode device was higher than Schotthy photodiode device 28 nA and 7 nA respectively. Then, the MSM photodiode device was annealed with 450°C at 5 min and the lowest leakage current was 8 nA. For capacitance, the 12 lines condition of MSM photodiode device was lower than Schotthy photodiode device 50 pF and 187 pF respectively. For the rise time of device, MSM photodiode device was lower than Schotthy photodiode device 33 μs and 65 μs respectively. So the MSM photodiode device was more suitable than the other one. For investigation of X-ray by Varian model S-785, the 12 lines condition of MSM photodiode could response the changing intensity of X-ray at $41 \mu\text{Sv}$ which its output current was 1.3 nA. For indirect expose by scintillator (Barium Fluoride; BaF_2) output current was 0.22 nA. For the expose time of X-ray, MSM photodiode device was high efficiency at 0.5 s for direct expose. On the other hand, for the indirect expose,

the response of MSM photodiode device could reduce to 0.1 s. ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา II และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตกรรมประกาศ

ด้วยพระนามของอัลเลาะห์ผู้ทรงกรุณาเมตตาปราณีเสมอ

ขอขอบคุณต่อเอกองค์อัลเลาะห์ ซุบ. เป็นพระเจ้าองค์เดียว ทรงเป็นที่ยึดเหนี่ยวจิตใจ ทรงชี้แนวทางที่ถูกต้อง ทรงให้อภัย ทรงกรุณาเมตตาปราณี ทรงกำหนดให้การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ ลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำปรึกษาในงานวิจัย แก้ปัญหาต่างๆ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้ และให้คำแนะนำจนจบการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณชาญเดช หุอนันต์ นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC), โครงการศูนย์วิจัยและพัฒนาไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ (TMEC), งานวิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เป็นนักวิจัยที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำปรึกษาในงานวิจัย

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, รศ.ดร.วิสุทธิ จิตรุ่งเรือง, ผศ.ดร.สุศักดิ์ เนียมเจริญ และ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆในงานวิจัย

ขอขอบคุณ รศ.ดร.มนัส สัจจศิลปี และ รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

ขอขอบคุณ ผศ.ประสงค์ ฐุตรานนท์ ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

ขอขอบคุณ คุณณัฐพัชร ธรณัญญาเดชา นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC), โครงการศูนย์วิจัยและพัฒนาไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ (TMEC), งานวิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการตัดแผ่นซิลิคอน

ขอขอบคุณ พี่นักวิจัยของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยเหลือในการใช้เครื่องวัดต่างๆ

ขอขอบคุณ พี่นักศึกษาปริญญาเอก, เพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาโท และน้องๆ นักศึกษาปริญญาตรีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา III ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA), ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC), โครงการศูนย์วิจัยและพัฒนาไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ (TMEC) และโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนการศึกษาและงานการวิจัย

ศราวุธ เจ๊ะเซ็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **IV** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	V
สารบัญรูป.....	X
สารบัญตาราง.....	XVI

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความรู้ทั่วไปของรังสีเอกซ์.....	1
1.1.1 บทนำ.....	1
1.1.2 ประวัติการค้นพบรังสีเอกซ์.....	1
1.1.3 การเกิดรังสีเอกซ์.....	2
1.1.4 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอกซ์.....	4
1.1.5 อุปกรณ์ตรวจจบบรังสีเอกซ์.....	5
1.2 ความรู้ทั่วไปของเพชร.....	9
1.2.1 วิวัฒนาการการสังเคราะห์เพชร.....	9
1.2.2 กระบวนการ CVD แบบต่าง ๆ.....	10
1.2.3 ข้อสรุปของกระบวนการสร้าง.....	17
1.2.4 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชร.....	18
1.2.5 หลักการและการพิจารณาเพชร.....	20
1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	28
1.4 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	29
1.5 สมมุติฐานของการศึกษา.....	29
1.6 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	29
1.7 ขอบเขตของการวิจัย.....	31
1.8 ขั้นตอนของการศึกษา.....	31

บทที่ 2 ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ.....	32
--------------------------------	----

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1	ลักษณะพื้นฐานของแสง	32
2.1.2	การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	32
2.1.3	การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กทรอนิกส์	36
2.1.4	การดูดกลืนแสงในช่องว่างแถบพลังงาน	36
2.1.5	การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ	38
2.1.6	การดูดกลืนแสงด้วยโฟตาไรเซชันในวัสดุไดอิเล็กทริก	38
2.1.7	การดูดกลืนแสงด้วยการสั่นของโครงผลึก	38
2.2	รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ	38
2.2.1	ค่าฟังก์ชันงานของวัสดุต่างๆ	39
2.2.2	รอยต่อแบบโอห์มมิก	40
2.2.3	รอยต่อชนิดชอตต์กี	42
2.2.4	การไหลของกระแสไฟฟ้าในรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	45
2.2.5	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	46
2.2.6	ความจุไฟฟ้าของรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ	47
2.2.7	โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อเพชรแบบชอตต์กี	48
2.2.8	โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อเพชรแบบโอห์มมิก	49
2.3	อุปกรณ์ตรวจวัดแสง	50
2.3.1	โครงสร้าง MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรภาวะสมดุล	50
2.3.1	โครงสร้าง MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรขณะได้รับไบแอส	52
2.3.2	โครงสร้าง MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรขณะที่แสงตกกระทบ	52
2.3.3	คุณสมบัติทางไฟฟ้าทั่วไปของโครงสร้าง MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	53
2.4	อุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอกซ์	55
2.4.1	สารเรืองแสง	56
2.4.1	การตัวตรวจจับรังสีเอกซ์	60
บทที่ 3 การสร้างตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร		61
3.1	เทคโนโลยีการสร้าง	61
3.2.1	กระบวนการทำความสะอาด	61
3.2.2	กระบวนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์	62
3.2.3	การสร้างซิลิคอนไนไตร	64
3.2.4	การเตรียมแผ่นฐานรอง	67
3.2.5	กระบวนการสังเคราะห์เพชร	68

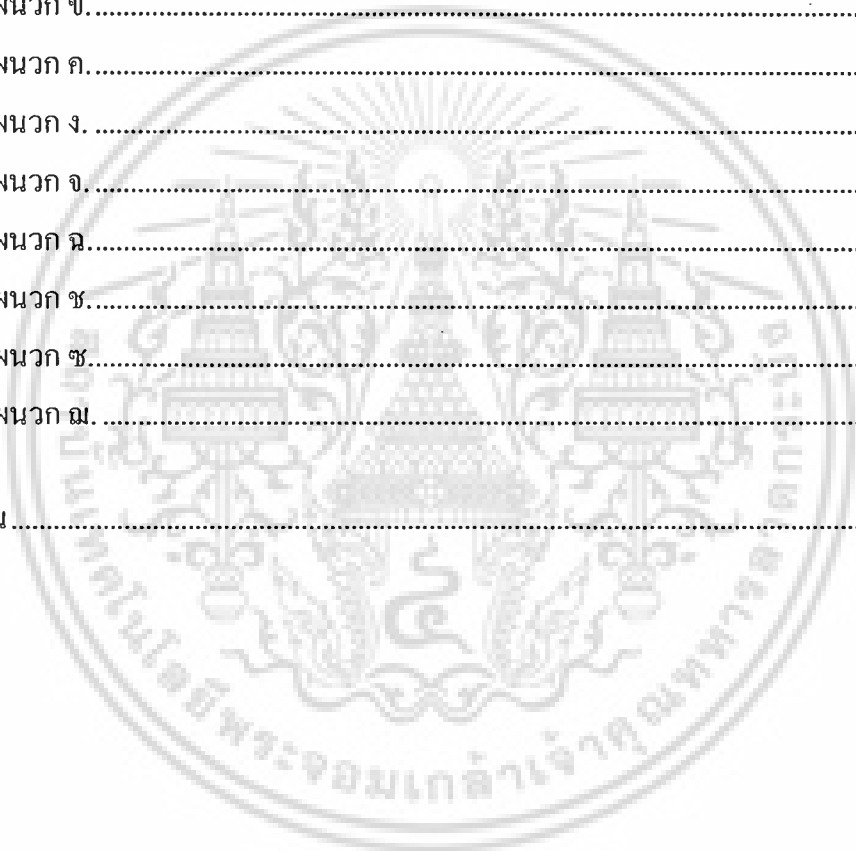
3.2.6	กระบวนการโฟโวลติโกราฟี	72
3.2	การสกัดแบบแอนไอโซโทรปิก.....	82
3.3.1	การสกัดโดยใช้สารเคมีเตตระเมทริลแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (TMAH).....	83
3.3.2	การสกัดโดยใช้สารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH).....	85
3.3.3	การสกัดโดยใช้สารเคมีเอริลีนไดอะมีนกับไฟโรเครีคอลและน้ำ (EPD).....	86
3.3	การออกแบบ	88
3.4.1	การออกแบบไดอะแฟรม.....	88
3.4.2	マスクโฟโตโคโด.....	88
3.4	แผนภูมิกระบวนการสร้างอุปกรณ์	92
3.5	ขั้นตอนกระบวนการสร้างชิ้นงาน	93
3.5.1	การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น.....	93
3.5.2	การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ความหนาประมาณ 2000 Å.....	94
3.5.3	กระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านบน.....	95
3.5.4	การขัดผิวด้านหน้า.....	96
3.5.5	กระบวนการสร้างซิลิคอนไนไตรต์ด้านบนความหนาประมาณ 2000 Å.....	96
3.5.6	กระบวนการสร้างลวดลายด้านบน.....	97
3.5.7	กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และแอนนีสซิลิคอนไนไตรต์ด้านบน	99
3.5.8	กระบวนการสร้างซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่างความหนาประมาณ 2000 Å	99
3.5.9	กระบวนการสร้างลวดลายและกัดซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่าง.....	100
3.5.10	กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และแอนนีสซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่าง	101
3.5.11	กระบวนการสกัดซิลิคอนไนไตรต์.....	102
3.5.12	กระบวนการสังเคราะห์เพชร	103
3.5.13	กระบวนการทำความสะอาดหลังจากสร้างเพชร.....	104
3.5.14	กระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนด้านล่าง.....	105
3.5.15	กระบวนการทำความสะอาดเพชรหลังจากสกัดด้านล่าง	106
3.5.16	กระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าไอห้มิกด้านบน (Ti/Au).....	107
3.5.17	กระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะอะลูมิเนียมด้านบน	108
3.5.18	กระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะอะลูมิเนียมด้านล่าง.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	112
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ.....	112
4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	119
4.2.1 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร และอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	120
4.2.2 ผลการตอบสนองต่อแสง UV ของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร และอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะที่ต่างกัน .	121
4.2.3 ผลการตอบสนองต่อรังสี UV ของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่ความเข้มของรังสี UV ที่ต่างกัน	123
4.2.4 ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	125
4.2.5 ผลการตอบสนองทางเวลาของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร และ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร.....	126
4.2.6 กระแสไฟฟ้าวัดได้กับเวลาที่ใช้ในการแอนนัลของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	128
4.2.7 ผลการตอบสนองทางเวลาของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการแอนนัล.....	129
4.2.8 ผลการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะที่ต่างกัน.....	131
4.2.9 ผลการตอบสนองของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรต่อความเข้มรังสีเอกซ์ที่ต่างกัน	132
4.2.10 ผลการตอบสนองต่อเวลาในการฉายรังสีเอกซ์กับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	133
4.2.11 ผลการตอบสนองทางเวลาของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อฉายรังสีเอกซ์ในเวลาที่แตกต่างกัน.....	134
4.2.12 ผลการตอบสนองต่ออุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มที่ใช้ในการฉายรังสีเอกซ์.....	135
4.2.13 ผลการตอบสนองต่อเวลาขาขึ้นของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร เมื่อเปลี่ยนแปลงเข้มในการฉายรังสีเอกซ์	136
4.2.14 เปรียบเทียบผลของเวลาการฉายรังสีเอกซ์ที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร กับ Silicon PIN diode ความเร็วสูง และ MSM Silicon.....	137

4.2.15 เปรียบเทียบความเข้มที่ใช้ในการฉายรังสีเอกซ์ที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโต
ไดโอดชนิดเพชร กับ Silicon PIN diode ความเร็วสูง และ MSM Silicon 139

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	141
เอกสารอ้างอิง	145
ภาคผนวก.....	150
ภาคผนวก ก.....	151
ภาคผนวก ข.....	155
ภาคผนวก ค.....	163
ภาคผนวก ง.....	165
ภาคผนวก จ.....	168
ภาคผนวก ฉ.....	170
ภาคผนวก ช.....	172
ภาคผนวก ซ.....	184
ภาคผนวก ฌ.....	195
ประวัติผู้เขียน	219



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (a) วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน และ (b) มือภรรยาของวิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน.....	2
1.2 แสดงแถบความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	3
1.3 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD.....	11
1.4 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Tubular microwave plasma CVD.....	12
1.5 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี A bell jar microwave plasma CVD.....	13
1.6 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี A Magneto Microwave Plasma CVD.....	14
1.7 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Inductive RF plasma CVD.....	14
1.8 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี RF thermal plasma CVD.....	15
1.9 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Hollow Cathode CVD.....	16
1.10 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี DC Plasma jet CVD.....	17
1.11 ตำแหน่งอะตอมใน Cubic Cell.....	21
1.12 โครงสร้างของเพชร.....	21
1.13 ไดอะแกรมของอนุภาคเพชรแบบต่างๆ.....	22
1.14 ไดอะแกรมกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการ CVD ของเพชร.....	23
1.15 ขั้นตอนการเกิดนิวคลีโอซัน.....	26
1.16 คุณลักษณะแบบจำลองของ CVD การพอกพูนเพชรและการพอกพูนคาร์บอนในรูปแบบของแข็งหลายชนิด.....	28
1.17 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบ MSM.....	30
2.1 การลดลงของความหนาแน่นโฟตอนเมื่อผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ.....	33
2.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานแบบตรง.....	35
2.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานแบบไม่ตรง.....	35
2.4 การดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานต่างๆ ในช่องว่างแถบพลังงาน.....	37
2.5 กราฟแสดงค่าฟังก์ชันงานของแต่ละธาตุ.....	39
2.6 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นรอยต่อแบบโอห์มมิก.....	40
2.7 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อแบบโอห์มมิก.....	41
2.8 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อแบบโอห์มมิก Tunneling.....	41
2.9 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อแบบโอห์มมิก Lowering.....	42
2.10 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นรอยต่อแบบชอตต์กี.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา X ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11	แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อแบบชอตต์กี	43
2.12	แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับโลหะเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไปหน้า.....	44
2.13	แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับโลหะเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ	45
2.14	แถบพลังงานรอยต่อเพชรและโลหะอะลูมิเนียม	48
2.15	โครงสร้างแถบพลังงานของเพชรแบบโอห์มมิก tunneling.....	49
2.16	สัญลักษณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	50
2.17	แถบพลังงาน MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรภาวะสมดุล	51
2.18	แถบพลังงาน MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อได้รับไบแอส.....	51
2.19	แถบพลังงาน MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อได้รับไบแอสและมีพลังงานตกกระทบ.....	52
2.20	คุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	53
2.21	การวัดเวลาตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสง.....	55
2.22	แสดงการตรวจจับรังสีเอกซ์แบบทางอ้อม โดยใช้สารเรืองแสง.....	56
2.23	การดูกลืนแสงจากระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของ ก. luminescence of undoped host matrix, ข. luminescence of doping ions และ ค. cross luminescence	57
2.25	แถบพลังงานของแบเรียมฟลูออไรด์.....	58
2.26	สเปกตรัมแบเรียมฟลูออไรด์	59
2.27	กราฟตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของแบเรียมฟลูออไรด์.....	59
2.28	แถบพลังงาน MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อได้รับไบแอสและมีพลังงาน X-ray ตกกระทบแบบโดยอ้อม	60
3.1	การเกิดชิลิคอนไดออกไซด์.....	62
3.2	อัตราการเกิดชั้นชิลิคอนไดออกไซด์.....	62
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นชิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งกับอุณหภูมิและเวลา.....	63
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นชิลิคอนไดออกไซด์แบบเปียกกับอุณหภูมิและเวลา.....	63
3.5	ก่อนและหลังการชนของอิเล็กตรอนและอะตอมที่เป็นกลางแบบไอออนไนเซชัน	64
3.6	ก่อนชนและหลังชนของอิเล็กตรอนและอะตอมที่เป็นกลางแล้วกลับคืนสู่สภาพเดิม	65
3.7	กระบวนการกลับคืนสู่สถานะเดิมของอะตอมที่ถูกชน.....	65
3.8	กระบวนการแยกตัวของธาตุเมื่อถูกอิเล็กตรอนเข้าชน	66
3.9	พันธะระหว่างชิลิคอนกับไนโตรเจน	67
3.10	ระนาบของเพชร.....	68
3.11	ระบบ HFCVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชร	69
3.12	กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีการเกาะเกี่ยวของคาร์บอนที่เกิดขึ้น	69
3.13	ไดอะแกรมสามเหลี่ยม C-H-O Bachmann.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14 กระบวนการที่ปรากฏบนผิวที่ฐานของการเกาะเกี่ยวกันของโมเลกุล CH ₃	71
3.15 เครื่องปรับชั้นมาสก์.....	80
3.16 ภาพลวดลายเครื่องหมายปรับชั้น 80	80
3.17 หลักการทำงานของอุปกรณ์ Projection Printing	81
3.18 การสกัดแบบแอนไอโซโทรปิกของซิลิคอนระนาบ 100	82
3.19 อัตราการสกัดซิลิคอน (100) ของสารเคมี TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอุณหภูมิ.....	84
3.20 อัตราการสกัดซิลิคอนไดออกไซด์ของสารเคมี TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอุณหภูมิ	84
3.21 อัตราการสกัดซิลิคอน (100) ของสารเคมี KOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอุณหภูมิ.....	85
3.22 อัตราการสกัดซิลิคอนไดออกไซด์ของสารเคมี KOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอุณหภูมิ	86
3.23 อัตราการสกัดซิลิคอนของสารเคมี EPD กับอุณหภูมิ.....	87
3.24 อัตราการสกัดซิลิคอนไดออกไซด์ของสารเคมี EPD กับอุณหภูมิ	87
3.25 ภาพตัดขวางลักษณะการสกัดแบบแอนไอโซโทรปิก	88
3.26 ต้นแบบมาสก์กำหนดพื้นที่เพชร	89
3.27 ต้นแบบมาสก์ไดอะแฟรม	90
3.28 ต้นแบบมาสก์ขั้วไฟฟ้า.....	90
3.29 แบบจำลองโครงสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบน	90
3.30 รายละเอียดโครงสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบน	91
3.31 แผนภูมิกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์	92
3.32 เครื่อง Dicing Saw ยี่ห้อ DISCO รุ่น DAD3350.....	93
3.33 ภาพจำลองขนาดแผ่นซิลิคอนที่ใช้งาน.....	94
3.34 แผ่นซิลิคอนที่อยู่ในเตาขณะสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	94
3.35 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ความหนาประมาณ 5000 Å.....	95
3.36 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านบนออก.....	96
3.37 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่ขัดด้วยครีมเพชรด้านบน	96
3.38 เครื่อง Plasma Deposition System ยี่ห้อ SAMCO รุ่น Model PD-10	97
3.39 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่สร้างซิลิคอนไนไตรด์ด้านบน.....	97
3.40 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรด์ด้านบนถูกสกัดเป็นลวดลายของมาสก์ 1.....	98
3.41 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรด์ที่ได้ทำการแอนนีลพร้อมกับการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์.....	99
3.42 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่สร้างซิลิคอนไนไตรด์ด้านล่าง	100
3.43 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรด์ด้านล่างถูกสกัดเป็นลวดลายของมาสก์ 2	101
3.44 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรด์ที่ถูกสกัดออก	102
3.45 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรด์ที่ได้ทำการแอนนีลพร้อมกับการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์.....	103

3.46 ภาพถ่ายเครื่องระบบ Hot- filament CVD	104
3.47 ภาพจำลองเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์จากเครื่องระบบ Hot- filament CVD.....	104
3.48 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่พร้อมจะสกัดด้านล่าง	105
3.49 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสกัดด้านล่าง	106
3.50 ภาพจำลองขั้วไฟฟ้าที่ถูกสร้างบนเพชรด้านบน	108
3.51 ภาพจำลองขั้วทองที่ถูกสร้างบนเพชรด้านบน.....	110
3.52 พื้นที่เพชรที่ได้จากการสังเคราะห์.....	110
3.53 ลวดลายขั้วโลหะไฟฟ้าด้านบน	110
3.54 พื้นที่โคอะเฟรมและลวดลายขั้วโลหะไฟฟ้าด้านล่าง.....	111
3.55 การติดตั้งอุปกรณ์บนตัวถัง TO-8.....	111
4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้าแผ่นซิลิคอนที่ขัดด้วยครีมเพชร 0.25 μm	112
4.2 ภาพถ่ายฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ในระยะเวลาสังเคราะห์เพชร 8 h ความหนาเพชร 7 μm	114
4.3 สเปกตรัมรามัญของเพชร.....	114
4.4 แสดงตัวอย่างลวดลายที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย 100เท่า)	115
4.5 ภาพจำลองแสดงผลความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีต่อการเกิดลวดลายของเพชร (a) กรณีสิลิคอนไดออกไซด์บาง (b) กรณีสิลิคอนไดออกไซด์หนา.....	116
4.6 แสดงรายละเอียดเพชรขนาด 20 μm	117
4.7 แสดงมุมมองของการเกิดพื้นที่เพชร.....	117
4.8 แสดงพื้นที่เพชรขนาดเล็ก.....	118
4.9 ช่องว่างระหว่างเพชรเกิดผิดพลาดเนื่องจากเพชรเกิดล้าเข้าไปในออกไซด์.....	118
4.10 ข้อผิดพลาดเกิดจากกระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนไนไตรต์ที่ไม่สมบูรณ์	118
4.11 การต่ออุปกรณ์เพื่อวัดคุณลักษณะกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าของ โครงสร้างอุปกรณ์ขอตักกีโฟโตไดโอดชนิดเพชร	119
4.12 การต่ออุปกรณ์เพื่อวัดคุณลักษณะกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าของ โครงสร้างอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	119
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ขอตักกีโฟโตไดโอด ชนิดเพชร	120
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอด ชนิดเพชร	120
4.15 แบบจำลองโครงสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบนตามจำนวนเส้นโลหะ	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง XIII ภา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์และจำนวนเส้น โลหะของอุปกรณ์ ชนิดดีไอโอดีไอโอดชนิดเพชรเมื่อทำการฉายแสง UV	122
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์และจำนวนเส้น โลหะของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดีไอโอดชนิดเพชรเมื่อทำการฉายแสง UV	122
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงความเข้มแสง UV ของตัวอุปกรณ์ชนิดดีไอโอดีไอโอดชนิดเพชร	123
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงความเข้มแสง UV ของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดีไอโอดชนิดเพชร	124
4.20 แบบจำลอง โครงสร้างอุปกรณ์ชนิดดีไอโอดีไอโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดี ไอโอดชนิดเพชรที่มีบริเวณปลอดพาหะ	124
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและจำนวนเส้น โลหะของตัวอุปกรณ์ชนิดดีไอโอดีและตัว อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดีไอโอดชนิดเพชร	125
4.22 ลักษณะพื้นที่บริเวณปลอดพาหะของตัวอุปกรณ์ชนิดดีไอโอดีและตัวอุปกรณ์ MSM	126
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นกับจำนวนเส้น โลหะของอุปกรณ์ชนิดดีไอโอดีไอโอดชนิด เพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดีไอโอดชนิดเพชร	127
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาลงกับจำนวนเส้น โลหะของอุปกรณ์ชนิดดีไอโอดีไอโอดชนิด เพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดีไอโอดชนิดเพชร	128
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ารั่วไหลกับเวลาที่ใช้ในการแอนนีสของอุปกรณ์ MSM โฟ โตไดโอดีไอโอดชนิดเพชร	129
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการแอนนีสของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโต ไดโอดีไอโอดชนิดเพชร	130
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาลงกับเวลาที่ใช้ในการแอนนีสของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโต ไดโอดีไอโอดชนิดเพชร	130
4.28 การต่ออุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดีไอโอดชนิดเพชรกับวงจรขยายและกรองสัญญาณ	131
4.29 อุปกรณ์ฉายรังสีเอกซ์ยี่ห้อ Varian รุ่น S-780	131
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้น โลหะกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโต ไดโอดีไอโอดชนิดเพชรเมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์	132
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ MSM โฟ โตไดโอดีไอโอดชนิดเพชร	133
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสีเอกซ์กับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์ MSM โฟ โตไดโอดีไอโอดชนิดเพชร	133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ XIV ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสีเอกซ์กับเวลาขาขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัว อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	134
4.34 ภาพจำลองลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่ได้เมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์ของอุปกรณ์ MSM โฟโต ไดโอดชนิดเพชรแบบโดยตรง.....	135
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร	136
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับเวลาขาขึ้นที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโต ไดโอดชนิดเพชร.....	137
4.37 ภาพจำลองลักษณะสัญญาณไฟฟ้าเมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์ของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอด ชนิดเพชรแบบโดยตรง	137
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสีเอกซ์กับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบ ระหว่างตัวอุปกรณ์.....	138
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสีเอกซ์กับเวลาขาขึ้นที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง ตัวอุปกรณ์.....	139
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง ตัวอุปกรณ์.....	140
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับเวลาขาขึ้นที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง ตัวอุปกรณ์.....	140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าพื้นฐานของตัวตรวจจับที่ใช้ในการใช้วัดพลังงานรังสีเอกซ์	5
1.2 ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ใช้ในการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน ในชนิดก๊าซต่างๆ	6
1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อดีและข้อเสียกับเทคโนโลยีการสังเคราะห์เพชร	18
1.4 ย่านการใช้งานต่างๆที่ได้ทำการสังเคราะห์เพชรระบบ CVD ของเทคโนโลยีต่างๆ	18
1.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่น	20
2.1 คุณสมบัติของแบเรียมฟลูออไรด์	58
3.1 ค่ามาตรฐาน Clean Room ของ Federal Standard 209E, 1992 / ISO14644-1	77



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความรู้ทั่วไปของรังสีเอกซ์

1.1.1 บทนำ

รังสีเอกซ์คือรังสีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มีลักษณะเป็นทั้งคลื่นและอนุภาคของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น โดยมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.04 Å ถึง 1000 Å ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วงระหว่างรังสีแกมมากับรังสีอัลตราไวโอเล็ต คุณสมบัติโดยทั่วไปของรังสีเอกซ์จะคล้ายคลึงกับแสงสว่างธรรมดาเป็นส่วนใหญ่ แต่คุณสมบัติพิเศษของรังสีเอกซ์คือมีอำนาจทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่างๆ ได้ โดยที่จะผ่านได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นและน้ำหนักอะตอมของวัตถุที่ผ่าน นอกจากนี้รังสีเอกซ์ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านอื่นๆ อีกด้วย

1.1.2 ประวัติการค้นพบรังสีเอกซ์

ผู้ที่ค้นพบรังสีเอกซ์เป็นคนแรกคือ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน (Wilhelm Conrad Roentgen) การพบนี้เกิดขึ้นในตอนเย็นวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2438 (ค.ศ.1895) ภายในห้องทดลอง ณ มหาวิทยาลัยวูซบรุค ประเทศเยอรมัน เรินต์เกนได้พบรังสีเอกซ์ในขณะที่กำลังทำการทดลองในเรื่อง “Absorption of Cathode rays” โดยใช้หลอดทดลองที่เรียกว่า Crookes’ tube เขาได้สังเกตเห็นว่า Cathode rays ที่ออกมาจากหลอดทดลองนั้นทำปฏิกิริยาให้กระดาษแข็งที่ฉาบด้วยธาตุ “แบเรียมพลาคิโนไซยาไนด์” (Barium platino-cyanide) เกิดการเรืองแสงขึ้น โดยที่ระยะที่ไกลที่สุดที่ยังมีการเรืองแสงบนกระดาษแข็งคือ 120 cm ในขณะเดียวกันเขาสังเกตเห็นอีกว่าตัวอักษร A ที่ทำด้วยธาตุแบเรียมพลาคิโนไซยาไนด์ซึ่งวางอยู่ห่างออกไปเกือบสิบฟุตเกิดเรืองแสงขึ้นด้วยทั้งๆ ที่ไม่อยู่ในระยะของ Cathode rays เรินต์เกนจึงคิดว่าเขาค้นพบรังสีชนิดใหม่ขึ้นแล้ว และให้ชื่อว่า X-ray และเขาได้ใช้เวลาอีกหลายสัปดาห์ต่อมาทำการทดลองและสังเกตถึงอำนาจในการทะลุทะลวงของรังสีเอกซ์ผ่านกระดาษ, โลหะและแม้กระทั่งผ่านเนื้อของมนุษย์และเขาได้ถ่ายภาพรังสีของมือของภรรยาเขาไว้ โดยในบริเวณที่เป็นเนื้อหนังจะเห็นเป็นรอยสีเทาหรือสีดำ ส่วนบริเวณที่เป็นกระดูกนิ้วมือจะเห็นเป็นรอยสีขาว ดังรูปที่ 1.1 (b) จึงนับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของวิชารังสีวิทยาทางการแพทย์ [1]



(a)



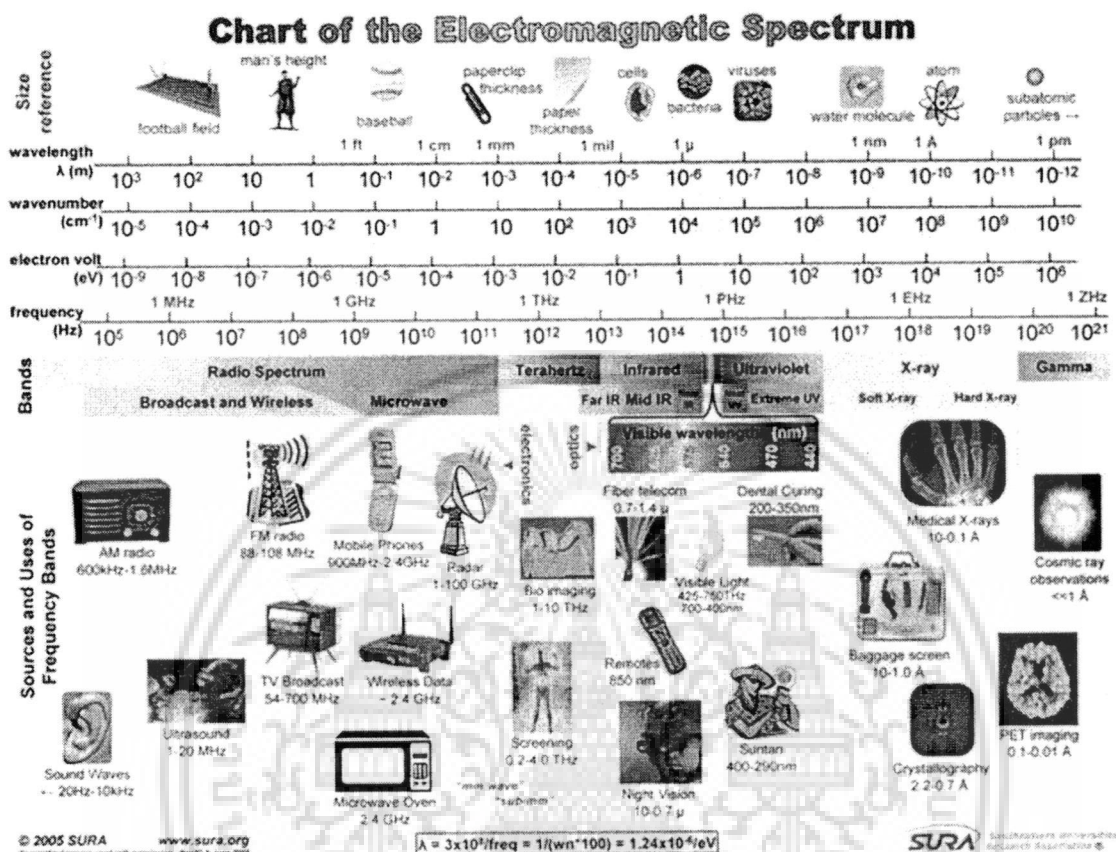
(b)

รูปที่ 1.1 (a) วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน และ (b) มือภรรยาของวิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน

1.1.3 การเกิดรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แต่เป็นรังสีที่เกิดจากการสร้างของมนุษย์ โดยใช้ปรากฏการณ์เบรมสตาร์จส์ (Bremsstrahlung) รังสีเอกซ์เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนซึ่งเป็นวัสดุที่มีมวล (อิเล็กตรอน 1 ตัวมีมวล 9.11×10^{-28} g) วิ่งไปกระทบกับเป้าโลหะซึ่งทำมาจากทั้งสแตนและถูกทั้งสแตนสกัดกันไว้ มีผลทำให้อิเล็กตรอนวิ่งช้าลงหรือหยุดและคายพลังงานจลน์ออกมา ในขณะที่อิเล็กตรอนกำลังวิ่ง จะมีพลังงาน 2 รูป คือ พลังงานศักย์ (potential energy) และพลังงานจลน์ (kinetic energy) พอถูกทั้งสแตนสกัดกันไว้จนหยุด อิเล็กตรอนจะคงเหลือแต่พลังงานศักย์ ส่วนพลังงานจลน์ไม่สูญหาย แต่เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานใหม่อีก 2 รูป คือ มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ จะเปลี่ยนเป็นความร้อนและน้อยกว่า 1 % จะเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่ารังสีเอกซ์ [3] โดยที่รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นส่วนผสมของรังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นแตกต่างกัน ตั้งแต่ความยาวคลื่นสั้นที่สุดซึ่งมีพลังงานสูงสุดที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่ถูกทำให้หยุดและความยาวคลื่นปานกลางขนาดต่างๆ ไปจนถึงความยาวคลื่นที่สูงสุดซึ่งเป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำและยังมีพลังงานจลน์เหลืออยู่ ส่วนผสมของรังสีเอกซ์นี้เรียกว่า รังสีเอกซ์สเปกตรัม (X-ray spectrum) รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีพลังงานสูงและมีอำนาจทะลุทะลวงมากกว่ารังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นยาว นอกจากวิธีการข้างต้นรังสีเอกซ์ยังสามารถเกิดขึ้นได้อีกวิธีหนึ่ง คือ เมื่ออิเล็กตรอนหลายๆ วงที่วิ่งวนรอบนิวเคลียสของอะตอม เกิดการกระโดดข้ามจากวงโคจรที่มีระดับพลังงานสูงกว่าไปสู่วงโคจรอื่นที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า จะเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเฉพาะและคงที่ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะอะตอมของธาตุนั้นๆ รังสีเอกซ์ที่ไม่วาร์ณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มาด้วยวิธีนี้ จึงเรียกว่ารังสีลักษณะเฉพาะ (characteristic radiation) [3] และแถบความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [4] แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงแถบความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดรังสีเอกซ์นี้อาศัยองค์ประกอบสำคัญ 5 ประการ [5] คือ

1. ทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอนหรือการแยกอิเล็กตรอนนอกจากอะตอมของโลหะ อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นหรือแยกจากอะตอมของโลหะที่ทำเป็นไส้หลอดรังสีเอกซ์ โดยการที่เราจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในไส้หลอด (Filament) จนกระทั่งไส้หลอดร้อนขึ้น ประมาณ 2000 °C หรือมากกว่านั้น จะมีผลทำให้เกิดเทอร์มิโอนิกอิมิชัน (Thermionic Emission) คือ อิเล็กตรอนหลุดออกจากเซลล์หรือวงโคจรของมันเมื่อถูกความร้อน อิเล็กตรอนที่หลุดออกมา นี้ จะมาออกันอยู่รอบๆ ผิวหน้าของโลหะจนกลายเป็นกลุ่ม (Cloud) เรียกว่า Space charge สาเหตุที่อิเล็กตรอนไม่สามารถหลุดพ้นไปจากผิวหน้าโลหะ เพราะว่ามีแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมของโลหะยังมีอยู่

2. การทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดและเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูง วิธีที่จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมไปได้ คือ ต้องหาสิ่งที่มีพลังงานหรือแรงดึงดูดมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของโลหะมาดึงดูดอิเล็กตรอนนั้นก็คือ แรงดันไฟฟ้าแรงสูง (High voltage) แรงดันไฟฟ้าแรงสูงนี้ นอกจากจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดจากผิวหน้าของโลหะแล้ว

นอกจากจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนหลุดจากผิวหน้าของโลหะแล้ว ยังจะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ด้วยวิธีนี้ ซึ่งรังสีเอกซ์ที่ได้นี้จะมีพลังงานสูงมากพอที่จะใช้ในการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หรือวิ่งไปด้วยความเร็วสูง กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือต้องทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบให้ต่างกันความต่างศักย์ไฟฟ้านี้ถ้ายังมีค่ามากขึ้นเท่าใด ก็ยังทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวหน้าของไส้หลอดได้มากและวิ่งไปด้วยความเร็วสูงขึ้นความต่างศักย์ 100 kW จะทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วประมาณ 165 km/s

3. การทำให้เส้นทางที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านไม่ต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง จึงจะทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปด้วยความเร็วสูง ดังนั้นภายในหลอดรังสีเอกซ์จึงเป็นสุญญากาศ เพราะถ้ามีอากาศหรือก๊าซอยู่ภายในหลอดแม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม ความเร็วของอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากเกิดไอออนไนเซชัน (Ionization)

4. การทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้มข้น (Concentration of electron) จะต้องมีวิธีการที่จะให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางเดียวกัน คือ พุ่งไปหาจุดโฟกัสของเป้าด้วยปริมาณ (ความเข้มข้น) ที่มากพอสมควร ซึ่งทำให้ได้โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า "Electron focusing device" คอยควบคุมให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ไปตกในบริเวณจุดโฟกัสของเป้า

5. การที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งมาด้วยความเร็วสูงนี้หยุดวิ่งในทันทีทันใดจะสามารถทำให้เกิดรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยหาวัตถุมาถนัดหรือวางอิเล็กตรอนวัตถุนั้นก็คือ เป้า (Target) ผลที่เกิดขึ้น คือ เกิดการชนหรือกระทบกันระหว่างอิเล็กตรอนกับเป้าอย่างแรง อิเล็กตรอนดังกล่าวจะไปชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรของอะตอมของเป้านั้นให้หลุดกระเด็นออกนอกวงโคจรและจะมีอิเล็กตรอนจากวงโคจรอื่นๆ ที่อยู่ถัดไปวิ่งเข้ามาแทน แต่เนื่องจากพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรจะไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์และความร้อน (ส่วนใหญ่จะเป็นความร้อนมากกว่า) กล่าวคือ จากพลังงานของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่วิ่งไปสู่เป้านั้น 99.8 % จะเปลี่ยนเป็นความร้อน และ 0.2 % จะเปลี่ยนเป็นรังสีเอกซ์

1.1.4 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอกซ์

1. เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีช่วงคลื่นสั้นมากอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.04 Å ถึง 1000 Å
2. มีคุณสมบัติเหมือนแสงสว่างธรรมดา เช่น เดินทางเป็นเส้นตรง ถ้าเดินทางในสุญญากาศจะมีความเร็วเท่ากับแสงคือ 3×10^8 m/s นอกจากนั้นแล้ว ยังมีการสะท้อนกลับ, หักเหและเบี่ยงเบนได้เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา
3. ไม่หักเหโดยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า
4. เกิดจากการที่อนุภาคอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนเป้าอิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะวิ่งไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ ที่อยู่ภายในวงโคจรของอะตอมของเป้าให้หลุดกระเด็นออกนอกวงโคจรอิเล็กตรอนของเซลล์นอกถัดออกไปจะวิ่งเข้ามาแทนที่และคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์และความร้อน

5. ทำให้เกิดการเรืองแสงในสารพิเศษบางอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ดูดกลืน (Absorbed) โดยสสาร (Matter) ทุกชนิดมากบ้างน้อยบ้างขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและน้ำหนักของอะตอมของสสารนั้น
 7. ทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้าเมื่อผ่านไปในอากาศหรือก๊าซ
 8. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เมื่อรังสีเอกซ์ไปถูกฟิล์มถ่ายภาพจะทำให้ฟิล์มนั้นดำจึงนำผลอันนี้มาใช้ในการบันทึกภาพรังสีบนแผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์
 9. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวะ คือทำให้เซลล์ของร่างกายเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการผ่าเหล่า (Genetic mutation) ถ้าได้รับรังสีเป็นจำนวนมาก
 10. มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงสามารถทะลุผ่านเนื้อหนังของมนุษย์และสัตว์ได้แต่ไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นตะกั่วหรือคอนกรีตหนาๆ ได้
- สำหรับข้อมูลเบื้องต้นของรังสีเอกซ์แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

1.1.5 อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์

มีอุปกรณ์มากมายที่ใช้ในการตรวจจับรังสีเอกซ์, โฟตอน, วัตถุจากอัตราส่วนหรือสนาม หรือพลังงานในรูปแบบอื่น ตารางที่ 2.5 ค่าพื้นฐานของตัวตรวจจับที่ใช้ในการใช้วัดพลังงานรังสีเอกซ์ [7]

ตารางที่ 1.1 ค่าพื้นฐานของตัวตรวจจับที่ใช้ในการใช้วัดพลังงานรังสีเอกซ์

Detector	Energy range (keV)	$\Delta E/E$ at 5.9 keV (%)	Dead time/event (μs)	Maximum count rate (s^{-1})
Gas ionization (current mode)	0.2–50	n/a	n/a	10^{11a}
Gas proportional	0.2–50	15	0.2	10^6
Multiwire and micro strip proportional	3–50	20	0.2	$10^6/mm^2$
Scintillation [NaI(Tl)]	3–10,000	40	0.25	$2 \cdot 10^6$
Energy-resolving semiconductor	1–10,000	3	0.5–30	$2 \cdot 10^5$
Surface-barrier (current mode)	0.1–20	n/a	n/a	10^8
Avalanche photodiode	0.1–50	20	0.001	10^8
CCD	0.1–70	n/a	n/a	n/a
Superconducting	0.1–4	< 0.5	100	$5 \cdot 10^3$
Image plate	4–80	n/a	n/a	n/a

^a Maximum count rate is limited by space-charge effects to around 10^{11} photons/s per cm^3 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัวตรวจจับโดยใช้การเกิดไอออนของก๊าซ เป็นลักษณะที่ใช้ในการวัดค่าของสนาม ตัวตรวจจับแบบก๊าซทั่วไปประกอบไปด้วยรูปแบบของเซลล์ที่เป็นสี่เหลี่ยมมีทางเข้าและทางออก ในตัวตรวจจับจะมีสนามไฟฟ้าประมาณ 100 V/cm ต่ออยู่ระหว่างแผ่นเพลตที่วางขนานกันอยู่ โดยรังสีเอกซ์ที่เกิดปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยาในห้องปฏิกิริยา (chamber reactor) ที่มีก๊าซก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรืองแสง โดยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจะไปเพิ่มคู่อิเล็กตรอนโดยการเข้าชน และจะให้พลังงานหรือไม่ก็ถูกดูดซับพลังงาน โดยคู่อิเล็กตรอน โสตรอนหรือไอออนก็จะไปเกาะที่แผ่นเพลตทั้งสอง และกระแสไฟฟ้าก็จะถูกวัดด้วยวงจรไฟฟ้าที่มาขยายอีกครั้ง ประสิทธิภาพในการตรวจจับขึ้นอยู่กับช่วงความยาวของลำรังสีเอกซ์ที่เกิดปฏิกิริยา, คุณสมบัติของก๊าซในห้องปฏิกิริยา และการดูดซับพลังงานของโฟตอน ประสิทธิภาพของก๊าซๆ ที่ความดันปกติ สนามของโฟตอนประมาณได้จากกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในห้องปฏิกิริยา และค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน โสตรอน

ตารางที่ 1.2 ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ใช้ในการเกิดคู่อิเล็กตรอน ในชนิดก๊าซต่างๆ

Element	Energy (eV)
Helium	41
Nitrogen	36
Air	34.4
Neon	36.3
Argon	26
Krypton	24
Xenon	22

2. การวัดแบบการเปรียบเทียบของก๊าซ เป็นตัวตรวจจับแบบอัตราส่วนก๊าซประกอบไปด้วยโลหะอาโนดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กอยู่ที่ท้ายของทึบรจุก๊าซ โดยปกติเราจะใช้วิธีการนับจำนวนโฟตอนที่เกิดขึ้น เมื่อโฟตอนทำปฏิกิริยาในก๊าซ อะตอมของก๊าซบางตัวจะเกิดการไอออน และอิเล็กตรอนก็จะถูกดึงโดยขั้วของอาโนดใกล้ๆ กับขั้วอาโนดจะมีการเร่งของสนามไฟฟ้า เพื่อที่จะเพิ่มจำนวนของอิเล็กตรอน ผลก็คือจะได้พัลส์ทางไฟฟ้าขนาดใหญ่ เอาท์พุทที่ได้ก็จะถูกขยายโดยวงจรทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่จะนำไปใช้งาน โดยพัลส์ที่ตรวจจับได้มีจะความคมชัดสูงสามารถนำมาวิเคราะห์ทางพลังงานได้ อัตราส่วนในการใช้งานนี้มีถึง 10^6 ครั้งต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วัดแบบการเปรียบเทียบโดยใช้โครงสร้างแบบตาข่ายของตัวตรวจจับ การวัดแบบนี้ถูกนำไปใช้งานแบบตัวตรวจวัดแบบตำแหน่งของทั้งโฟตอนและอนุภาคที่มีประจุ ตาข่ายจะใช้เส้นขนาดเล็กขนาดประมาณ 2 mm เป็นส่วนของเพลตอานโคในบรรยากาศของก๊าซที่เหมาะสม และตัวตรวจจับเป็นส่วนแบบเพลตอานโค มีช่องว่างที่เหมาะสมประมาณ 30 μm ไม่นานมานี้มีการพัฒนาตัวตรวจจับแบบ gas electron multiplying (GEM) โดยปรับปรุงช่องว่างดังกล่าวและการใช้งานในแรงดันที่ต่ำลง

4. ตัวตรวจจับแบบให้ประกายแสง ทำงานโดยการแปลงรังสีเอกซ์เป็นแสง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เฉพาะของวัสดุ และทำการตรวจจับแสงโดยใช้โฟโตไดโอด โดยวัสดุที่เป็นสารเรืองแสงเป็นสารออร์แกนิกส์ เช่น คริสตอลที่เป็น thallium-activated sodium iodide, NaI(Tl) หรือ sodium-activated cesium iodide, CsI(Na) หรือ bismuth germanate (BGO) เนื่องจากแสงมีปริมาณที่ต่ำ (200 eV ถึง 300 eV) ความคมชัดก็ต่ำ จะพบว่าสารเรืองแสงที่เป็นวัสดุออร์แกนิกส์ จะมีความคมชัดของพลังงานที่ต่ำ ไม่ว่าจะคริสตอลของ NaI(Tl), CsI(Na) และ BGO ก็ตาม โดยความคมชัดของพลังงานมีค่าประมาณ 40 % ที่ 10 keV ตัวตรวจจับชนิดนี้จะมีเวลาการแยกชัด (resolution time) ดีขึ้นได้ประมาณ 1 ns และ a count rate capability ถึง 2×10^6 โฟตอน/วินาที เมื่อสารเรืองแสงมีความหนาแน่นมากกว่า 5 mm สำหรับ NaI และ CsI และมีประสิทธิภาพประมาณ 20 keV และ 100 keV ต่อหน่วย

สำหรับตัวตรวจจับแบบก๊าซเปล่งแสงวับ เป็นการรวมเอาการเกิดไอออนของก๊าซในห้องทำปฏิกิริยา และตัวตรวจจับโฟตอนมาปรับปรุงประสิทธิภาพ อิเล็กตรอนเกิดจากโฟตอนหรืออนุภาคที่มีประจุที่ทำปฏิกิริยาในก๊าซ (ปรกติเป็นก๊าซ xenon หรือ argon with 1% xenon) ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า (~ 3 kV/cm) จะให้แสงที่เป็น UV และตรวจจับโดยโฟโตไดโอด การตรวจจับแบบนี้ก็จะมีความคมชัดทางพลังงาน (resolution energy) มากกว่า ตัวตรวจจับแบบธรรมดาสองถึงสามเท่า

5. ตัวตรวจจับของสารกึ่งตัวนำโหมดพลังงาน คือใช้ซิลิคอนและเยอรมันเนียมเป็นตัวตรวจจับที่สามารถตรวจจับพลังงานโฟตอนได้อย่างดีเยี่ยม (ประมาณ 150 eV ที่ 5.9 keV) มีบริเวณใช้งานขนาดใหญ่ เมื่อมีการไบแอสกลับให้กับไดโอดชนิด n^+i-p^+ เมื่อโฟตอนทำปฏิกิริยาในบริเวณที่เป็นปลอดพาหะ คู่อิเล็กตรอนโฮลก็จะเกิดขึ้น ในด้านหน้าของสนามไฟฟ้าพาหะก็จะถูกแยกโดยขั้วของตัวตรวจจับ ค่าพลังงานเฉลี่ยในการทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลประมาณ 3.6 eV สำหรับซิลิคอน และเยอรมันเนียม คือ 2.98 eV เพื่อที่จะให้มีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลน้อย ตัวตรวจจับจำเป็นที่จะต้องมีความบริสุทธิ์ของสารมาก เช่นตัวตรวจจับแบบเยอรมันเนียม ควรทำมาแบบวัสดุที่มีความบริสุทธิ์สูงคือสิ่งเจือปนน้อยกว่า 10^{10} impurities/cm³ ซึ่งจะช่วยลดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจากความร้อนได้

เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ตัวตรวจจับของสารกึ่งตัวนำโหมดกระแสไฟฟ้า คือ ไดโอดที่เป็นสารกึ่งตัวนำทั้งหมด จะใช้งานในโหมดกระแสไฟฟ้าเพื่อที่จะวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ มีการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้น มากและมีพื้นที่รับสัญญาณที่เหมาะสม ตัวตรวจจับที่ใช้ผิวสัมผัสจะมีการตรวจจับที่ดีเมื่อใช้ วงจรขยายกระแสไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณรบกวนต่ำ อีกทางหนึ่งคือตัวตรวจจับที่เป็นซิลิคอนแบบอะ วาลานซ์ก็สามารถนำมาใช้งานได้ เนื่องจากฐานที่ใช้เป็นซิลิคอนดังนั้น โครงสร้างแบบอะวาลานซ์ก็ จะทำให้ได้คู่พาหะอิเล็กตรอนโฮลจากโฟตอน อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถตรวจจับความเข้มต่ำในแบบ พัลส์และแบบกระแสไฟฟ้า เมื่อมีความเข้มสูงและยังมีการจำแนกทางเวลาที่ดีมากแต่มีข้อจำกัดของ ความคมชัดทางพลังงาน

7. ตัวตรวจจับแบบ CCD (Charge Coupled Devices) ถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลายใน การสร้างภาพจากรังสีเอกซ์ สามารถสร้างได้ถึง 4096×4096 พิกเซลล์ ด้วยขนาดของแต่ละ พิกเซลล์ $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ และการอ่านข้อมูลก็น้อยกว่า 1 วินาที คุณลักษณะที่สำคัญในการใช้งาน CCD จะต้องถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า 30°C เพื่อที่จะลดสัญญาณรบกวน ระบบส่วนใหญ่จะมี ฟิล์มฟอสเฟอร์บางๆ อยู่ด้านหน้าเพื่อที่จะเปลี่ยนรังสีเอกซ์เป็นแสงและให้ตัว CCD ตรวจจับอีกที ส่วนใหญ่สารฟอสเฟอร์จะเป็น $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S} (\text{Tb})$ ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพสูง และเวลาลดถอย (decay time) ก็มีค่าไม่ถี่ร่อยไมโครวินาที เมื่อมีตัวตรวจจับหลายตัวในการสร้างภาพ ก็ต้องใช้แผ่น ฟอสเฟอร์ที่มีขนาดใหญ่ (มากกว่า 300mm^2) ซึ่งปรกติจะคิดเพื่อใช้คู่กับตัว CCD อีกทางหนึ่ง การ สร้างภาพที่เกิดจากการฉายรังสีที่มีความเร็ว และมีความหนาของชั้นเรืองแสงสีฟ้าประมาณ $5 \mu\text{m}$ ถึง $20 \mu\text{m}$ กับเลนส์เรืองแสงขนาด $1 \mu\text{m}$

8. ตัวตรวจจับแบบอื่นๆ เมื่อไม่นานมานี้มีการพัฒนาโดยใช้สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ (0.1K ถึง 4K) มาทำการตรวจจับรังสีเอกซ์ ตัวตรวจจับนี้มีความจำแนกชัดทางพลังงานดีมากคือ ช่วง 12eV ถึง 700eV มีขนาดเล็กและใช้งานได้ไม่เกิน 1keV และมีอัตราการนับเพียง $5 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ อีกทางหนึ่งตัวตรวจจับนี้อาจจะนำมาพัฒนาใช้เป็นเครื่องวัดรังสีเอกซ์สเปกตรัมได้

ตัวตรวจจับแบบเพลตขนาดเล็ก เป็นอุปกรณ์ที่มีอัตราการขยายอิเล็กตรอนที่สูง ซึ่งบ่อยครั้ง จะใช้ผลของอิเล็กตรอนหรือเป็นตัวตรวจจับพลังงาน โฟตอนที่ค่าต่ำ รูปแบบหนึ่งของการควบคุม ความดัน ประกอบไปด้วยช่องที่เป็นแก้วนำประมาณ 10^7 ช่อง โดยทั่วไปแต่ละช่องจะเป็นอิสระกัน และกันประมาณ $10 \mu\text{m}$

ตัวตรวจจับแบบระบบภาพ เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้งานได้ง่าย โดยมีคุณสมบัติหลายอย่าง สามารถเคลื่อนย้ายได้ มีประสิทธิภาพใช้ได้บริเวณกว้าง ตัวตรวจจับนี้ทำมาจากวัสดุที่สามารถ ตรวจจับโฟตอนได้ เมื่อฉายรังสีเอกซ์ก็จะมีสีปรากฏตรงกลางทำให้สามารถอ่านค่าได้โดยการแสดง ออกมาอยู่ในภาพที่เป็นดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายคือภาพจากฟิล์ม ซึ่งถูกนำมาใช้งานในการสร้างภาพจางสีเอกซ์ด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความจำเป็นที่ต้องมีการประมวลผลหลังจากฉายรังสี จึงไม่ได้นำมาใช้งานมากนัก ซึ่งฟิล์มนั้นยังจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงประสิทธิภาพ ความสว่าง และความแม่นยำ

1.2 ความรู้ทั่วไปของเพชร

1.2.1 วิวัฒนาการการสังเคราะห์เพชร

ในปี ค.ศ. 1797 Smithson Tennant [15] ได้แสดงให้เห็นว่าเพชรเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอน โดยเผาเพชรในออกซิเจน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเถ้าถ่านที่เหลืออยู่ เมื่อทราบว่เพชรมีความหนาแน่น 3.52 mg/cc สูงกว่ากราไฟท์ ซึ่งมีค่า 2.25 mg/cc เป็นเหตุผลที่สามารถเปลี่ยนคาร์บอนให้เป็นเพชรได้โดยใช้ความดัน ทำให้เกิดแรงกระตุ้นทำการสังเคราะห์เพชรขึ้นมา อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์เพชรในตอนแรกไม่ได้ทำเพื่อการศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์ แต่ทำในแง่ของการนำไปเป็นเครื่องประดับซึ่งเป็นความหลงใหล โดยส่วนใหญ่เพชรที่สังเคราะห์ได้จะไม่ใช้เพชรที่แท้จริง

หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1955 ที่ General Electric Research Laboratories Bundy และเพื่อนร่วมงานได้ทำการสังเคราะห์เพชรเป็นผลสำเร็จ และได้มีการพัฒนาอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในความดันสูง และค้นพบกระบวนการ solvent-catalytic ที่สามารถเปลี่ยนคาร์บอนให้อยู่ในรูปของเพชรได้ การวิจัยได้มีการออกแบบการวิจัยเป็นหลายแนวทางด้วยกัน แบ่งได้เป็น 3 แนวทางหลัก ๆ คือ

1. HPHT การสังเคราะห์โดยใช้ molten transition metal solvent catalyst
2. HPHT direct conversion (HPHT = High Pressure and High Temperature)
3. Shock wave direct conversion

วิธีการทั้งสามทำให้ได้เพชรที่มีความเสถียรเชิงพลวัตของความร้อน สำหรับกราไฟท์ ซึ่งมีเฟสที่เสถียรที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ สามารถทำให้อยู่ในรูปของเพชรได้ โดยใช้ความร้อน และแรงอัดจนทำให้กราไฟท์เปลี่ยนรูปเป็นเพชร หลังจากเกิดการก่อตัวเป็นเพชรแล้วเมื่ออุณหภูมิกลับสู่อุณหภูมิห้องหรือความดันบรรยากาศ พลังงานในการกระตุ้นให้กลับสู่กราไฟท์จะมีค่าสูง กล่าวได้ว่าเพชรมีความเสถียรหรืออยู่ในสถานะสมดุลทางความร้อน ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศเพชรจะยังคงสภาพอยู่ตลอดไป แต่กระบวนการ High pressure high temperature (HPHT) ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง

แม้ว่าการสังเคราะห์เพชรจะทำภายใต้เงื่อนไขความดันและอุณหภูมิสูง ไม่ได้หมายความว่าผลึกของเพชรจะไม่สามารถสังเคราะห์ได้ที่ความดันและอุณหภูมิต่ำในปี ค.ศ. 1911 ได้มีการแสดงให้เห็นว่า สามารถสังเคราะห์เพชรได้ภายใต้เงื่อนไขที่คาร์บอนอยู่ในสถานะเสถียร อาจเป็นไปได้ที่ผลึกของเพชรอาจไม่เสถียรที่ความดันและบรรยากาศค่าหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกราไฟท์ เช่น ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันต่ำกว่าหนึ่งบรรยากาศ และอุณหภูมิต่ำกว่า 1373 K ซึ่งเป็นผลจากความสมดุลทางความร้อน, พลังงานศักย์และปฏิกิริยาเคมี กล่าวได้ว่ากราฟิฟมีความเสถียรมากกว่าเพชร โดยมีพลังงานอิสระแตกต่างกันเพียง 0.692 kcal/mol ที่ความดันปกติ การกระตุ้นเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเพชรไปสู่กราฟิฟ บนพื้นผิวของเพชรที่อุณหภูมิ 1,000 °C อะตอมคาร์บอนจะมีความคล่องตัวสูง และขณะที่มีการก่อตัวเป็นเพชรอะตอมของคาร์บอนจะมีความเสถียรมากกว่าการก่อตัวเป็นกราฟิฟ

การสังเคราะห์เพชรที่มีความสมดุลทางความร้อน จะใช้วิธีการสังเคราะห์จากสถานะก๊าซ ซึ่งเป็นก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามอะตอมของไฮโดรเจน ก็มีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำเพราะเป็นตัวแยกกราฟิฟออกไป การสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำกระทำอย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1970 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวโซเวียตได้แสดงให้เห็นเทคนิคในการเพิ่มอัตราการก่อตัวของเพชร ขณะที่มีการลดจำนวนกราฟิฟทิ้ง ในปี ค.ศ. 1980 National Institute for Research in Inorganic Materials (NIRIM) ที่ประเทศญี่ปุ่นมีการค้นพบเทคนิคใหม่ในการกระตุ้นก๊าซ และการเคลือบเพชร ในปี ค.ศ. 1977 Derjaguin และ Fedoseev ได้ให้ข้อเสนอ 3 อย่างในการทำให้ความเข้มข้นของอะตอมไฮโดรเจนมีมากกว่ากรณีที่ใช้ความร้อนในการแตกตัวก๊าซไฮโดรคาร์บอน-ไฮโดรเจน คือ การใช้ catalytic, electric discharge และ heat tungsten filament ผลที่ได้ยังไม่ได้มีการนำเสนอจนกระทั่งปี ค.ศ. 1981 และมีการเสนอรายละเอียดเพิ่มเติม ในปี ค.ศ. 1984 หลังจากนั้นก็มีเทคนิคหลายอย่างในการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ เช่น Radio frequency Chemical Vapor Deposition (RFCVD), Microwave plasma enhanced Chemical Vapor Deposition (MPCVD) และ Hot filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) เป็นต้น โดยเทคนิคทั้งหมดอยู่บนพื้นฐานการทำให้อะตอมไฮโดรเจนแตกตัวบริเวณพื้นผิวที่สังเคราะห์เพชร อัตราการก่อตัวมีตั้งแต่ 1 $\mu\text{m/h}$ ถึง 10 $\mu\text{m/h}$ บนฐานรองหลายชนิด เช่น Si, Ta, W, Mo และ Al_2O_3 เป็นต้น

1.2.2 กระบวนการ CVD แบบต่างๆ

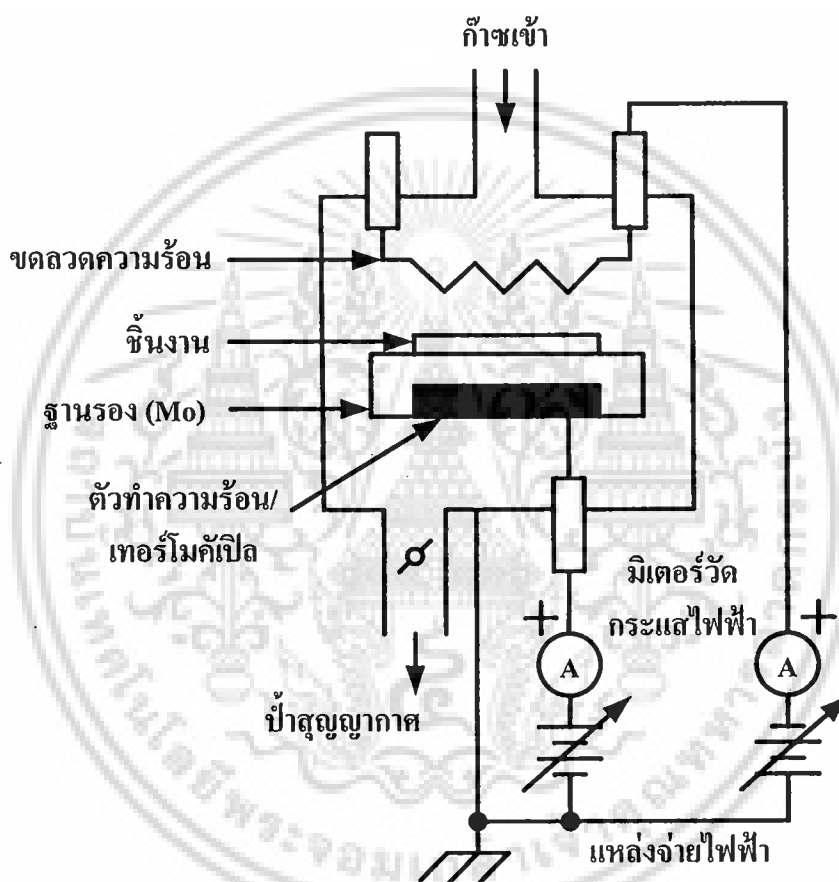
การสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำมีอยู่หลายวิธี วิธีที่เป็นที่นิยมในการสังเคราะห์ฟิล์มคือ วิธี CVD (Chemical Vapor Deposition) มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ละวิธีมีความแตกต่างกันเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์, อัตราการเคลือบฟิล์ม, พื้นที่การเกิดฟิล์ม, ชนิดของแหล่งจ่ายก๊าซ และช่วงอุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามวิธีการทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม ลักษณะรูปร่างของฟิล์ม และคุณลักษณะสเปกตรัมของรามันมีลักษณะคล้ายกัน นอกจากนี้วิธีสังเคราะห์ฟิล์มแต่ละวิธีสามารถสร้างเพชรได้หลายลักษณะ โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการสร้าง สำหรับวิธีการ CVD สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการ CVD แบบความร้อน
2. กระบวนการ CVD แบบพลาสมาความถี่สูง
3. กระบวนการ CVD แบบพลาสมากระแสตรง

1.2.2.1 กระบวนการ CVD แบบความร้อน

Hot filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์เพชร โดย Y. H. Lee และคณะ [16] ดังรูปที่ 1.3



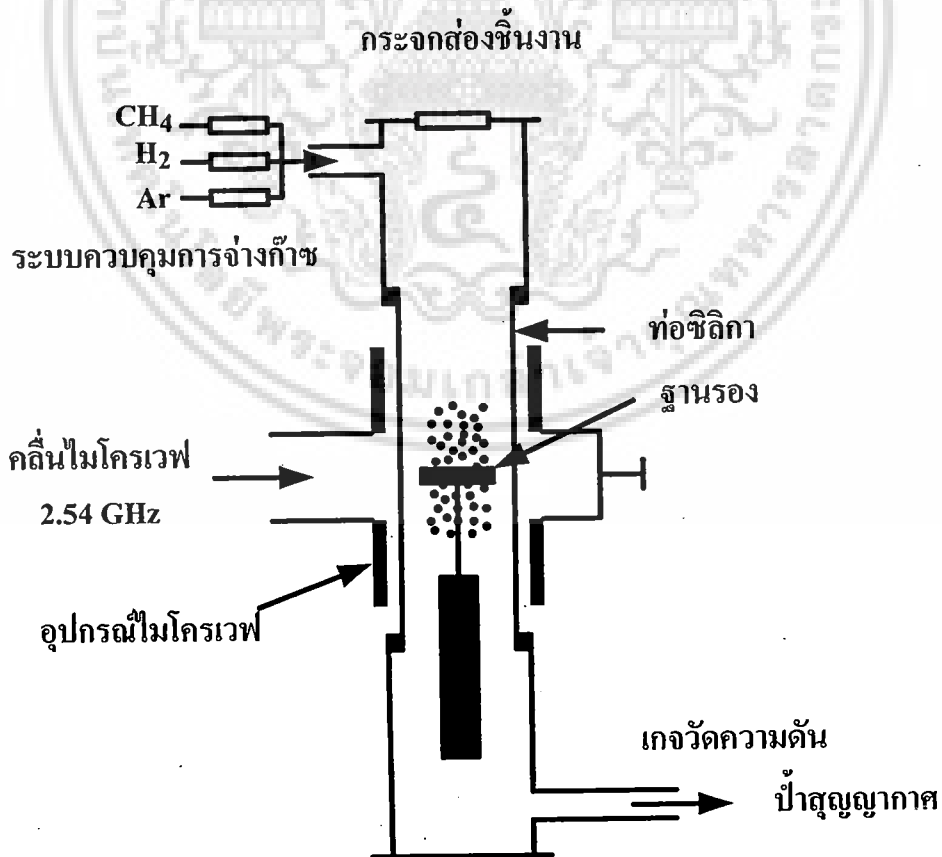
รูปที่ 1.3 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD

ขดลวดทังสเตน (Tungsten), โมลิบดีนัม (Molybdenum), แทนทาลัม (Tantalum) ใช้เป็นลวดความร้อนได้ให้ความร้อนมีอุณหภูมิ $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนที่ผสมกันอยู่เกิดการแตกตัวด้วยความเข้มข้นของมีเทน (Methane) เป็น 0.1 % ถึง 2.0 % ในไฮโดรเจนที่ความดัน 50 Torr ถึง 100 Torr ระยะห่างระหว่างลวดความร้อนกับฐานรองมีค่าประมาณ 1 cm ทำให้ฐานรองมีอุณหภูมิระหว่าง $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลจากการกระตุ้นด้วยความร้อนทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอน เกิดการแพร่และปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณผิว บริเวณฐานรอง สามารถจ่ายศักดาบวก ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวของก๊าซบริเวณนี้มากขึ้น ทำให้อัตราการก่อตัวเพิ่มขึ้น ความหนาไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์มขึ้นกับเวลาที่ใช้ วิธี HFCVD เป็นวิธีที่ง่าย, ไม่แพง และสามารถสร้างฟิล์มให้มีพื้นที่ครอบคลุมฐานรองขนาดใหญ่ได้ แต่จะมีปัญหาเรื่องลวดความร้อนที่เปราะและผิดรูปไป เนื่องจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการก่อตัวของคาร์ไบด์ขึ้นบนลวดความร้อน

1.2.2.2 กระบวนการ CVD แบบพลาสมาความถี่สูง

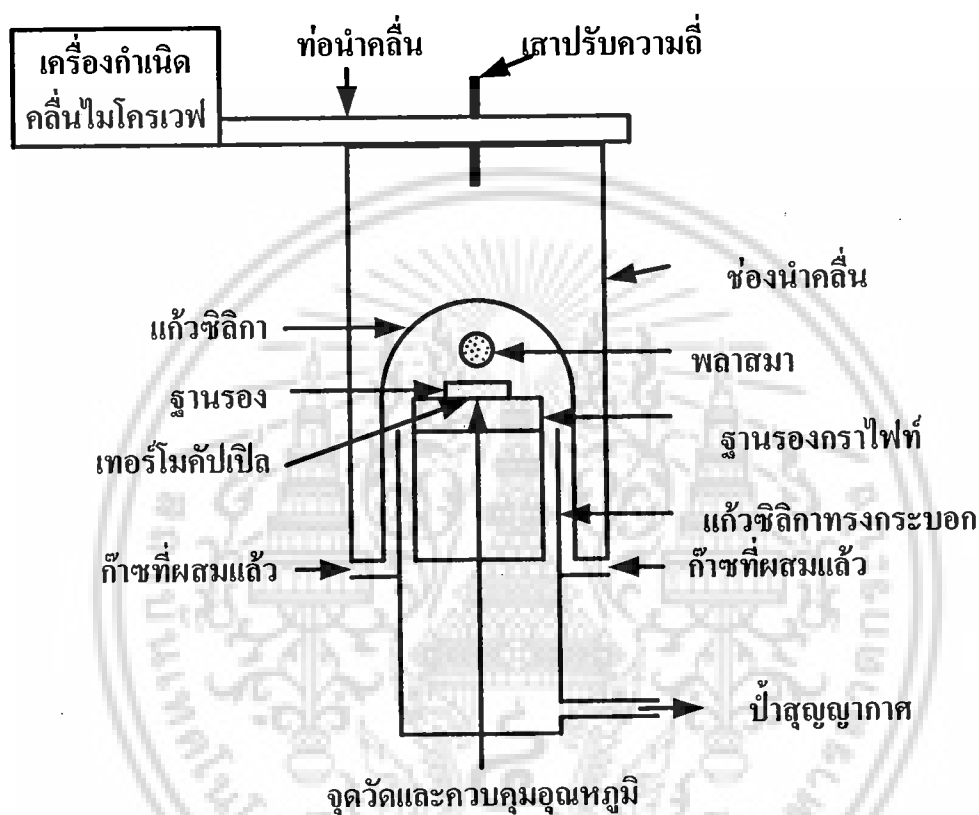
หลักการ CVD ในลักษณะนี้จะใช้พลาสมาของไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ในการสังเคราะห์เพชรเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากโดย A. R. Badzian และคณะ [17] ดังรูปที่ 1.4 เป็นลักษณะของ Microwave plasma enhanced Chemical Vapor Deposition (MPCVD) ชนิดท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม สำหรับการจำกัดขอบเขตของไมโครเวฟระหว่าง Generator และห้องปฏิกิริยา โดยใช้ห้องปฏิกิริยาเป็นท่อควอร์ต วางตรงกลางของทิศทางไมโครเวฟที่จะผ่านไปยัง Applicator ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม Three Stub Tuners และมอนิเตอร์วัดกำลังใช้ร่วมกันในท่อนำคลื่น เพื่อจำกัดพลังงานที่สะท้อนจาก Applicator ให้มีค่าน้อยสุดพลาสมาของไฮโดรคาร์บอน-ไฮโดรเจนผสมจะเกิดขึ้น ซึ่งเพชรจะถูกเคลือบลงบนฐานรองที่ปราศจากข้อผิดพลาดที่ความดัน 25 Torr ถึง 100 Torr อุณหภูมิฐานรอง 700 °C ถึง 900 °C และความเข้มข้นของมีเทน 0.2 % ถึง 5 % ในบรรยากาศของไฮโดรเจน อัตราการเคลือบประมาณ 1 $\mu\text{m}/\text{h}$ ถึง 5 $\mu\text{m}/\text{h}$



รูปที่ 1.4 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Tubular microwave plasma CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

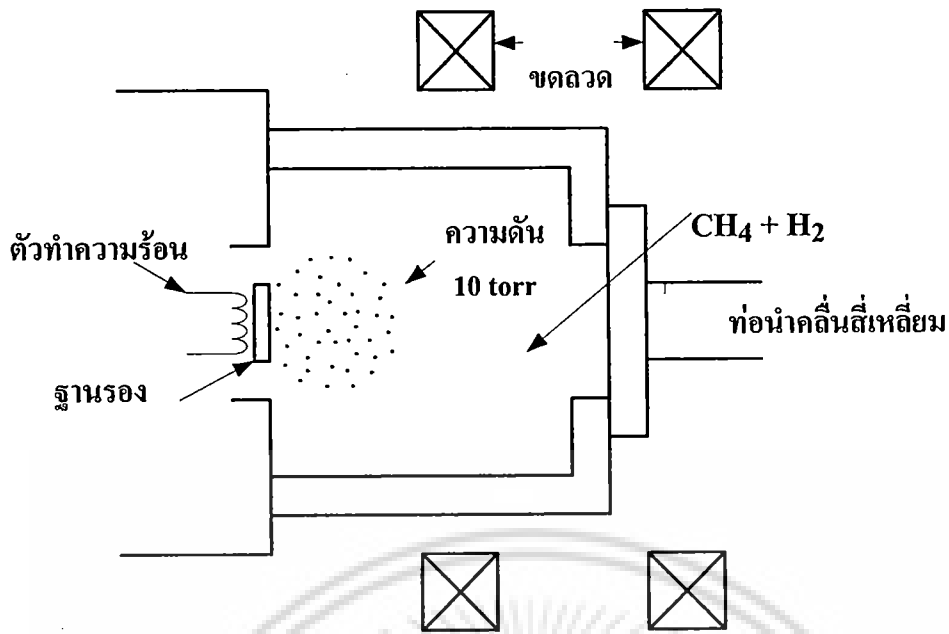
ต่อมาได้มีการพัฒนาเทคนิคดังกล่าว เป็นแบบท่อนำคลื่นที่สมมาตรในทรงกระบอก โดย Y. Liou และคณะ [18] ดังรูปที่ 1.5 การจัดวางในลักษณะนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีในรูปที่ 1.4 เช่นทำให้ได้พื้นที่ที่ใหญ่กว่า และการเคลือบจะราบเรียบสม่ำเสมอ และมีความสมดุลของพลาสมา ทำให้ระบบนี้เป็นที่นิยมทั้งในการสังเคราะห์พื้นฐาน และการประยุกต์ใช้งาน CVD ในการสังเคราะห์เพชร



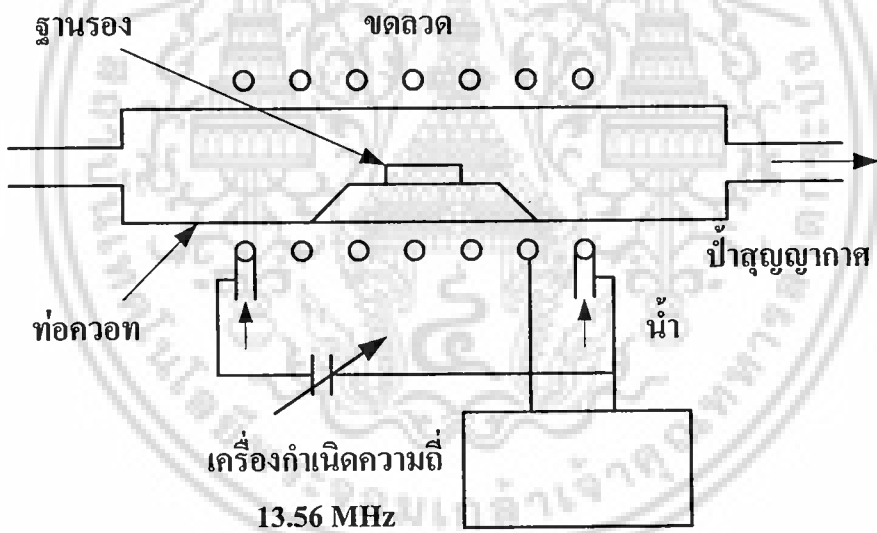
รูปที่ 1.5 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี A bell jar microwave plasma CVD

M. Kawada และคณะ [19] ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ดังรูปที่ 1.6 เป็นแบบ Magneto-Microwave Plasma โดย Helmholtz-Type Coil วางอยู่รอบท่อนำคลื่นทรงกระบอก และใช้การกระจายของสนามแม่เหล็กในการควบคุมพื้นที่ของการเคลือบฟิล์ม ทำการจ่ายสนามแม่เหล็กประมาณ 875 Gauss ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อ Electron Cyclotron Resonance (ECR) ความถี่ของ Electron Gyration ย่านไมโครเวฟ 2.45 GHz ข้อได้เปรียบของ ECR คือ ได้ฟิล์มมีขนาดใหญ่กว่า และมีความสม่ำเสมอ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพลาสมากับพื้นที่การเคลือบสูง และใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำ เทคนิคนี้สามารถใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 500 °C ที่ความดัน 0.1 Torr นอกจากนี้ฟิล์มยังมีความบริสุทธิ์และมีคุณภาพดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี A Magneto Microwave Plasma CVD

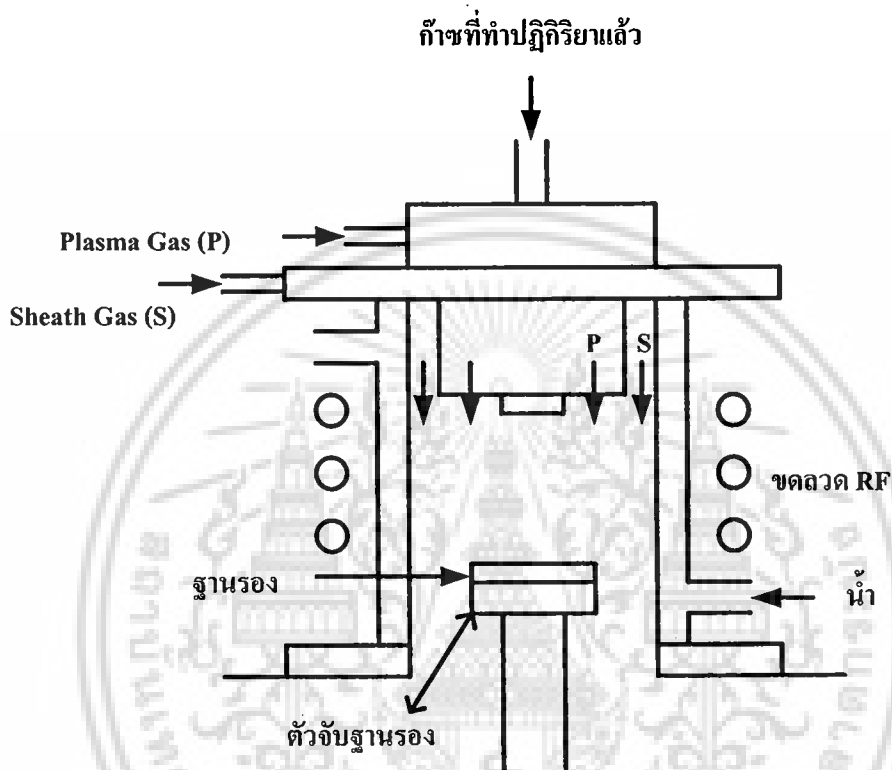


รูปที่ 1.7 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Inductive RF plasma CVD

สำหรับระบบพลาสมาความถี่วิทยุ ดังรูปที่ 1.7 เป็นวิธีที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์เพชรเช่นกัน วิธีนี้จะได้ขนาดผลึกที่ไม่ใหญ่เท่าวิธีไมโครเวฟพลาสมา ใช้ความถี่ 13.5 MHz โดยเงื่อนไขในการสังเคราะห์ฟิล์มเหมือนกับของไมโครเวฟพลาสมามีอัตราการเกิด 0.5 $\mu\text{m/h}$ ถึง 3.0 $\mu\text{m/h}$ S. Matsumoto และคณะ [20, 21] ได้ทำการพัฒนาเทคนิคในการใช้กำลังสูงเพื่อทำให้เกิดพลาสมาความถี่วิทยุที่ความดันบรรยากาศ ดังรูปที่ 1.8 วิธีดังกล่าวนี้ RF ที่ให้ความร้อนได้จากพลาสมาความร้อนของไฮโดรเจน, อาร์กอน และก๊าซผสมของมีเทนกำลังมีค่า 60 kW ที่ความถี่ 4 MHz ฐานรองมีการระบายความร้อนด้วยน้ำ อุณหภูมิฐานรองอยู่ระหว่าง 700 °C และ 1200 °C

นอกจากนี้... ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสมามีความร้อนมากกว่า $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความเข้มข้นของมีเทน 10 % ซึ่งมีค่ามากกว่าวิธีอื่นๆ เทคนิคนี้มีอัตราการเกิด $60\text{ }\mu\text{m/h}$ ถึง $180\text{ }\mu\text{m/h}$ ความร้อนของพลาสมาความถี่วิทยุ ที่กำลังสูงมีความหนาแน่นของพลาสมาน้อยกว่าไมโครเวฟพลาสมา โดยทั่วไปอัตราการเกิด, ความเรียบของพื้นผิว และโครงสร้างของเพชรดีกว่าวิธี HFCVD และ MPCVD



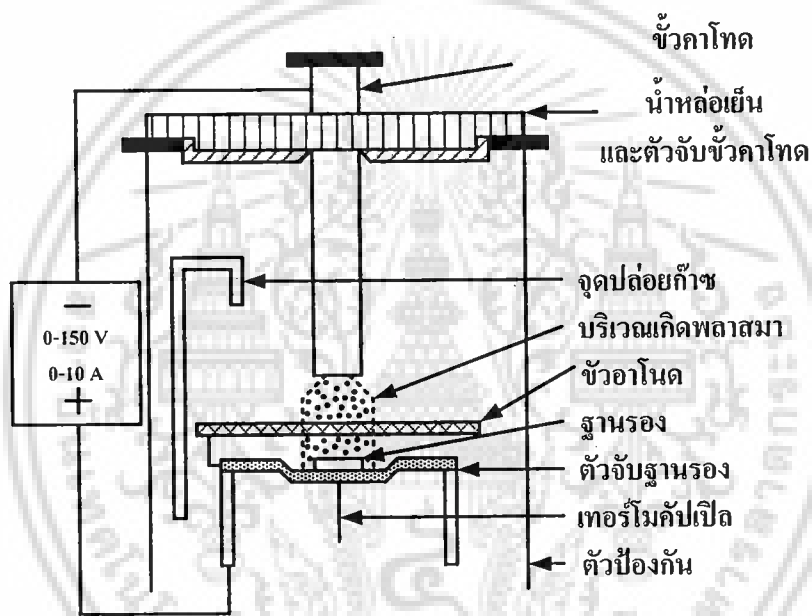
รูปที่ 1.8 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี RF thermal plasma CVD

1.2.2.3 กระบวนการ CVD แบบพลาสมากระแสตรง

วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีการพัฒนามากกว่าวิธีการไมโครเวฟ แต่ไม่เป็นที่แพร่หลาย อย่างไรก็ตามเป็นวิธีที่ให้อัตราการเกิดฟิล์มสูง ระบบเป็นลักษณะง่ายๆ โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 kV และความหนาแน่นกระแสสูง 4 A/cm^2 ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่ขนานกัน ภายใต้ความดัน 200 Torr การสังเคราะห์มีความหนาแน่น 10^8 /cm^2 อัตราการเกิดประมาณ $20\text{ }\mu\text{m/h}$ บนฐานรอง Si และ Al_2O_3 โดยบริเวณผิวไม่ได้ทำให้เกิดรอยขีดข่วนอุณหภูมิฐานรองบนอานอนมีอุณหภูมิสูงกว่า $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับวิธีการพลาสมากระแสตรงได้มีการออกแบบหลายโครงสร้าง โดยใช้แบบอาร์กกระแสตรงง่ายๆ ระหว่างแท่งอิเล็กโทรด 2 แท่ง ในการสังเคราะห์เพชร ได้อัตราการเกิด $200\text{ }\mu\text{m/h}$ ถึง $250\text{ }\mu\text{m/h}$ Sawabe และ Inuzuka [22] ได้ทำการจ่ายแรงดัน 150 Vdc และกระแส 10 mA/cm^2 ระหว่างหลอดความร้อนและฐานรองในระบบ HFCVD เรียกว่า Electron Assisted

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปขอประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chemical Vapor Deposition (EACVD) ทำให้เพิ่มความหนาแน่นและอัตราการเกิดเป็นผลจากการเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนชนกับพื้นผิวของฐานรอง ภายใต้เงื่อนไขของพลาสมากระแสตรง จะได้ผลในลักษณะเดียวกัน B. Singh และคณะ [23] ได้ใช้ Tubular Hollow Cathode มาแทนสไลด์ความร้อนในการสังเคราะห์เพชร โดยรวมวิธีความร้อนและพลาสมากระแสตรง CVD เข้าด้วยกันดังรูปที่ 1.9 แผ่นโลหะแคโทดจะให้กระแสสูงและมีการคายประจุที่แรงดันต่ำ โดยวางฐานรองบนอานโนดที่เย็นและแคโทดถูกทำให้ร้อนถึงจุดที่ทำให้เกิดการปล่อยไอออนขณะทำการสังเคราะห์ใช้กระแส 8 A และมีแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 75 V ถึง 115 V การคายประจุกบบริเวณภายในหลอดและอานโนด เทคนิคของ hollow cathode จะให้การคายประจุที่ที่แรงดันต่ำกรณีของพลาสมาแบบขั้วอิเล็กโทรดอัตราการเกิดประมาณ $1 \mu\text{m/h}$ ถึง $3 \mu\text{m/h}$

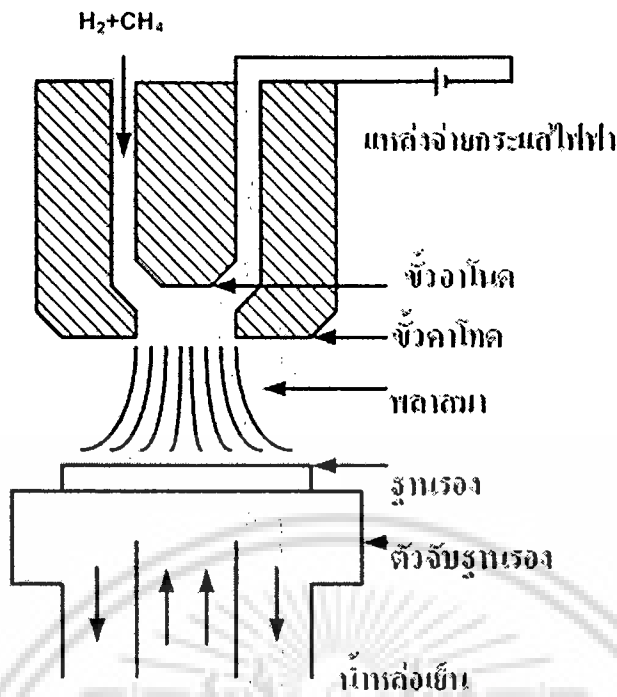


รูปที่ 1.9 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี Hollow Cathode CVD

ส่วน K. Kurihara และคณะ [24] ได้แนะนำวิธีการของ DC Plasma jet ดังรูปที่ 1.10 เรียกว่า DIA-JET ลักษณะคล้ายวิธีการ RF Plasma torch โดยพลาสมาความร้อนจะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิของก๊าซมีค่ามากกว่า 400°C ทำให้เกิดการแยกตัวของก๊าซอย่างสมบูรณ์ ที่เกิดการอาร์กกระหว่างอิเล็กโทรดตรงกระบอกคู่หนึ่ง ทำให้เกิดการกระจายออกอย่างรวดเร็วไปยังฐานรอง ผ่านหัวฉีดที่มีความยาวประมาณ 5 cm ถึง 10 cm ฐานรองห่างจากอานโนดประมาณ 1 cm ถึง 2 cm พลาสมากระแสตรงมีข้อได้เปรียบกว่า RF plasma torch โดยจะได้ฟิล์มที่มีคุณภาพและมีอัตราการเกิดสูง $80 \mu\text{m/h}$ ถึง $930 \mu\text{m/h}$ แต่มีปัญหาเกี่ยวกับความไม่สมบูรณ์ของฟิล์มได้พื้นที่กว้างประมาณ 10 mm และการควบคุมอุณหภูมิสูงซึ่งตรงข้ามกับวิธีของไมโครเวฟพลาสมาที่ให้ฟิล์มที่สมบูรณ์บนพื้นที่กว้างกว่า 100mm^2 มีความหนา $10 \mu\text{m}$ เท่านั้น ไม่น่าจะอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และห้ามเผยแพร่เนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.10 การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี DC Plasma jet CVD

1.2.3 ข้อสรุปของกระบวนการสร้าง

มีหลายเทคนิควิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชรแบบ CVD อย่างไรก็ตามก็ยังไม่มิตเทคโนโลยีการสร้างที่ดีที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้เพชรเป็นฐานในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน ก็ควรเลือกให้เหมาะสมตามความต้องการใช้งานในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นๆ สำหรับความหนาของฟิล์มการใช้เทคโนโลยีแบบพลาสมาก็น่าจะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดถึงแม้ว่าจะมีความยุ่งยากก็ตาม หากต้องการให้มีพื้นเพชรที่ใหญ่และมีความสม่ำเสมอมากที่สุดก็ต้องใช้วิธีการแบบลดอุณหภูมิลง ถึงแม้ว่าจะมีการเจือปนจากไส้ขดลวดก็ตาม ซึ่งอาจจะเกิดผลไม่ดีต่อคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ก็ตาม ถ้ามองในเรื่องทางการค้าและสร้างที่ความดันต่ำการใช้ไมโครเวฟพลาสมา (2.45 GHz) น่าจะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุด ถึงแม้ว่าอัตราการเกิดเพชรและพื้นที่การเกิดเพชรจะถูกจำกัด โดยตารางที่ 1.1 ได้ทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีการสังเคราะห์เพชร ซึ่งเป็นเงื่อนไขการใช้งานและการประมาณค่ามาจากงานวิจัยต่างๆ และตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบปัจจัยข้อกำหนดที่ใช้ในการเกิดเพชรซึ่งเป็นช่วงการใช้งานในการปลูกผลึกได้มาจากผลงานวิจัยเช่นกัน [15][25][28]

ตารางที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อดีและข้อเสียกับเทคโนโลยีการสังเคราะห์เพชร

Energy Source	Options	Practical Advantages and Disadvantages						
		Rate $\mu\text{m/hr}$	Dia., cm	Bonding	Uniform	Thick / Thin	Damage	Imp Sauces
Hot Filament	W, Rh, Pt, Ta	1-5	≥ 10	good to excellent	good	Thin to thick	High T	filament
Plasma	DC	< 1	≥ 10	poor	good	Thin to thick	High e Electrons and ions	electrode, walls
	RF	1	1-2	good	fair			
	microwave	1-5	2-5	good to excellent	fair			
	ECR	-	-	poor	-			
Plasma Torch	DC arc	60	1-2	excellent	fair	thick	High e Electrons and ions	electrode, walls
	RF	-	1-2	good	poor			
	microwave	-	1-2	good	poor			
Combustion	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$	20	1-2	excellent to good	fair	thick	High T	nozzle, ambient

ตารางที่ 1.4 ย่านการใช้งานต่างๆที่ได้ทำการสังเคราะห์เพชรระบบ CVD ของเทคโนโลยีต่างๆ

Energy Source	Options	Typical Ranges for Growth Parameters (CH_4/H_2 on Silicon Substrate)				
		Substrate Temp, $^{\circ}\text{C}$	Pressure, Torr	H_2 Flow rate slpm	C/H	Inert Gas, slpm
Hot Filament	W, Rh, Pt, Ta	< 1000	10-100	0.1-1	$< 1\%$	-
Plasma	DC	< 1000	10-50	0.1-1	$< 1\%$	-
	RF	< 1000	1-10			
	microwave	< 1000	10-100			
	ECR	400-600	< 10			
Plasma Torch	DC arc	~ 1000	500-760	1-5	5-15%	> 10
	RF					
	microwave					
Combustion	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$	~ 1300	760	O_2 5 slpm	C/O 97%	1-2

1.2.4 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

เพชรมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง [25] เช่น คุณสมบัติทางแสง, คุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งคุณสมบัติแต่ละอย่างมีรายละเอียดดังนี้

1.2.4.1 คุณสมบัติทางแสงของเพชร

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่จะพิจารณาถึงดัชนีหักเห และการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นที่กำหนด ตารางแสดงการเปรียบเทียบดัชนีหักเหที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้องแสดงไว้ในภาคผนวก ค. การเริ่มต้นการแบ่งชนิดของเพชรนั้นใช้คุณสมบัติทางแสงเป็นตัวแบ่ง โดยแบ่งเพชรออกเป็นสองชนิด คือ type-I และ type-II หลังจากนั้นก็มีการเพิ่มอักษรต่อท้าย a และ b เพชร type-I ประกอบด้วยไนโตรเจนจำนวนมาก ถ้าไนโตรเจนมารวมอยู่ในโครงสร้างเพชรในธรรมชาติเรียกเพชรชนิดนี้ว่า type-Ia ถ้าไนโตรเจนกระจายออกดังเช่นเพชรที่ถูกล้างเคราะห์ขึ้นเรียกว่า type-Ib เพชรที่เป็น type-II จะไม่มีไนโตรเจนอยู่ โดย type-IIa มีคุณสมบัติเป็นฉนวนและไม่พบโบรอน ในขณะที่ type-IIb จะมีจำนวนโบรอนมากกว่าไนโตรเจน และเป็นเพชรชนิดที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

1.2.4.2 คุณสมบัติทางกลของเพชร

โครงสร้างของเพชรที่ประกอบด้วยพันธะทางเคมี มีความแข็งแรงเป็นผลให้เพชรมีคุณสมบัติทางกลที่พิเศษหลายอย่าง โดยเพชรจะมีความแข็งและความนำความร้อนมากกว่าวัสดุชนิดอื่น ในขณะเดียวกันเพชรก็มีความยืดหยุ่นและ Bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น อีกทั้งยังมีสัมประสิทธิ์ขยายตัวความร้อนที่ต่ำมาก คือมีค่า $0.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ สำหรับรายละเอียดของคุณสมบัติต่างๆ มีดังนี้

1. ความแข็งวัสดุทั้งหมด ในธรรมชาติเพชรเป็นวัสดุที่แข็งที่สุด โดยความแข็งนี้จะพิจารณาแรงกดลงบนพื้นผิววัสดุต่อพื้นที่ แสดงการเปรียบเทียบความแข็งของวัสดุไว้ในภาคผนวก ค.
2. ความนำความร้อนเพชรมีความนำความร้อนมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น โดยมีค่า $20 \text{ W/cm}^{\circ}\text{C}$ แสดงการเปรียบเทียบในภาคผนวก ค. การลดลงของความนำความร้อนเกิดขึ้นได้ เมื่อมีไนโตรเจนจำนวนมากเกิดขึ้นในเพชร อย่างเช่นในเพชร type-Ia ทำให้ความนำความร้อนลดลง 30 % ถึง 50 % จากค่าสูงสุด สำหรับเพชรที่เป็นผลึกรวมที่ได้จากการสังเคราะห์ที่มีคุณภาพดี ความนำความร้อนของฟิล์มมีค่าเป็น 55 % ของผลึกเดี่ยว ในระนาบของการปลูกผลึก ความนำความร้อนของผลึกมีค่ามากกว่า 25 % แต่ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับขนาดผลึก
3. Young's Modulus บริเวณทั้งหมดที่เกิดการผิดรูปไป เนื่องจากมีแรงมากกระทำ และสามารถกลับสู่ภาวะเริ่มต้นได้ บริเวณนี้เรียกว่า บริเวณยืดหยุ่น (elastic region) จากกฎของฮุก (Hook) กล่าวว่ายัตราส่วนของความเค้น (Stress) ต่อความเครียดจะมีค่าประมาณคงที่ที่บริเวณดังกล่าว โดยอัตราส่วนของความเค้นที่เกิดจากการดึงต่อความเครียดในเชิงเส้นถูกเรียกว่า Young's Modulus แสดงการเปรียบเทียบไว้ในภาคผนวก ค.

1.2.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร

พิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชรในลักษณะของสารกึ่งตัวนำดังตารางที่ 3.3 เพชรในทางธรรมชาติมีค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall อยู่ในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^5 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าความคล่องตัวโฮล ของเพชรในทางธรรมชาติมีค่า $1800 \text{ cm}^2/\text{volt-sec}$ และการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนมีค่า $2000 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$ สำหรับค่าความคล่องตัวของโฮล ที่ได้จากการสังเคราะห์เพชรที่อุณหภูมิ 900°C วัดได้ $850 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$ สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีใช้ในปัจจุบันมีเพียง เจอร์มาเนียม (Germanium) และอินเดียม แอนติโมนิไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นมีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนวัสดุอื่นจะมีค่าความคล่องตัวของโฮลต่ำ และ dielectric strength ต่ำ ความแรงสนามไฟฟ้ามีค่า 10^7 V/cm ความเร็วครีฟท์ของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮล จะเริ่มมีค่าอ้อมตัวที่ค่าความเร็วครีฟท์สูงสุด $2.7 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ และ 10^7 cm/sec สภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติมีค่าสูงถึง $10^{16} \Omega\text{-cm}$

ตารางที่ 1.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่น

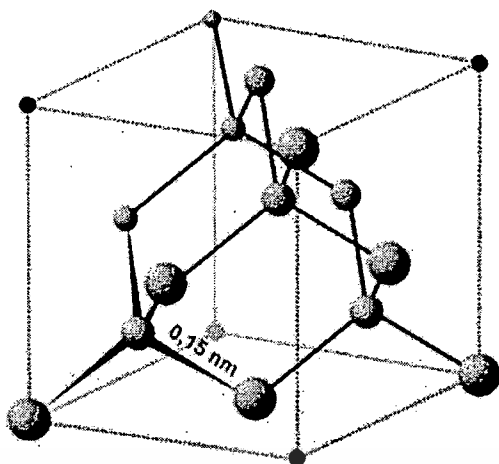
คุณสมบัติ	เพชร	ซิลิคอน	แกลเลียมอาร์เซไนด์	เยอรมันเนียม
Thermal conductivity (W/cm•K)	20	1.5	0.455	0.28
Electron (n) mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	2,000	1,500	8,800	3,900
Hole mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1,800	600	400	1,900
Electron Saturated velocity (10^7 cm/s)	2.7×10^7	1×10^7	1.2×10^7	5×10^6
Hold Saturated Velocity (10^7 cm/s)	1.05×10^7	9×10^7	1×10^7	4×10^6
Density of states effective mass Electron Hold	1.2 0.57	1.1 0.8	0.068 0.5	0.55 0.37
Effective density of states Conduction band (cm^{-3}) Valance band (cm^{-3})	1×10^{19} 3×10^{19}	2.8×10^{19} 1×10^{19}	4.7×10^{17} 7×10^{18}	1.04×10^{19} 3×10^{18}
Breakdown field (V/m)	10^7	5×10^6	3×10^5	10^4
Resistivity(Ω)	10^{16}	10^3	10^8	10
Dielectric constant	5.7	11	12.5	15.8
Band gap (eV)	5.45	1.1	1.42	0.72

1.2.5 หลักการและการพิจารณาเพชร

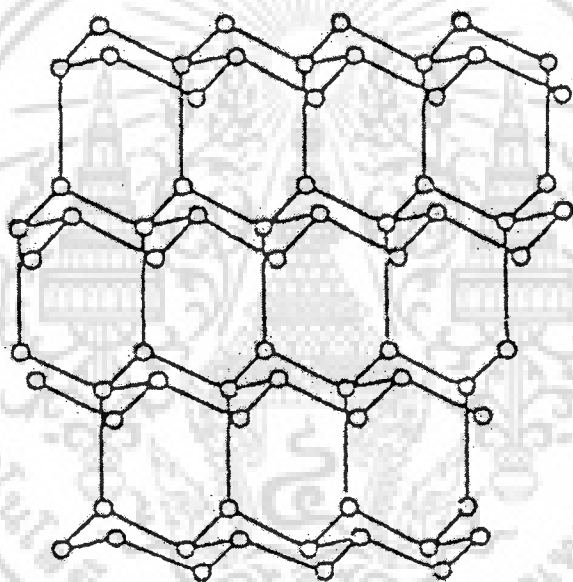
1.2.5.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร

ลักษณะโครงสร้างของผลึกเพชรซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างผลึกเป็นแบบ face-centered diamond cubic ในหนึ่งเซลล์ (unit cell) ดังรูปที่ 1.11 จะประกอบด้วย 8 อะตอมบริเวณมุมของเซลล์ และ 6 อะตอมที่เหลื่ออยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งในสี่ที่ว่างของลูกบาศก์ วัดทแยงจากอะตอมที่อยู่บริเวณมุมของเซลล์ อะตอมคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับอะตอมคาร์บอนได้อีก 4 อะตอมด้วยพันธะโคเวเลนต์แบบ sp^3 [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.11 ตำแหน่งอะตอมใน Cubic Cell

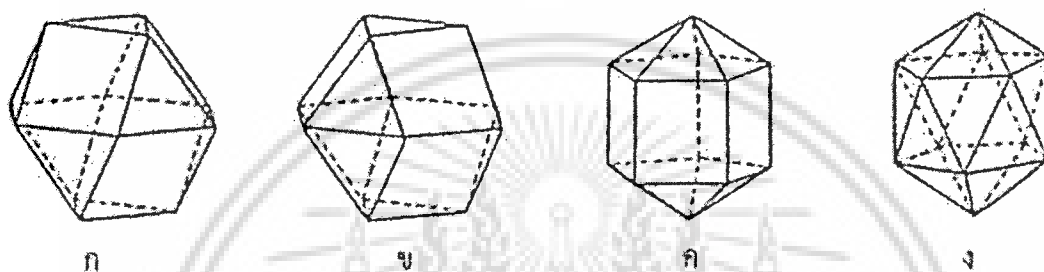


รูปที่ 1.12 โครงสร้างของเพชร

สำหรับพันธะการยึดเหนี่ยวของผลึกโครงสร้างผลึก (111) จะมีอะตอมของคาร์บอนจำนวน 6 อะตอม จับกันเป็นลักษณะวงแหวนโดยอะตอมแต่ละอะตอมของระนาบข้างเคียงวางในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกัน เมื่อนำชั้นของทรงกลมซ้อนกัน ทำให้เห็นลักษณะเลตทิซซ้อนเป็นชั้นๆ ของวงแหวนอะตอมคาร์บอนทั้งหมดที่ใช้พันธะร่วมกัน รูปที่ 1.12 การฟอร์มของ cubic ใช้พันธะร่วมกันของแต่ละชั้นนั้น จะเชื่อมต่อกันด้วย staggered bond [27] ลักษณะการเรียงตัวจะเป็นแบบ ABCABCABC.....ซ้ำๆ กัน โครงสร้างผลึกแบบนี้มี ค่าคงที่ของผลึก 3.56 Å และความยาวพันธะมีค่า 1.54 Å ในการวิเคราะห์เพชรด้วย Raman spectroscopy กรณีเพชรที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะมีตำแหน่งยอดสัญญาณเกิดขึ้นที่ 1332 cm^{-1} แต่กราฟที่มีตำแหน่งยอดสัญญาณเกิดที่ 1484 cm^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปร่างของผลึกเพชรสามารถเกิดขึ้น ได้หลายรูปแบบซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของก๊าซ เฟส ในขณะที่ฟอร์มผลึกเพชรรูปร่างต่างๆ ของผลึกสามารถเกิดขึ้น ดังรูปที่ 1.13 โดยรูปที่ 1.13 (ก) จะเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดของผลึกเดี่ยว ที่สามารถเกิดขึ้น ได้ในระนาบ 111 และระนาบ 100 เรียกว่า cube-octahedron เกิดขึ้น 2 ส่วนแยกจากกันเรียกว่า twined cube-octahedron ดังรูปที่ 1.13 (ข) ถ้ามีคู่เหมือนของ cube-octahedron เกิดขึ้นแยกจากกัน 5 ส่วนสมมาตรกันเรียกว่า Decahedral-Wulff-polyhedron และถ้ามีค่าเหมือนเกิดขึ้นแยกจากกันใน 20 ส่วนสมมาตรกันหรือเกิดจากผลึกรูปเดี่ยว 20 หน่วยนั่นเองเรียกว่า Icosahedrons'



รูปที่ 1.13 โคอะแกรมของอนุภาคเพชรแบบต่างๆ

ก. แบบ Cube-Octahedron

ข. แบบ Twined Cube-Octahedron

ค. แบบ Decahedral wulff-Polyhedron

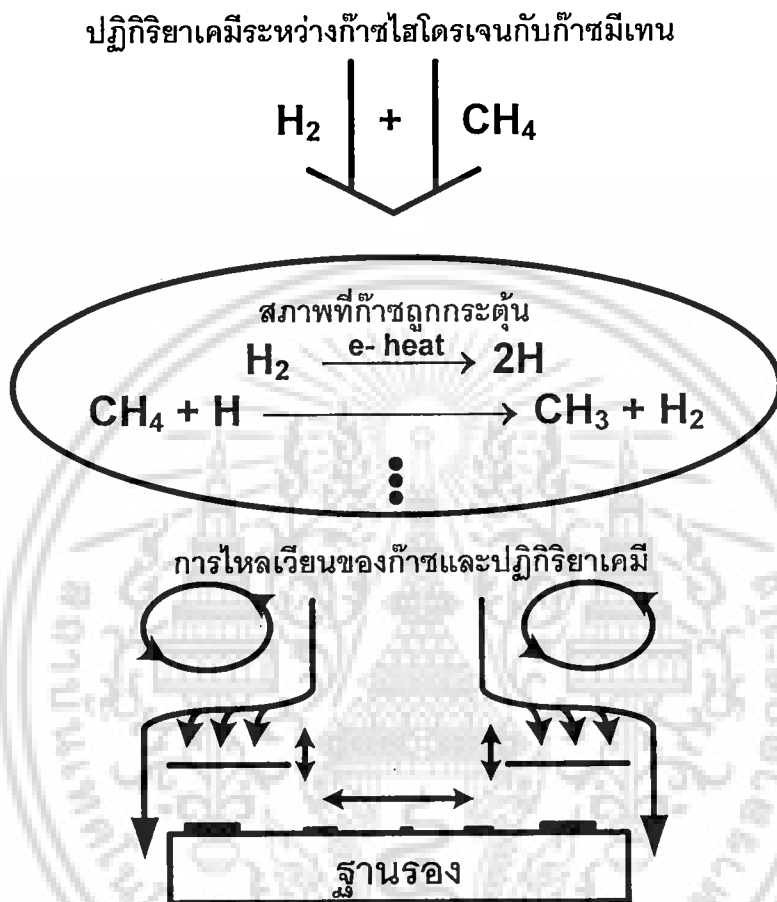
ง. แบบ Icosahedrons'

1.2.5.2 กลไกทางเคมีการสังเคราะห์เพชรด้วยกระบวนการ CVD

การปลูกผลึกเพชรจากสถานะ เริ่มจากการนิวคลิเอชันให้ผลึกก่อตัว จากนั้นการพอกพูนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดของผลึกมีขนาดใหญ่ สำหรับกลไกการปลูกผลึกเพชรจากสถานะเฟสก๊าซ นิยมการใช้วิธีการ CVD ซึ่งจะทำให้การสังเคราะห์เพชรประสบผลสำเร็จได้ สำหรับกลไกของกระบวนการ CVD จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของขบวนการและวัสดุ ที่ให้สถานะแวดล้อมของการปลูกผลึกด้วยวิธีการนี้ มีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา [28] ดังรูปที่ 1.14 ได้ใช้ก๊าซ CH_4 และก๊าซ H_2 เป็นตัวทำปฏิกิริยา เมื่อให้พลังงานหรืออุณหภูมิสูงในพื้นที่การกระตุ้นก๊าซด้วยวิธีต่างๆ เช่น พลาสมาลดความร้อน หรือ Combustion Flame ทำให้ก๊าซเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นจำนวนมากภายในเวลา 10^{-9} s สามารถเกิดการชนและถ่ายเทพลังงานจนทำให้กับก๊าซอื่นได้ภายในเวลา 10^{-4} s ถึง 10 s การเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ จะส่งผ่านเข้าไปยังบริเวณปฏิกิริยาที่ฐานรองด้วยแรงของการไหล การแพร่ และการพา ในบริเวณที่ใกล้กับฐานรอง การแพร่จะแพร่จนเข้าสู่บริเวณที่มีการไหลหยุดนิ่ง เรียกว่า boundary layer บนพื้นผิวฐานรองจะมีขบวนการหลายอย่างเกิดขึ้นได้ เช่น การดูดกลืน การคาย การแพร่บริเวณผิวและเนื้อสาร ซึ่งปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้ จะมีประโยชน์ต่อการปลูกเพชรให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสำคัญที่สัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับข้อมูล ขบวนการพื้นผิว เช่น ฟังก์ชันเชิงซ้อนของอุณหภูมิพื้นผิว โครงสร้างบริเวณพื้นผิวและองค์ประกอบของพื้นผิวการวิเคราะห์ การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ต้องเข้าใจหลักการของสารคาร์บอนในทางเคมี และการพอกพูนที่เสถียร



รูปที่ 1.14 ไดอะแกรมกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการ CVD ของเพชร

การปลูกผลึกต้องคำนึงถึงศักยภาพในทางเคมีของการควบแน่นที่เป็นปัจจัยหลักในการนิวเคลียชัน การปลูกผลึก และความสมบูรณ์ผลึก จากหลักการข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แต่ต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการพอกพูนของเพชรซึ่งเพสนี้จะตรงกันข้ามกับเพสของกราฟไฟท์

การสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD มีคุณลักษณะที่สำคัญแตกต่างขบวนการปลูกผลึกวิธีอื่นหลายประการสรุปดังนี้

1. อะตอมคาร์บอนสามารถมีรูปแบบพันธะทางเคมีที่แตกต่างกันหลายชนิด โดยมีเวเลนซ์อิเล็กตรอน sp , sp^2 และ sp^3 รวมกันอยู่ทำให้คุณลักษณะที่ได้ตรงกันข้ามกับเนื้อวัสดุคาร์บอนและพฤติกรรมทางเคมี ที่มีพันธะเป็น sp^3 ดังนั้นการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้เพชรเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพชรมีคาร์บอนเป็นพันธะ Sp^3 แต่ถ้าอุณหภูมิและความดันมีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับพันธะ Sp^2 ทำให้คาร์บอนเป็นกราฟไฟท์ได้

2. พื้นผิวและชนิดของก๊าซในการปลูกผลึกเป็นโมเลกุลไม่ใช่อะตอมทั้งนี้เป็นเพราะพันธะคาร์บอนมีความแข็งแรง

3. ปฏิกิริยา CVD ของเพชรเกิดขึ้นที่อุณหภูมิฐานรองต่ำให้คุณภาพของผลึกที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับ CVD ชนิดอื่น ดังนั้นทำให้การแอนนิลเพื่อจำกัดจุดบกพร่องที่เกิดจากการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD จึงมีความจำเป็นน้อยกว่ากระบวนการปลูกผลึกที่อุณหภูมิสูง

สำหรับกระบวนการปลูกผลึกเพชร สามารถแบ่งพิจารณาได้ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก นิวเคลียสของกลไกฐานรองที่เป็นเนื้อสารเพชรและฐานรองที่เป็นเนื้อสารอื่น ขั้นตอนที่สอง การปลูกผลึกจะขึ้นอยู่กับลักษณะของก๊าซในระบบและกลไกบนพื้นผิวที่ทำให้เกิดแลตทิซของผลึก

1.2.5.3 การเกิดนิวเคลียส

การควบคุมการเกิดนิวเคลียส (การเกิดผลึก) เพื่อให้ได้ขนาดผลึก, ระบายผลึกและคุณสมบัติที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานเพชร ต้องคำนึงถึงความเรียบของฟิล์ม ขนาดของผลึกที่เท่ากันและจุดบกพร่องของผลึกมีน้อย สำหรับการนิวเคลียสเพชรด้วยวิธี CVD เพื่อให้ได้เพชรที่มีคุณภาพสูง ต้องกำหนดแนวทางพิจารณาการควบคุมการนิวเคลียสดังนี้

1. พลังงานจลน์เทอร์โมไดนามิกของนิวเคลียส และการปลูกผลึกจะสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของการทดลอง

2. ลักษณะพื้นผิวฐานรองที่มีการนิวเคลียส สามารถเปลี่ยนแปลงการนิวเคลียสได้จากสภาวะแวดล้อมของ CVD

3. การปลูกผลึกเริ่มต้นบนฐานรองที่มีการเตรียมและไม่ได้เตรียม จะได้นิวเคลียสในระดับจุลภาค

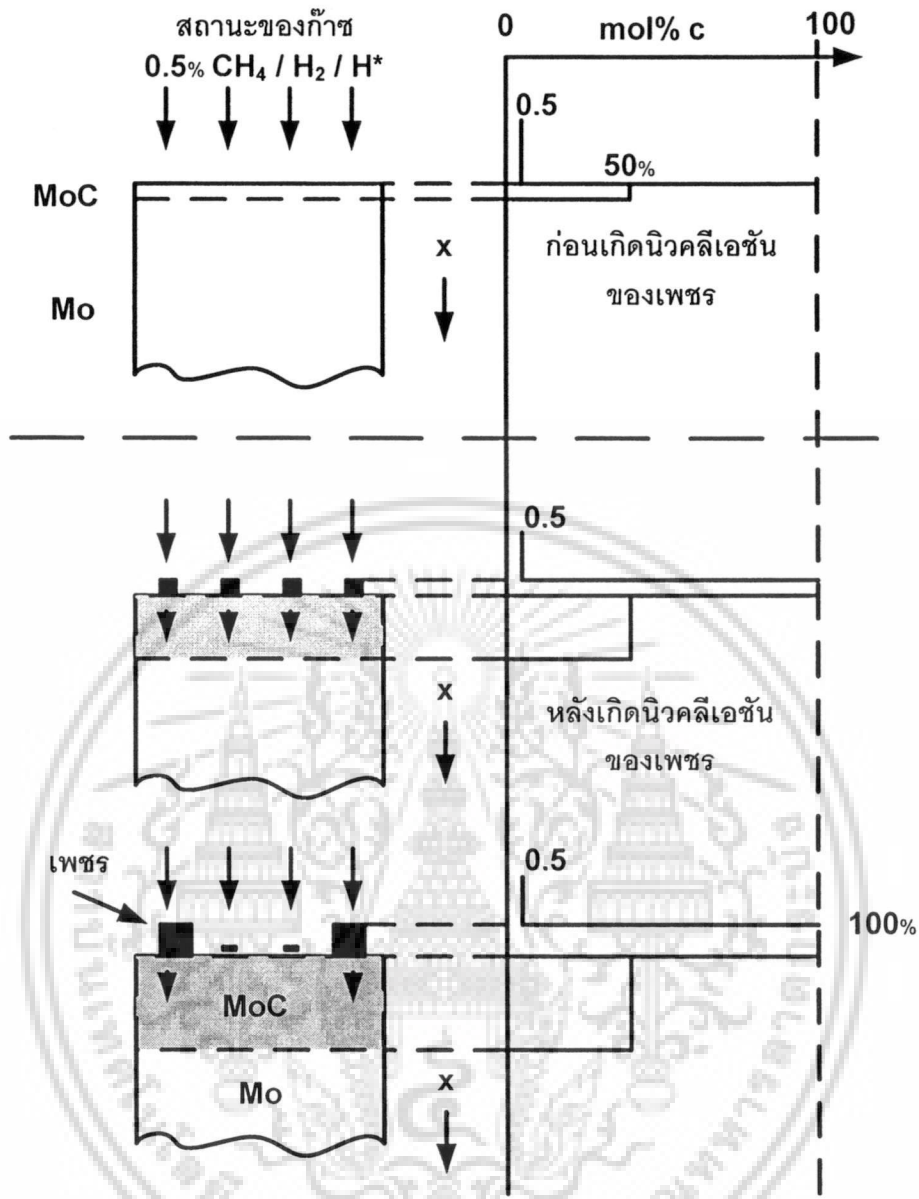
4. ผลของนิวเคลียสบนฐานที่เป็นเพชรธรรมชาติ จะได้เป็นเพชรเป็นไฮโดรเจนอิพิแทกเซียล การนิวเคลียสเพชรจากกระบวนการ CVD ได้ทำให้เงื่อนไขการก่อตัวของอนุภาคพลังงานอิสระของระบบ เกิดการกำจัดฟอรัมตัวของกราฟไฟท์นิวเคลียส และทำให้นิวเคลียสของเพชรที่ความเสถียรมาก ซึ่งเป็นการกำจัดคาร์บอนที่มีพันธะ Sp^2 โดยสภาวะแวดล้อมของการปลูกผลึกเพชรต้องทำให้มีโมเลกุลของไฮโดรเจนจำนวนมากอย่างอิมพั หรือก๊าซผสมที่มีอัตราส่วนของ C/H ต่ำ ซึ่งจะได้มาจากการใช้เทคนิคกระตุ้นเฟสก๊าซ เช่น การใช้ลวดความร้อนโมเลกุลไฮโดรเจนทำหน้าที่ลดความดันบางส่วนของเฟสก๊าซ ที่ทำให้เกิดการนิวเคลียสของกราฟไฟท์ สำหรับการฟอรัมตัวของผลึกเพชรที่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นที่ผิวหน้า จะสามารถทำให้เกิดการนิวเคลียสของกราฟไฟท์ขึ้น โดยสภาวะเช่นนี้ทำให้อัตราการปลูกผลึกเพชรและคุณภาพผลึกเพชรลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชนิดของฐานรองและการเตรียมฐานรองจะมีผลอย่างมากต่อการนิวคลีเอชัน และการก่อตัวเริ่มต้นของผลึก ซึ่งชนิดของฐานรองที่ใช้ในการปลูกผลึกเพชรด้วยวิธี CVD จะใช้ฐานรองที่เป็นเพชรหรือฐานรองชนิดอื่นก็ได้ การนิวคลีเอชันฐานรองที่ไม่ใช่เพชร เช่น Si, Ni, Mo, W Ta, Hf และ Nb เป็นต้น ต้องมีขั้นตอนการเตรียมฐานรองโดยการขัดฐานรองด้วยผงเพชร SiC Cubic boron nitride (C-BN) หรือเตรียมโดยวิธีการฟอร์มชั้นคาร์ไบด์บนฐานรอง ซึ่งวิธีการนี้ทำให้เกิดความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันสูง และอัตราการเกิดเริ่มต้นของผลึกเร็วและใช้เวลาน้อย ในกระบวนการนิวคลีเอชันของผลึกเพชรจะประกอบด้วย ขั้นตอน 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเริ่มขึ้นเมื่ออะตอมคาร์บอนของเฟสก๊าซตกกระทบบนฐานรอง และเกิดการแพร่เข้าไปในเนื้อฐานรอง จากนั้นอัตราการแพร่ของคาร์บอนจะค่อยๆลดลง ทำให้ได้การฟอร์มตัวของชั้นคาร์ไบด์บนฐานรอง ดังรูปที่ 1.15 จนกระทั่งการแพร่ของคาร์บอนไม่สามารถดำเนินกระบวนการต่อไปได้ และในขณะเดียวกัน เมื่อปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนที่บริเวณผิวฐานรองมีมากเพียงพอ จะเป็นเงื่อนไขสำคัญสำหรับกระบวนการก่อตัวของชั้นผลึกเพชร ซึ่งขั้นตอนของการฟอร์มชั้นคาร์ไบด์จะใช้เวลา 15 min ถึง 20 min สำหรับในการปลูกผลึกเพชรบนฐานรองซิลิคอนในช่วงเวลา 15 min อะตอมของไฮโดรเจนทำการกัดออกไซด์ และคาร์บอนที่มีสิ่งสกปรกเจือปนออก จากนั้นจึงเกิดชั้น SiC เคลือบที่ผิวฐานรองซิลิคอนโดยความหนาของชั้น SiC จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของก๊าซ C/H และการใช้วัสดุอื่นเป็นฐานรองก็จะได้ชั้นคาร์ไบด์ของวัสดุอื่นเช่น TiC, HfC, NbC, Mo₂C และ WC เป็นต้น

ในกระบวนการขั้นตอนที่ 2 สำหรับการเกิดเพชร สามารถเกิดขึ้นได้หลายแนวทาง เช่น การฟอร์มของนิวเคลียสบนพื้นผิวที่มีคาร์บอนอิ่มตัว การนิวคลีเอชันในเฟสก๊าซ การปลูกผลึกบนฐานที่เป็นเพชรหรือฐานรองที่ขัดด้วยคาร์บอนที่มีพันธะ SP³ การนิวคลีเอชันของเพชรและกราฟไฟท์ ในเฟสก๊าซ เกิดจากการฟอร์มนิวเคลียสในขณะที่คาร์บอนมีความอิ่มตัว ซึ่งเงื่อนไขที่ทำให้เกิดอัตราการนิวคลีเอชันสูง กำหนดได้ที่ความเข้มข้นของคาร์บอนที่มีปริมาณสูง เมื่ออุณหภูมิฐานรองพอเหมาะจะทำให้ได้ผลึกเพชรที่สมบูรณ์แต่ถ้าอุณหภูมิของฐานรองมีค่าต่ำ จะทำให้เกิดจุดบกพร่องของผลึกเพชรในระนาบและเกิดเป็นส่วนของกราฟไฟท์หรือมีรูปร่างไม่แน่นอน (amorphous) ขึ้น ซึ่งเป็นการก่อตัวของคาร์บอนที่มีพันธะ SP² ส่วนนี้จะทำให้เกิดผลกระทบต่อ การปลูกผลึกเพชรบนฐานรอง ทำให้ได้ชั้นผลึกเพชร เป็น โฮโมอิพิแทกเซียลที่ไม่มีคุณภาพ การนิวคลีเอชันของเพชรบนฐานรองที่มีการขัดผิว ฐานรองที่ใช้ในการปลูกผลึกเพชรที่ไม่ใช่ฐานรองเพชร การเตรียมฐานรองด้วยการ ชุบฐานรองลงในสารละลายของผงเพชรหรือการสเปรย์ ของสารละลายผงเพชรลงบนฐานรองอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ได้ความหนาแน่นของนิวคลีเอชันมาก และทำการเตรียมฐานรองโดยการขัดด้วยผงเพชรเพื่อให้เกิดการนิวคลีเอชัน ซึ่งความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันนี้มีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการขัดผิว การใช้เวลาในการขัดผิวน้อยทำให้รูปร่างลักษณะของผลึกมีขนาดเล็กลง

รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.15 ขั้นตอนการเกิดนิวคลีเอชัน

และถ้าการขัดผิวฐานรองใช้เวลานานทำให้เกิดผลึกจำนวนมากขึ้น แสดงว่ารอยขีด ข่วนบนฐานรองซึ่งเกิดจากการขัดด้วยผงเพชร ทำให้ได้แลตทิซระหว่างฐานรองกับนิวเคลียสเข้ากันได้ ทำให้เกิดเสถียรภาพ ที่มีสภาวะแวดล้อมเหมาะสมของกระบวนการนิวคลีเอชันของผลึกเพชรได้ สำหรับการนิวคลีเอชันของผลึกบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรและไม่มีการขัดสามารถเกิดนิวคลีเอชันได้ตามแนวการกัดแบบแอนไอโซโทปิกบนฐานรองหรือที่บริเวณรอยต่อและตำแหน่งต่างๆ ที่ฐานรองหรือฐานรองที่ไม่ขัด

สำหรับลักษณะพื้นผิวของผลึกเพชรที่ได้จากการปลูกผลึกเป็นแบบโพลีคริสตัล พื้นผิวส่วนใหญ่ของผลึกเพชร มีระนาบ (111) และ (100) เช่นเดียวกับผลึกเพชรในธรรมชาติ โดยที่พื้นผิวที่ปลายแลตทิซ จะมีพันธะ C-H กับอะตอมไฮโดรเจนแบบ SP³ และบนพื้นผิวสามารถพบ

นอกจากนี้ยังมี... การค้า
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

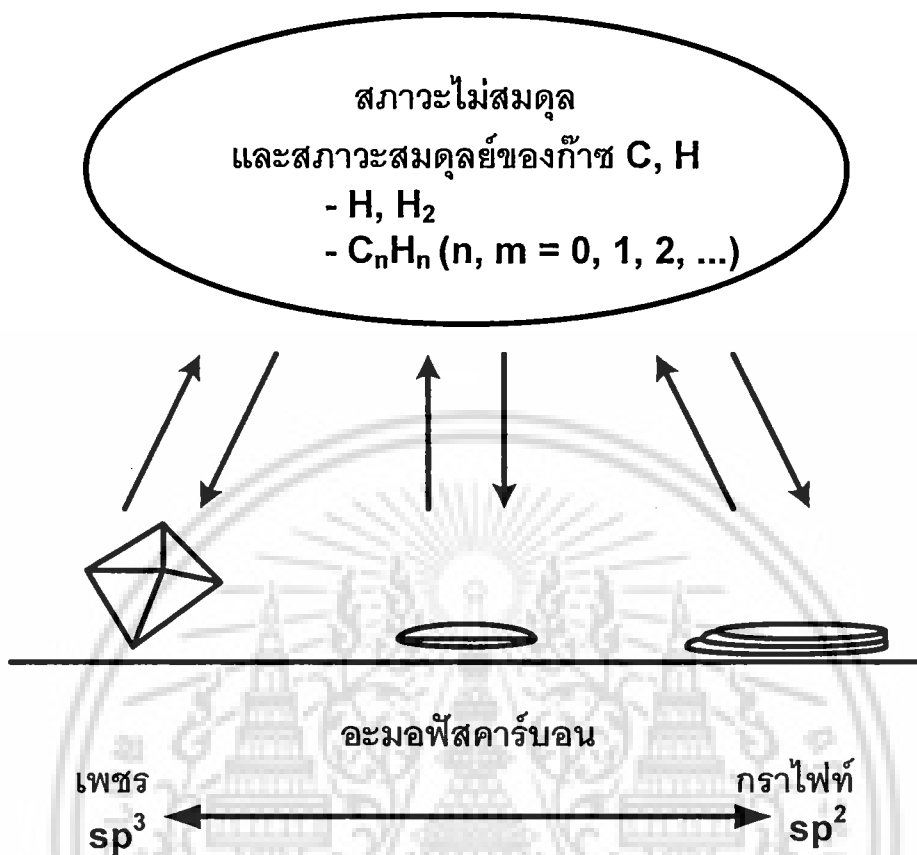
อะตอมอื่น เช่น O, N, S, F และ Cl แต่อะตอมเหล่านี้มีปริมาณน้อยที่ปกคลุมพื้นผิว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณพื้นผิวมีความหนาแน่นอะตอมสูงประมาณ $1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะมีอะตอมอื่นปกคลุมมากกว่าอะตอมของไฮโดรเจน

1.2.5.4 สภาพแวดล้อมก๊าซการปลูกเพชร

ลักษณะก๊าซที่มีสถานะที่ถูกกระตุ้นด้วยวิธีการ CVD ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเฟสก๊าซ ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดภายใต้สถานะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากสถานะแวดล้อม CVD ของการปลูกผลึกเพชรเกี่ยวข้องกับกรไหล และอัตราการส่งผ่านของอนุโมลก๊าซ ทำให้สถานะแวดล้อมของก๊าซไม่เข้าสู่สถานะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิก ถึงแม้เป็นบริเวณที่มีการกระตุ้น หรือใกล้บริเวณพื้นผิวที่ปลูกผลึก จากการสังเคราะห์การปลูกผลึกเพชรด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนส่วนผสมของก๊าซ CH_4 0.5% ในก๊าซ H_2 ที่สถานะสมดุลความดัน 20 Torr กำหนดให้อุณหภูมิที่ฐานรองและอุณหภูมิลดความร้อนอยู่ในช่วง 900°C และ 2200°C ตามลำดับ ทำให้ได้ความเข้มข้นของ ไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นจำนวนมากขณะที่เกิดการปลูกผลึกได้แก่ CH_4 , C_2H_2 , CH_3 และ C_2H_4 โดยที่ความหนาแน่นของ CH , CH_2 , C_2 และ C_3 มีค่าน้อยมาก ซึ่งอัตราการปลูกผลึกจะแปรผันกับความอึดตัวของคาร์บอน การกระจายคาร์บอนแบบเฟสก๊าซ และการเพิ่มขึ้นของความดันในสถานะแวดล้อมสำหรับในความสัมพันธ์ของสถานะแวดล้อม CVD ของการปลูกผลึกเพชร ต้องทำการควบคุมการเคลื่อนไหวของอนุโมลก๊าซที่เกิดใหม่ อัตราการเกิดปฏิกิริยา การเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยา อนุโมลก๊าซที่พบในเฟสก๊าซและใกล้บริเวณพื้นผิว เพื่อให้ได้ช่วงชีวิตทางปฏิกิริยาเคมีมีเวลานานมากในการเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิว เงื่อนไขของการปลูกผลึกเพชรจะตรงข้ามกับการเกิดกราไฟท์ และรูปแบบของคาร์บอนอื่นๆ กับอะตอมของไฮโดรเจนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงภายใน หรือการจำกัดลักษณะของพันธะพื้นผิวที่แตกต่างกันออก sp , sp^2 และ sp^3 คุณภาพของเพชรพิจารณาจากการเข้าสู่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกระหว่างการเคลือบและกระบวนการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 1.16 ซึ่งเป็นแบบจำลองมหภาค ที่พิจารณาบนพื้นฐานของการพอกพูนจากก๊าซผสมที่มีคาร์บอนอึดตัวและอะตอมไฮโดรเจนที่อุณหภูมิฐานรองทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลง การปลูกผลึก สภาพแวดล้อมของการปลูกผลึกจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการพอกพูนคาร์บอน และกระบวนการกัดคาร์บอนสถานะของแข็งในแต่ละรูปแบบ กล่าวคือมีการอึดตัวของคาร์บอนทำให้องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนได้หลายแบบเช่น กราไฟท์, อะมอร์ฟัส, คาร์บอน และผลึกเพชร โดยที่อะตอมไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นปฏิกิริยาในสถานะแวดล้อมเพื่อลดการฟอร์มตัวของคาร์บอนที่ไม่ใช่ผลึกเพชรด้วยวิธีการสกัดคาร์บอนที่อยู่ในสถานะของแข็ง หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวที่มีพันธะ sp^2 ไปเป็น sp^3 นั่นเอง จากแบบจำลองมหภาคนี้ถ้าทำการเพิ่มอุณหภูมิก๊าซที่ช่วยในกระบวนการกัดให้เหมาะสม อย่างเช่น OH หรือ Halogen จะทำให้ได้ผลึกเพชรที่มีคุณภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะของคาร์บอน



รูปที่ 1.16 คุณลักษณะแบบจำลองของ CVD การพอกพูนเพชรและการพอกพูนคาร์บอนในรูปแบบของแข็งหลายชนิด

1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีรังสีเอกซ์มีประโยชน์และบทบาทสำคัญมากขึ้น ทางสังคม เศรษฐกิจ และความมั่นคง การใช้งานรังสีเอกซ์ได้มีการพัฒนาอย่างจริงจังและรวดเร็วในต่างประเทศ ในลักษณะระบบสร้างภาพจากรังสีเอกซ์ ทำให้ระบบได้มีการประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวางทางด้านต่างๆ อย่างเช่น ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม และด้านความมั่นคง เป็นต้น ระบบสร้างภาพจากรังสีเอกซ์ ที่มีการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นภายในประเทศอย่างล่าช้า ทำให้ต้องนำเข้าเครื่องเหล่านี้จากต่างประเทศ ทั้งนี้เนื่องจากการพัฒนาทางด้านอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ภายในประเทศ ได้ดำเนินการน้อยมาก อีกทั้งไม่มีเทคโนโลยีที่เหมาะสมช่วยในการสนับสนุนในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์

1.4 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. พัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ชนิดเพชร
2. ศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์
3. กระบวนการสร้างอุปกรณ์มาตรฐานเชิงพาณิชย์
4. ข้อมูลพื้นฐานการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์สำหรับ X-Ray CT

1.5 สมมุติฐานของการศึกษา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสังเคราะห์เพชรได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างสูง สามารถสังเคราะห์เพชรชนิดผลึกหลายรูปให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี เหมาะสมที่ใช้เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ พัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เช่นเดียวกับซิลิคอน ซึ่งมีคุณสมบัติหลายประการที่ได้รับความนิยมเป็นพิเศษจากนักวิจัย เช่น วัสดุเพชรมีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามกว้างมากกว่า 5.5 eV วัสดุมีความต้านทานต่อรังสีพลังงานสูง เมื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้มีกระแสรั่วต่ำ สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ มีความคงทนต่อสารเคมี การตอบสนองช่วงความยาวคลื่นแสงช่วงตามองเห็นต่ำมาก และมีสภาพนำความร้อนที่สูงมาก ทำให้การกระจายความร้อนภายในเนื้อสารเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นในปัจจุบันได้นักวิจัยหลายกลุ่มในต่างประเทศ เห็นความเหมาะสมของวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเพชรในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ [1-5] และจากการที่เทคโนโลยีการสังเคราะห์เพชรให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่ และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี มีแนวโน้มชัดเจนที่จะมีการพัฒนาเพชรเป็นอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ทางอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ เพื่อให้ประเทศไทยมีศักยภาพเพียงพอในการพัฒนาเทคโนโลยีพึ่งพาตนเองภายในประเทศ ทางด้านเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์เช่นเซอร์ กลุ่มวิจัยเพชรเห็นความจำเป็นที่ต้องพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ขึ้นภายในประเทศ

1.6 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

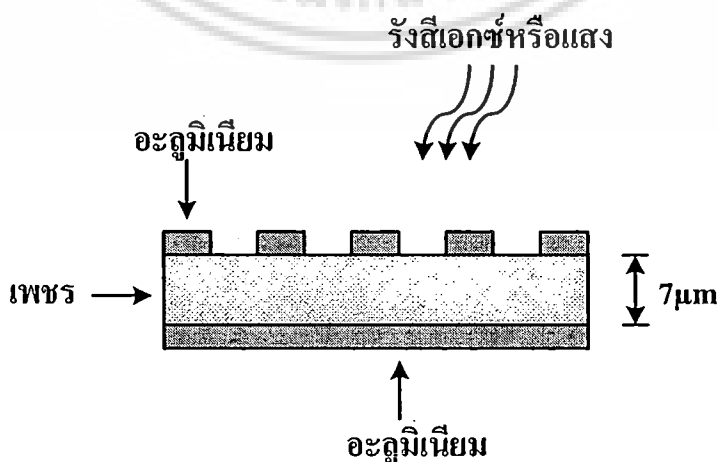
สำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คืออุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์โดยอ้อม และอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์โดยตรง

อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์โดยอ้อม เนื่องจากรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง ดังนั้นวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับต้องมีความเหมาะสมกับพลังงานจากรังสีเอกซ์ ไม่เช่นนั้น อุปกรณ์ตรวจจับเสียหายได้ง่าย ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการตรวจจับรังสีเอกซ์ จึงได้ใช้สารเรืองแสงเปลี่ยนความยาวคลื่นรังสีเอกซ์เป็นความยาวคลื่นแสงช่วงตั้งแต่ 315-630 nm ในทางการแพทย์ โดยเฉพาะการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์ นิยมใช้สารเรืองแสง CaWO_4 และ $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S} : \text{Tb}$ เมื่อกระทบกับรังสีเอกซ์จะเรืองแสงสีน้ำเงินและสีเขียวตามลำดับ จากนั้นจึงใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงชนิดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กึ่งตัวนำเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ตรวจจับมีโครงสร้างได้หลายชนิดเช่น Photo Conductor, Photodiode, Phototransistor และ CCD เป็นต้น ซึ่งการตรวจจับรังสีเอกซ์โดยอ้อมนี้ สัญญาณไฟฟ้าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไม่คมชัด ต้องใช้ระบบประมวลผลกรองสัญญาณให้คมชัดขึ้น สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์โดยตรง ปรกติจะสามารถแปลงรังสีเอกซ์ ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้โดยตรง สัญญาณที่ได้นั้นจะมีความคมชัดสูง สารกึ่งตัวนำหลายชนิดที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาสำหรับตรวจจับรังสีเอกซ์ เช่น A-Se, PbI₂, TlBr, CdAnTe และ HgI₂ เป็นต้น โดยวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด A-Se ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมาก แต่วัสดุชนิดนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการตรวจจับรังสีเอกซ์โดยตรง เนื่องจากชั้นของ A-Se จำเป็นต้องป้อนศักดาไฟฟ้าที่สูงมาก ในขณะที่ตรวจจับรังสีเอกซ์ มีโอกาสที่ศักดาไฟฟ้าสูงไปทำลายวงจรไฟฟ้าของโครงสร้างสองมิติให้เสียหาย

ดังนั้นการพัฒนาเพชรจึงมีความจำเป็น เนื่องด้วยลักษณะโครงสร้างของเพชรที่เป็นแบบโพลิคริสตัลไลน์ประกอบด้วยผลึกหลายๆ ผลึกเรียงต่อกันและมีเส้นขอบเขตเกรนของผลึกจำนวนมาก ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์ โครงสร้างตัวอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรดังรูปที่ 1.17 เมื่อให้ไบแอสที่รอยต่อทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งบริเวณนี้มีความสำคัญมากในการรับแสงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โดยประจุพาหะทั้งสองจะถูกพัดพาไปยังขั้วโลหะทั้งสองด้วยความต่างศักย์ภายในบริเวณรอยต่อ เกิดเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้า ดังนั้นอุปกรณ์ทางแสงแบบแวนอนที่สร้างบนเพชรจะประสบกับปัญหาคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสง ต้องเดินทางผ่านขอบเขตเกรนของผลึกทำให้เกิดการลดลงของปริมาณประจุพาหะ ดังนั้นจึงออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบ MSM ให้อุปกรณ์ทำงานในแนวตั้ง ซึ่งเป็นทิศทางขนานกับขอบเขตเกรนของผลึก ทำให้สามารถลดอิทธิพลของขอบเขตเกรนของผลึกที่มีต่อทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปที่ 1.17 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบ MSM ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ขอบเขตของการวิจัย

โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบวนการสังเคราะห์เพชรบนแผ่นซิลิคอน โดยให้สามารถแยกเพชรเป็นส่วนๆ เพื่อให้สามารถสร้างได้หลายๆ ตัวพร้อมกันและในเวลาเดียวกัน การสร้างโฟโตไดโอดเพชรถูกสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนด้วยวิธีการ Hot filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) ซึ่งใช้แหล่งจ่ายเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) สำหรับเพชรชนิดอินทรินซิก และหาวิธีการกัคซิลิคอนที่เหมาะสมสำหรับเป็นไดอะแฟรม จากนั้นจึงสร้างอุปกรณ์ MSM ชนิดเพชรโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นรอยต่อขอตั๊กทั้งสองด้าน โดยให้ทำงานในแนวตั้งซึ่งเป็นทิศทางขนานกับขอบเขตเกรนของผลึก เพื่อให้สามารถลดอิทธิพลของขอบเขตเกรนของผลึกที่มีต่อทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ เมื่อสร้างเสร็จแล้วในเบื้องต้นได้ทำการทดสอบการตอบสนองต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต การตอบสนองต่อเวลา และทำการศึกษาเวลาที่ใช้ในการแอนนัล โลหะเพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อเวลา หลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์

1.8 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้

1. กำหนดวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานแนวความคิดของงานวิจัยและขอบเขตของงานวิจัย
2. รวบรวมเนื้อหาและงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
3. ศึกษากระบวนการสร้างและออกแบบและพัฒนางานวิจัย
4. ทำการทดลองและเก็บผลการทดลอง
5. สรุปผลงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ

2.1 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

2.1.1 ลักษณะพื้นฐานของแสง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีอยู่รอบทุกทิศทุกทางทั้งที่มองเห็นและมองไม่เห็น คลื่นที่มองเห็น ส่วนใหญ่ที่รู้จักจะเป็น X-Ray, Gamma-Ray เป็นคลื่นที่มีความถี่สูง มีพลังงานสูงและความยาวคลื่นต่ำ ส่วน ไมโครเวฟ หรือ คลื่น Radio จะเป็นคลื่นที่มีความถี่ต่ำ มีพลังงานต่ำและความยาวคลื่นสูง สำหรับคลื่นที่มองเห็นก็จะเป็นคลื่นที่อยู่ในช่วง visible ซึ่งจะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าโดยเรียกว่า แสงนั่นเอง โดยแสงมีคุณสมบัติทั้งที่เป็น “คลื่น” และ “อนุภาค” มีคุณสมบัติในการแทรกสอด สะท้อนและหักเห แต่ในทางฟิสิกส์เราจะพิจารณาว่าแสงเป็นอนุภาค โดยอนุภาคนี้เรียกว่าโฟตอน โดยพลังงานโฟตอนจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (Energy gap) สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลอิสระ

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{\lambda} \quad (\text{J}) \quad (2.1)$$

หรือ
$$E_{\text{photon}} = \frac{h\nu}{q} = \frac{hc}{q\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{eV}) \quad (2.2)$$

โดย ν คือ ความถี่ (Hz)

λ คือ ความยาวคลื่นแสง (μm)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J-sec

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

2.1.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

เมื่อสารกึ่งตัวนำดูดกลืนแสงจะทำให้เกิดประจุพาหะอิเล็กตรอนโฮลอิสระขึ้น ซึ่งก็คือการเปลี่ยนพลังงานทางแสงเป็นพลังงานทางไฟฟ้า การดูดกลืนพลังงานแสงสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางฟิสิกส์ คือความหนาแน่นโฟตอนที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นดังสมการที่ 2.3 ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนโฟตอนภายในสารกึ่งตัวนำ แสดงการลดลงของความหนาแน่นโฟตอนดังรูปที่ 2.1

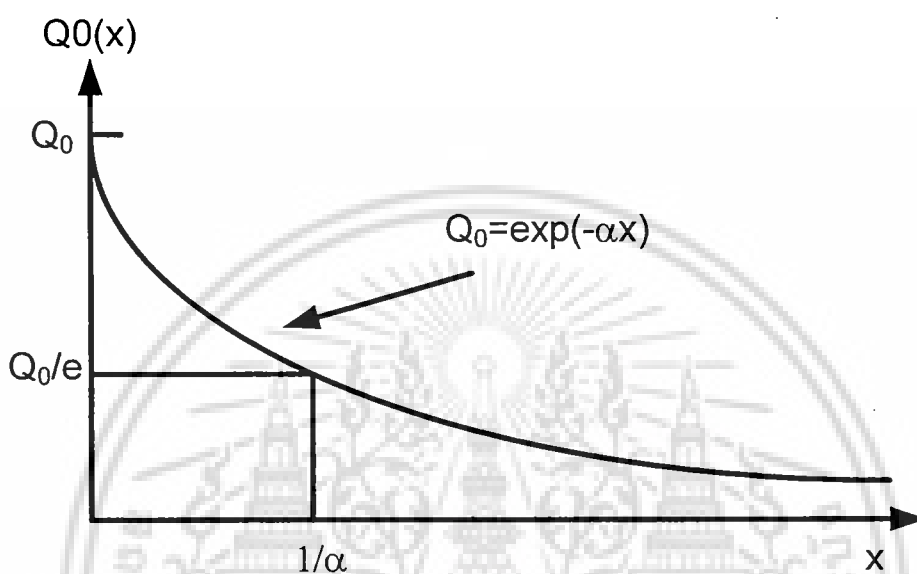
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q(x) = Q_0 \exp(-\alpha x) \quad (C) \quad (2.3)$$

โดย $Q(x)$ คือ ความหนาแน่นโฟตอนที่ความลึก x จากผิวถึงสารกึ่งตัวนำ

Q_0 คือ ความหนาแน่นโฟตอนที่ผ่านผิวสารกึ่งตัวนำเข้าไปด้านใน ($\text{photon.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$)

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (cm^{-1})



รูปที่ 2.1 การลดลงของความหนาแน่นโฟตอนเมื่อผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงหรือคลื่นเดินทางกระทบกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการดูดกลืนในวัสดุด้วยเหตุผลที่ว่าอนุภาคอิเล็กตรอน ไอออน หรือนิวเคลียส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุนั้นมีประจุไฟฟ้าและมีโมเมนต์แม่เหล็ก จึงมีผลกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างเช่น

1. การเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอะตอมเดี่ยว
2. การเปลี่ยนแปลงระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ
3. การเกิดเอ็กซิตอน (exciton)
4. การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนและโฮลระหว่างระดับพลังงานของสารเจือปนหรือ gap state ที่เกิดจากจุดบกพร่อง
5. การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอิสระภายในแถบพลังงานเดียวกันในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ
6. การเปลี่ยนสถานะของระดับพลังงานของอะตอมเมื่ออะตอมสั่นหรือหมุนรอบตัวเอง
7. การกระตุ้นให้เกิดโพลาริเซชันต่างๆ ได้แก่ โพลาริเซชันชนิดอิเล็กตรอน ทิศทางโพลาริเซชัน และโพลาริเซชันชนิดไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การกระตุ้นให้โครงร่างผลึกชนิดไอออนเกิดการสั่น

9. การดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจากโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียสหรือ โมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน

จำนวนกลไกทั้งหมดนี้ข้อที่ 1-5 มีอิเล็กตรอนเป็นตัวการสำคัญ ข้อที่ 6-8 มีอะตอมและไอออนเป็นตัวการสำคัญ ข้อที่ 9 มีสนามแม่เหล็กเป็นตัวการสำคัญ [29]

การดูดกลืนแสงทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบคอนดักชัน ในการดูดกลืนแสงจะมีลักษณะสัมพันธ์กับโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ และแสดงเป็นลักษณะแถบพลังงานเป็นฟังก์ชันเลขคลื่น โดยจะเป็นรูปฟังก์ชัน k กรณียกยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ตรงจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่ตำแหน่งของ $k = 0$ เรียกว่าสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานแบบตรง (direct band gab) หากยกยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ไม่ตรงจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน เรียกว่าสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานแบบไม่ตรง (indirect band gab)

การเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจะไม่เปลี่ยนค่า โมเมนตัม คือค่า k จะต้องไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น ไม่ว่าจะเป็นแถบพลังงานแบบตรงหรือแถบพลังงานแบบไม่ตรงก็จะไม่เปลี่ยนค่าโมเมนตัมเรียกว่า “กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม” โดยการดูดกลืนในแบบแถบพลังงานตรงจะอยู่ในแนวตั้งซึ่งเป็นการอนุรักษ์ค่าโมเมนตัม และสำหรับแถบพลังงานไม่ตรงนั้น เนื่องจากจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ไม่ตรงจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน จึงไม่มีสถานะพลังงานมารองรับอิเล็กตรอน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนขึ้นแล้วเปลี่ยนค่า โมเมนตัม โดยมีผลกับโครงร่างผลึก ซึ่งจะมีการถ่ายเทโมเมนตัมกับ โครงผลึกที่กำลังสั่นอยู่จึงทำให้ยังคงรักษา ค่าโมเมนตัมของระบบไว้ได้ และทำให้การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรงเกิดขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจะมีการรับและคายพลังงานโฟนอนให้กับ โครงร่างผลึก ซึ่งจะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน คือ } \varepsilon_f - \varepsilon_i = \hbar\omega \pm \varepsilon_p$$

$$\text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ } k_2 = k_1 \pm k_p$$

โดยที่ ε_p คือ พลังงานโฟนอน

ε_i คือ พลังงานของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ

ε_f คือ พลังงานของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ

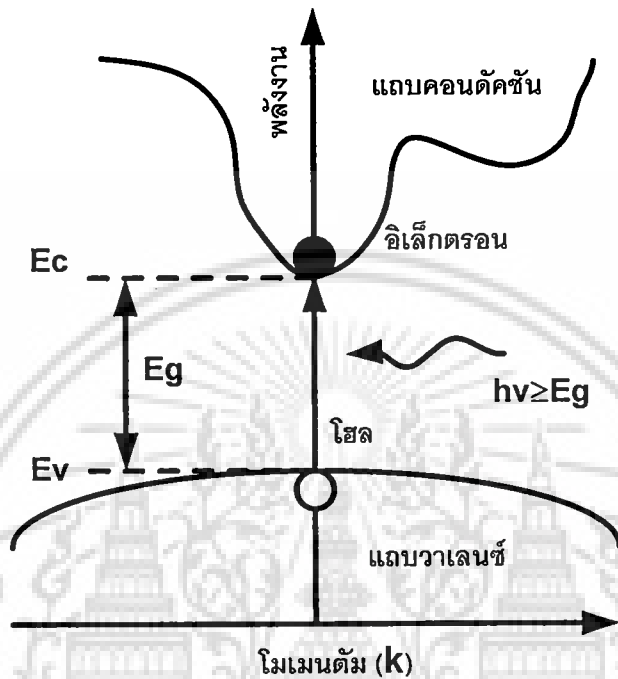
k_1 คือ โมเมนตัมของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ

k_2 คือ โมเมนตัมของอิเล็กตรอนก่อนหลังเปลี่ยนสถานะ

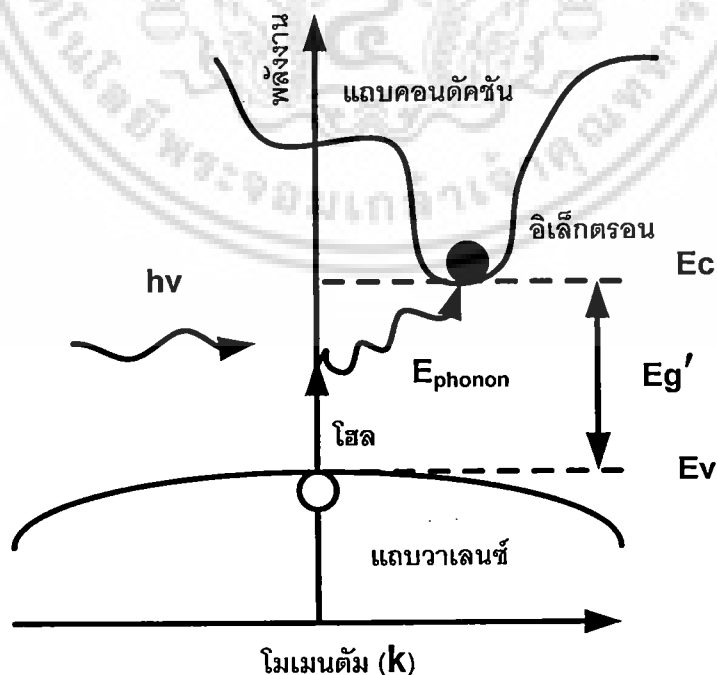
k_p คือ โมเมนตัมของโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมาย + ในพจน์ด้านขวาเป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนรับพลังงานหรือรับโมเมนตัมจากโฟนอน และเครื่องหมาย - ในพจน์ด้านขวาเป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนคายพลังงานหรือคายโมเมนตัมจากโฟนอน รูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 แสดงขั้นตอนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานแบบตรงและแถบพลังงานแบบไม่ตรง



รูปที่ 2.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานแบบตรง



รูปที่ 2.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานแบบไม่ตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงหาได้จากสมการ 2.4 [30]

$$\alpha = \frac{2q^2 (2m_r)^{5/2} (h\nu - E_g)^{3/2}}{(3m^2 h^2 c n_r)(h\nu)} \quad (2.4)$$

เมื่อ	$m_r = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}$
โดย U	คือ ความถี่ (Hz)
h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J-sec
c	คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec
q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
m	คือ มวลของอิเล็กตรอนอิสระในสุญญากาศ
m_e	คือ มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ
m_h	คือ มวลประสิทธิผลของโฮลในสารกึ่งตัวนำ
n_r	คือ คำนีหักเห

2.1.3 การดูดกลืนแสงด้วยอิกซ์ตรอน

ในสารกึ่งตัวนำการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดไปสู่แถบคอนดักชันและเหลือโฮลไว้ในแถบเวเลนซ์นั้น หากมีพลังงานไม่เพียงพอ อาจทำให้อิเล็กตรอนและโฮลอยู่ในสภาพจับคู่กันไม่เป็นอิสระต่อกันซึ่งจะทำให้มีพลังงานโฟนอนน้อย

2.1.4 การดูดกลืนแสงในช่องว่างแถบพลังงาน

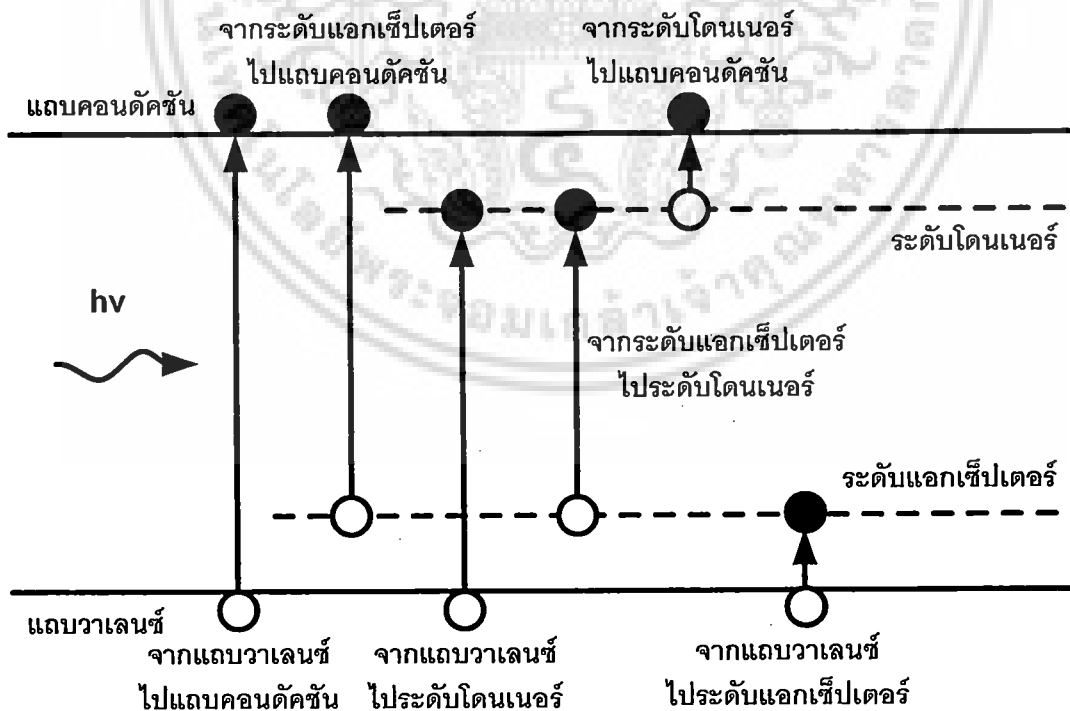
การดูดกลืนแสงในช่องว่างแถบพลังงานหรือการดูดกลืนแบบเอกซ์ทริเนซิคเป็นการดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อเติมสารเจือปนหรืออะตอมแปลกปลอมเข้าสู่ผลึกสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดระดับพลังงานต่างๆขึ้นในแถบพลังงานต้องห้าม (gap state) โดยแถบพลังงานนี้สามารถเป็นศูนย์กลางการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ด้วยรูปที่ 3.18 แสดงการดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานต่างๆ ในช่องว่างแถบพลังงาน

โดยปรกติอะตอมสารเจือที่เติมเข้าไปจะมีพลังงานกระตุ้นน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีพลังงานกระตุ้นน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ดังนั้นโฟตอนที่มีความยาวขบของการดูดกลืนแสงจึงสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากระดับสารเจือไปยังแถบคอนดักชันได้ในกรณีของอะตอมสารเจือผู้ให้ และสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังระดับสารเจือในกรณีของสารเจือผู้รับ โดยมีสองกลไกที่เกี่ยวข้องคือการดูดกลืนพลังงานโฟนอนโดยอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กึ่งตัวนำและการดูดกลืน โดยอะตอมโฟตอน โดยเวเลนซ์อิเล็กตรอนเราสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบเอกซ์ทริเนซิกได้จากสมการที่ 2.5 [30]

$$\alpha = \left(\frac{2^9 \pi N_1 h q^2}{3 c m_e n_r \Delta E_1} \right) \left(\frac{\Delta E_1}{h\nu} \right)^4 \left(\frac{\exp \left[-4 \left(1 - \frac{\Delta E_1}{h\nu} \right) \arctan \left(1 - \frac{\Delta E_1}{h\nu} \right) \right]}{1 - \exp \left[-2\pi \left(1 - \frac{\Delta E_1}{h\nu} \right) \right]} \right) \quad (2.5)$$

- โดย ν คือ ความถี่ (Hz)
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J-sec
 c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec
 q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
 m_e คือ มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ
 n_r คือ ดัชนีหักเห
 N_1 คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ
 ΔE_1 คือ พลังงานไอออไนซ์ของสารเจือ



รูปที่ 2.4 การดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานต่างๆ ในช่องว่างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ

อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในแถบคอนดักชันในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับพลังงานจากแสงจะถูกเร่งให้โมเมนตัมมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงและอิเล็กตรอนก็มีพลังงานเพิ่มขึ้น เรียกว่าการดูดกลืนด้วยอิเล็กตรอนอิสระ โดยจะเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นมากๆ

2.1.6 การดูดกลืนแสงด้วยโพลาริเซชันในวัสดุไดอิเล็กทริก

การวางวัสดุไดอิเล็กทริกไว้ในสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการแตกขั้วเป็นโพลาริเซชัน และถ้าสนามไฟฟ้ามีการกลับขั้วไปมากก็จะทำให้โพลาริเซชันนั้นสั่นตามและเกิดการดูดกลืนพลังงานจากสนามไฟฟ้าได้เนื่องจากแสงก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีสนามไฟฟ้าอยู่ในตัว ดังนั้นจึงถูกโพลาริเซชันในวัสดุไดอิเล็กทริกดูดกลืนได้ ย่านความยาวคลื่นที่ดูดกลืนนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของโพลาริเซชัน

2.1.7 การดูดกลืนแสงด้วยการสั่นของโครงผลึก

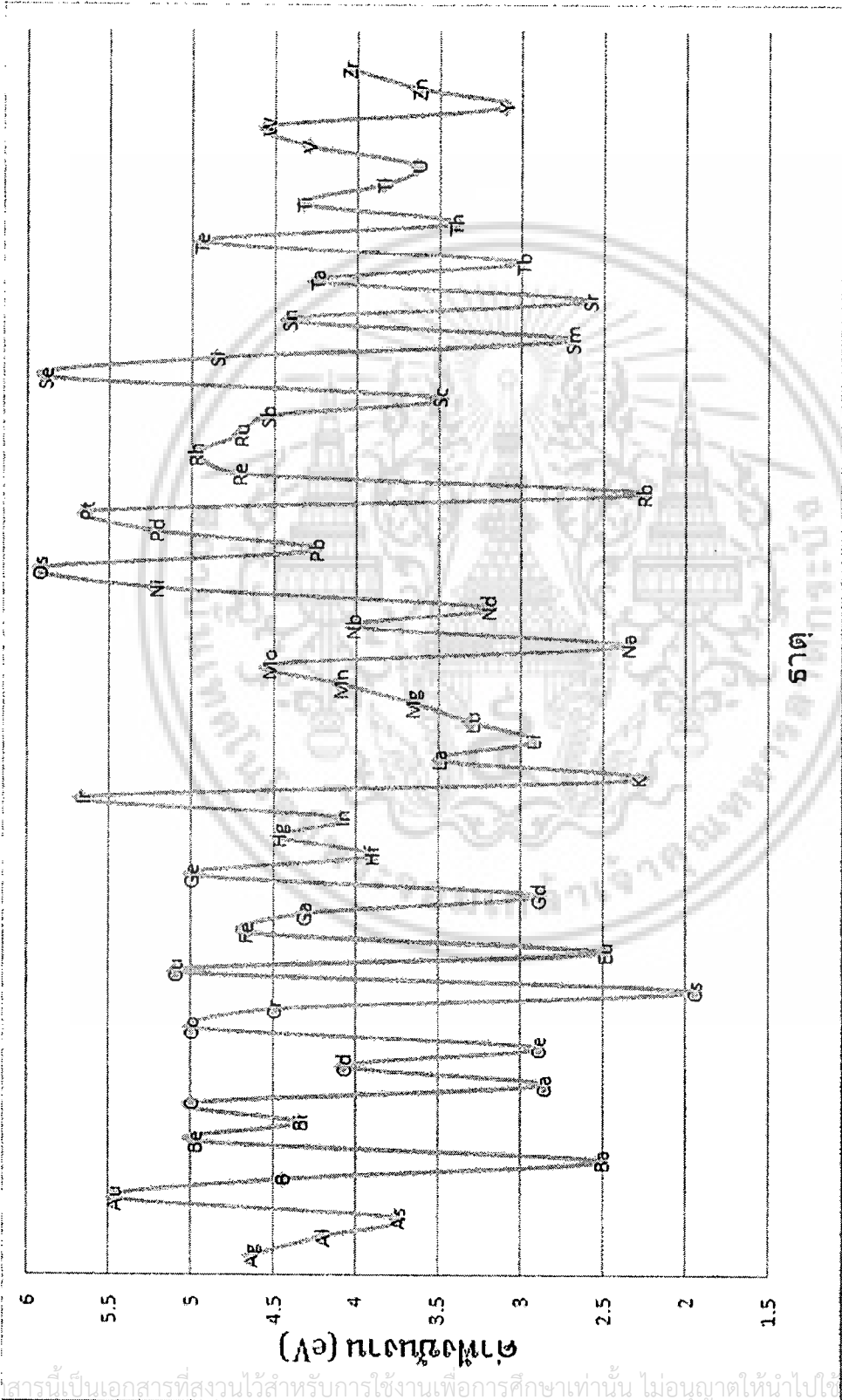
ตามปรกติอะตอมที่ประกอบกันเป็นวัสดุนั้น ณ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จะไม่นิ่งเฉยแต่จะมีการสั่นรอบๆ ตำแหน่งสมดุลเสมอ และถ้าเป็นอะตอมที่ขั้วไฟฟ้าแบบไอออนอยู่บ้าง ก็จะทำให้ไอออนบวกและลบสั่นสลับข้างกัน เมื่อมีแสงมากระทบหากมีความถี่เท่ากับการสั่นของไอออนก็จะถูกวัสดุนั้นดูดกลืน

2.2 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ในการนำอุปกรณ์โซลิตสแตตไปใช้งาน โดยการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ นับว่ามีความสำคัญอย่างมาก ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแบ่งได้เป็นสองชนิด คือแบบเรกติไฟเออร์และแบบโอห์มมิก โดยจะอธิบายโดยใช้โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน ซึ่งการรอยสัมผัสจะมีลักษณะเป็นแบบเรกติไฟเออร์และแบบโอห์มมิก นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าฟังก์ชันงานของโลหะและ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) ของสารกึ่งตัวนำ และในหัวข้อถัดไปจะอธิบายถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าในรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

2.2.1 ค่าฟังก์ชันงานของวัสดุต่างๆ

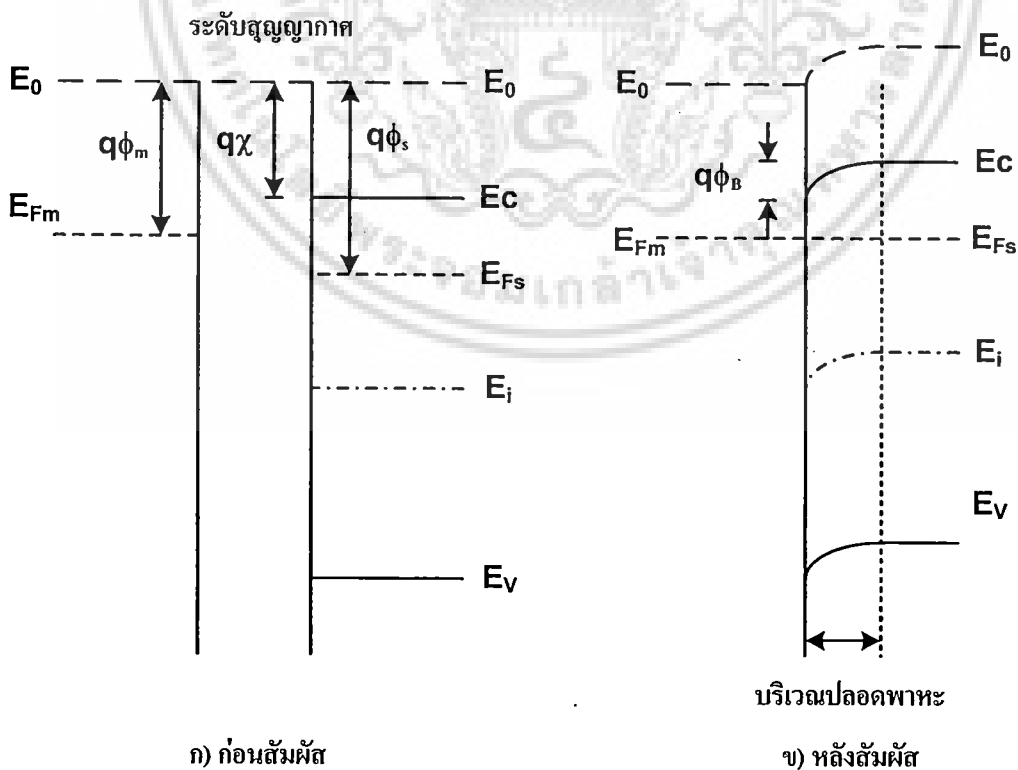
ค่าฟังก์ชันงาน (Work Functions) วัดจากค่าของพลังงานน้อยสุดที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิว โดยค่าฟังก์ชันงานจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแร่และระนาบของธาตุ [31,32,33] ดูรายละเอียดในภาคผนวก ง.



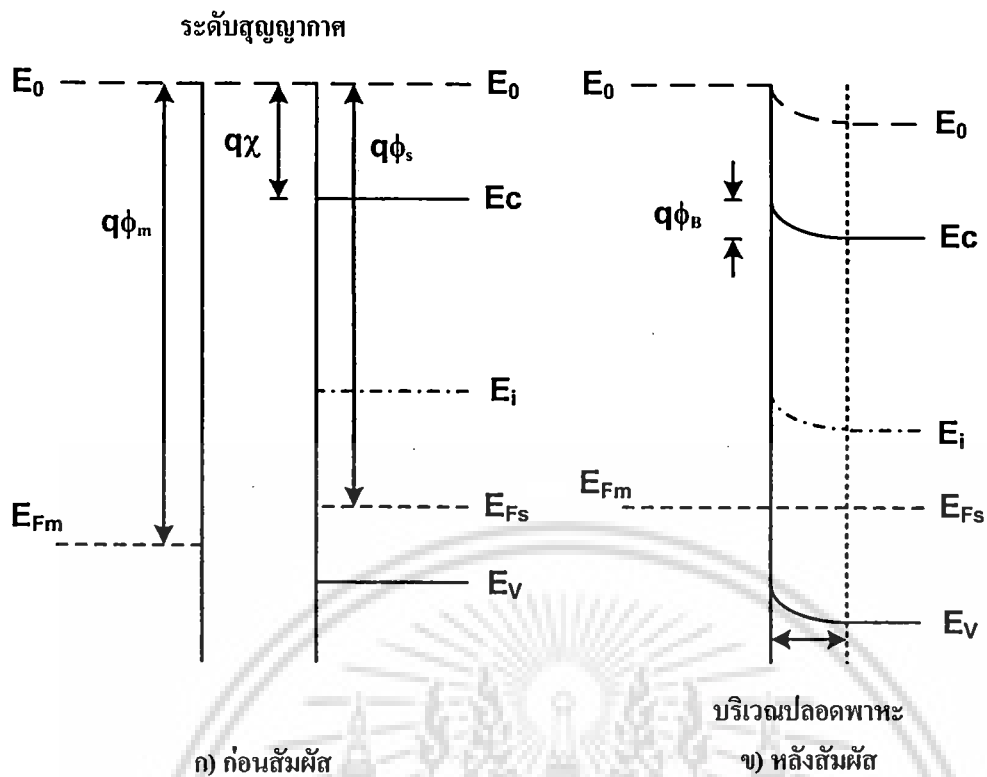
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงค่าฟังก์ชันงานของแต่ละธาตุ

2.2.2 รอยต่อแบบโอห์มิก

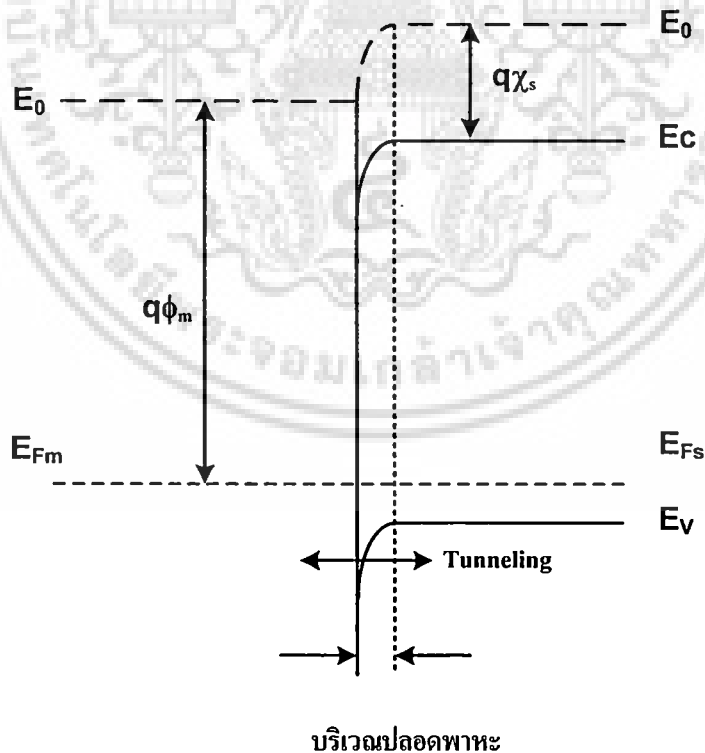
เมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติที่มีความนำสูงโดยสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ทั้ง 2 ทิศทาง เราเรียกรอยต่อแบบนี้ว่ารอยต่อแบบโอห์มิก (ohmic contact) โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งก่อนนำมาสัมผัสและหลังนำมาสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.6 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N) และในรูปที่ 2.7 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P) พิจารณารูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยค่าฟังก์ชันงานของโลหะ Φ_m มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น Φ_s เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองชนิดจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยระดับเฟอร์มิ (fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะอยู่ระดับเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลผ่านรอยต่อเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดไอออนบวกขึ้นทางด้านโลหะและทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อขึ้น โดยการไหลอิเล็กตรอนจะหยุดลงเมื่อสนามไฟฟ้าภายใน มีค่าสูงพอที่จะทำให้สามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้และเป็นสภาวะสมดุล ดังนั้นทำให้เกิดการสะสมของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อ โดยถ้าสังเกตจากรูปที่ 2.6 จะไม่มีกำแพงศักย์กั้นอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ กล่าวคืออิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ทั้งสองทิศทาง และในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มี $\Phi_s < \Phi_m$ ก็เกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นคือ $\Phi_m < \Phi_s$



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.6 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นรอยต่อแบบโอห์มิก โดยสนใจด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

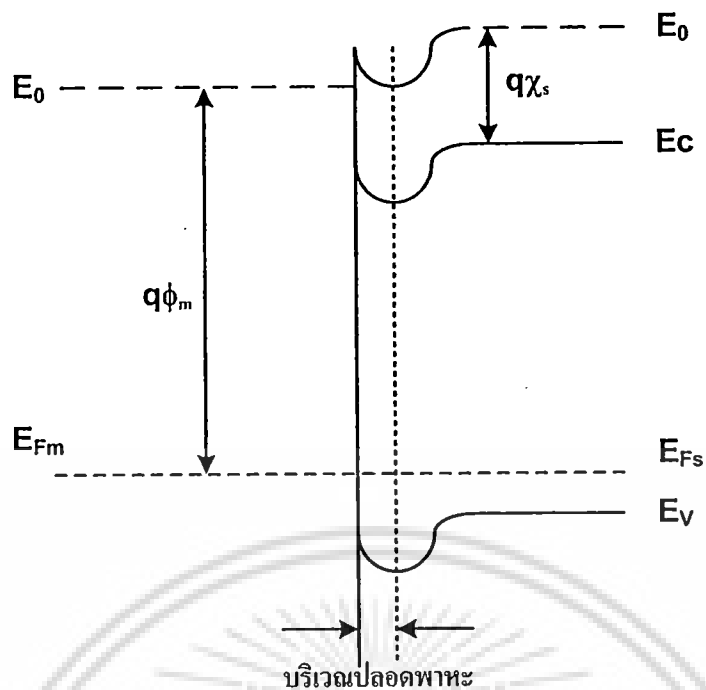


รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อแบบโอห์มมิก



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อแบบโอห์มมิก Tunneling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



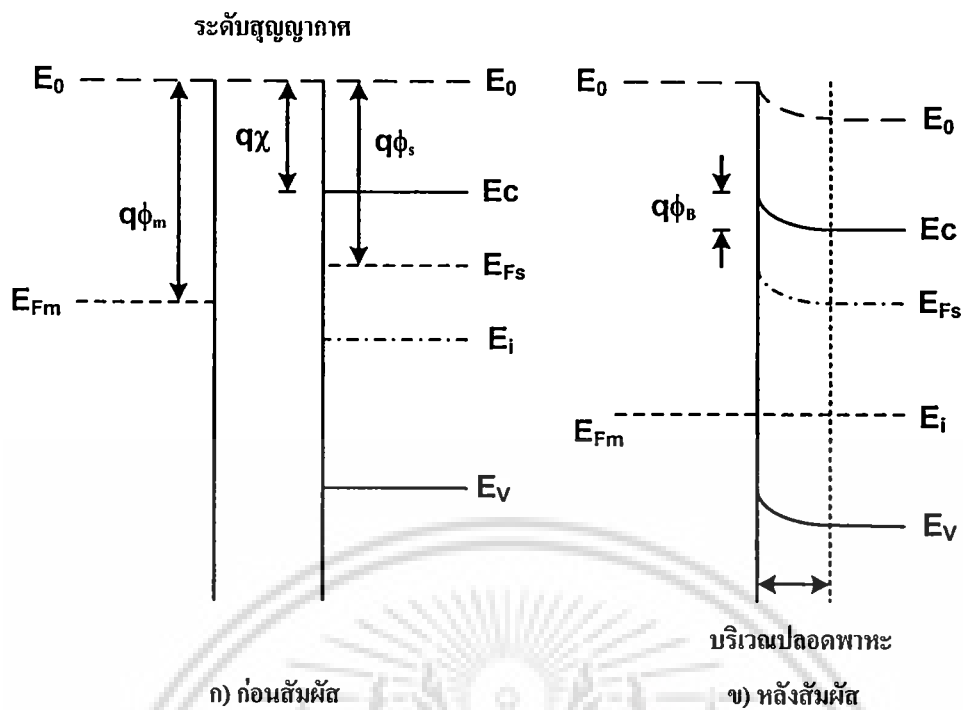
รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อแบบโอห์มมิก Lowering

และสำหรับกรณีรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 เป็นรอยต่อโอห์มมิกที่เกิดจากผลของสถานะผิว โดยรูปที่ 2.8 เนื่องจากบริเวณผิวมีบริเวณปลอดพาหะที่แคบมากหากมีการไบแอสเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้พาหะเกิดการทะลุกำแพงศักย์ไปได้ซึ่งก็ทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก รูปที่ 2.9 เป็นผลของสถานะผิวที่ไปลดกำแพงศักย์จากเดิมที่เป็นรอยต่อแบบชอตต์กีเมื่อทำการไบแอสเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้พาหะสามารถข้ามกำแพงศักย์เกิดเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกได้อีกเช่นกัน

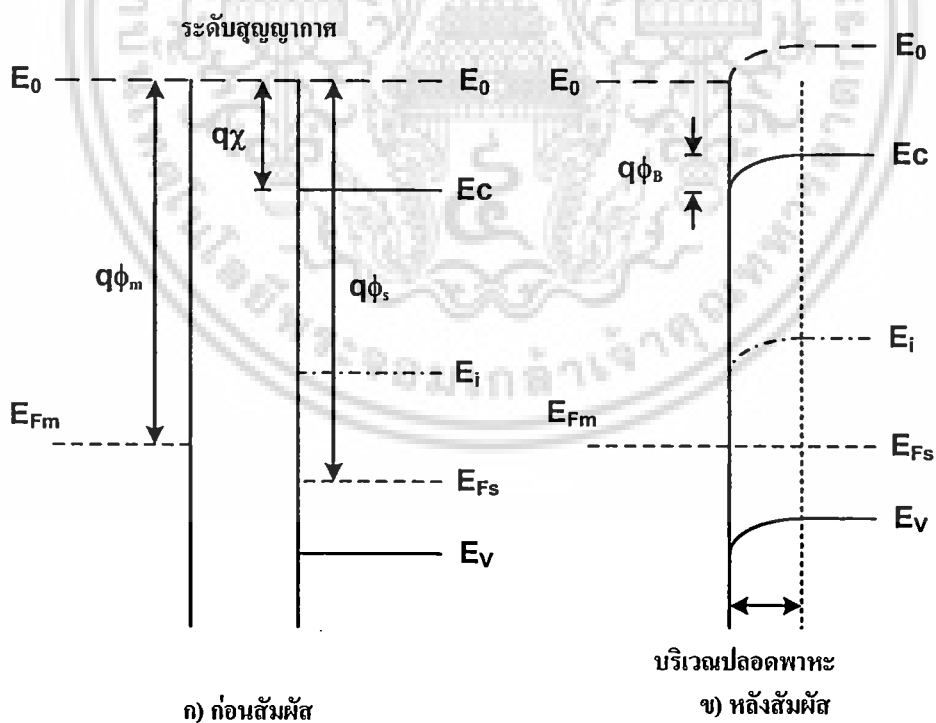
2.2.3 รอยต่อชนิดชอตต์กี

เมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว เราเรียกรอยต่อแบบนี้ว่ารอยต่อชอตต์กี (schottky contact) พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ฟังก์ชันงานของโลหะ Φ_m มีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น Φ_s ในรูปที่ 2.10 เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกัน จะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองชนิดจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองชนิดจะอยู่ระดับเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อเข้าไปด้านโลหะจึงทำให้เกิดไอออนบวกเกิดขึ้นที่สารกึ่งตัวนำและเกิดมีประจุลบขึ้นที่ทางด้านโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดเป็นกำแพงศักย์กั้นจนไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน คืออยู่ในสภาวะสมดุล ส่วนในสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ฟังก์ชันงานของโลหะ Φ_m มีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี Φ_s ในรูปที่ 2.11 ก็อธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์เดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



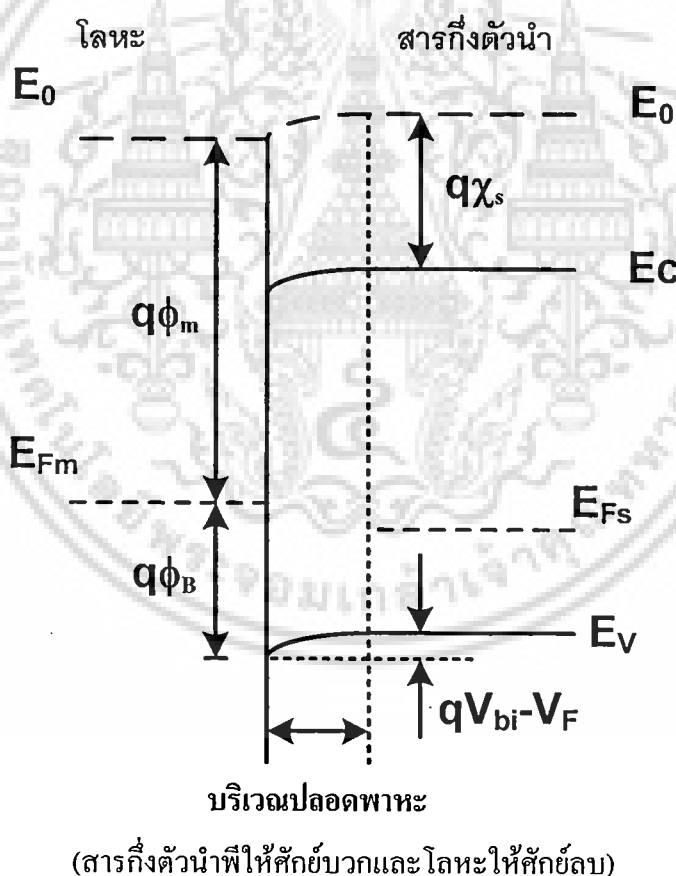
รูปที่ 2.10 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นรอยต่อแบบขอตตัก



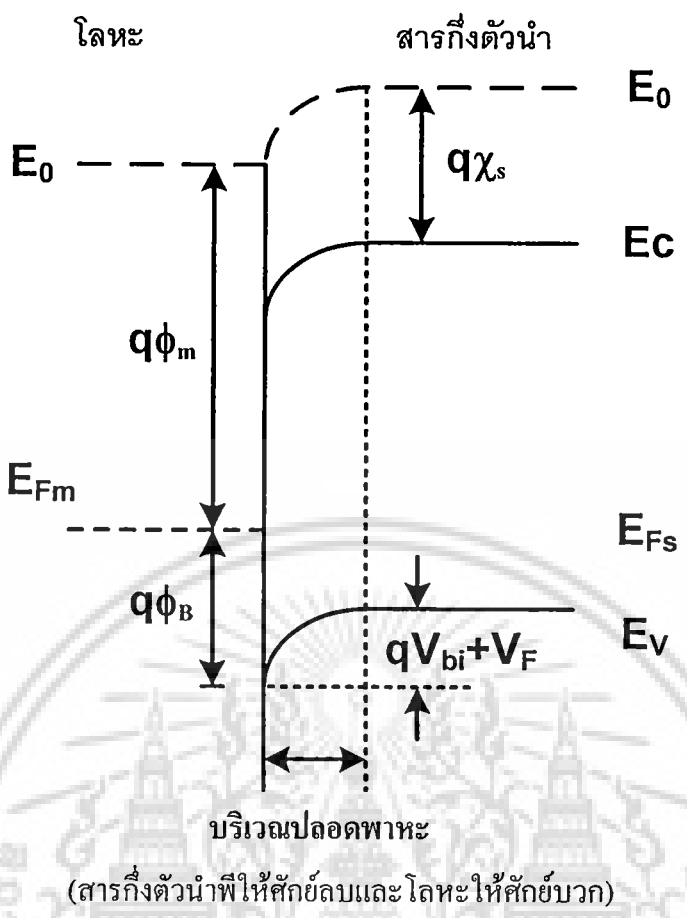
รูปที่ 2.11 แถบพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อแบบขอตตัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำโลหะกับสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะมีการถ่ายเทประจุพาหะจนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุล คือไม่มีการเคลื่อนที่ของประจุพาหะดังนั้นจึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล แต่เมื่อให้ไบแอสแรงดันให้แก่รอยต่อจะมีผลให้โฮลที่เคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แต่สำหรับกำแพงศักย์ที่กั้นอิเล็กตรอนที่ไหลจากด้านโลหะไปสารกึ่งตัวนำ $q\Phi_B$ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อให้ไบแอสไปข้างหน้า (forward bias) กับรอยต่อจะทำให้ค่า V_{bi} ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built in voltage) ลดต่ำลงและถ้าแรงดันไบแอสมีค่ามากพอ ($V_F \geq V_{bi}$) ก็จะทำให้ประจุพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไปยังโลหะได้ ในทางตรงข้ามถ้าให้ไบแอสย้อนกลับ (reverse bias) แก่รอยต่อก็จะทำให้ระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนใหญ่ในสารกึ่งตัวนำจะถูกขัดขวางด้วยกำแพงศักย์ที่มากขึ้นทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อไปยังด้านโลหะได้แบบจำลองโครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบแอสไปข้างหน้าและไบแอสย้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับ โลหะเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไปหน้า



รูปที่ 2.13 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับโลหะเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ

2.2.4 การไหลของกระแสไฟฟ้าในรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

การไหลของกระแสไฟฟ้าในรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบขอตต์ก็เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมาก (majority carriers) โดยที่ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรม การไหลของกระแสในรอยต่อแบบขอตต์ก็มีอยู่หลายทฤษฎี แต่จะกล่าวเฉพาะทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน (thermionic emission theory) คิดโดย Bethe ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป

ความหนาแน่นของกระแส (current density) $J_{s \rightarrow m}$ ที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$J_{s \rightarrow m} = A * T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \tag{2.6}$$

ความหนาแน่นของกระแส (current density) $J_{m \rightarrow s}$ ที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.7)$$

ความหนาแน่นกระแสรวมหาได้จากการรวมสมการที่ (2.6) และสมการ (2.7) ซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นของกระแสรวมดังสมการที่ (2.8) และสมการ (2.9)

$$J = \left\{ A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right\} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$= J_{ST} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

$$J_{ST} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.9)$$

โดยที่	$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$	คือ ค่าคงที่ ของริชชาร์ดสัน (Richardson constant)
	J_{ST}	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิ่มตัว (saturation current density)
	ϕ_B	คือ ความสูงของกำแพงศักย์ขอตติ
	q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
	k	คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/K
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	V	คือ แรงดันไฟฟ้าไบแอส

2.2.5 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

บริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อให้แรงดันไบแอสค่าต่างๆ โดยเมื่อได้รับแรงดันไบแอสตรงจะทำให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะลดลงตามสมการที่ 2.10 และเมื่อได้รับแรงดันไบแอสกลับจะทำให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 2.11

$$W_F = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} - V)}{qN_A}} \quad (2.10)$$

$$W_R = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} + V)}{qN_A}} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ W_F	คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเมื่อได้รับแรงดันไบแอสตรง
W_R	คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเมื่อได้รับไบแอสกลับ
N_A	คือ อะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำ
q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
V_{bi}	คือ กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ
V	คือ แรงดันไบแอส
ϵ_s	คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ

2.2.6 ความจุไฟฟ้าของรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับค่าไบแอสแรงดันย้อนกลับ โดยถ้าให้สารกึ่งตัวนำชนิดพีมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือ N_A มีพื้นที่รอยต่อ A ให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ V_R จะเกิดบริเวณปลอดพาหะกว้าง W ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 2.12

$$C = \frac{\epsilon_s A}{W} \quad (2.12)$$

หรือหาได้จากสมการที่ 2.13 กรณีแรงดันไบแอสไปหน้า

$$C_F = \frac{\epsilon_s A}{W_F} = \epsilon_s A / \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V)}{qN_A}} \quad (2.13)$$

และกรณีแรงดันไบแอสกลับดังสมการที่ 2.14

$$C_R = \frac{\epsilon_s A}{W_R} = \epsilon_s A / \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V)}{qN_A}} \quad (2.14)$$

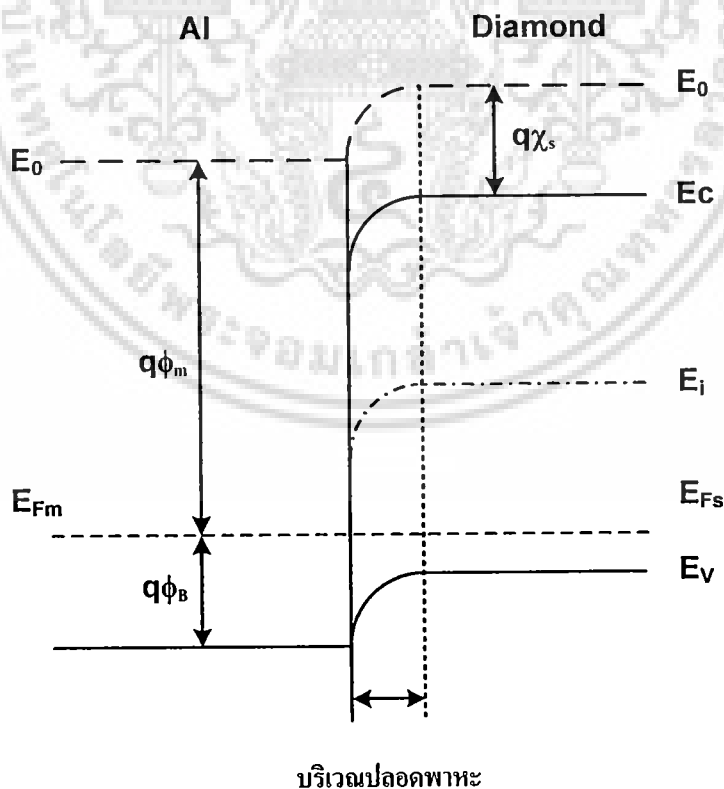
โดยที่ C	คือ ความจุไฟฟ้า
C_F	คือ ความจุไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไบแอสไปหน้า
C_R	คือ ความจุไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไบแอสกลับ
w	คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเมื่อได้รับไบแอส
w_F	คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเมื่อได้รับไบแอสตรง
w_R	คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเมื่อได้รับไบแอสกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- N_A คือ อะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำ
- q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
- V_{bi} คือ กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ
- V คือ แรงดันไบแอส
- ϵ_s คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

2.2.7 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อเพชรแบบขอตต์กี

มีโลหะหลายชนิดที่ถูกใช้เพื่อเป็นโลหะให้เกิดรอยสัมผัสแบบขอตต์กี ซึ่งในการทดลองนี้ จะใช้อะลูมิเนียมเนื่องจากสร้างง่ายและราคาถูก เมื่อเพชรถูกสร้างเสร็จจะเกิดกราฟไฟท์และอะมอฟสคาร์บอนที่ผิว ดังนั้นการทำความสะอาดด้วยสารละลาย CrO_3 กับ H_2SO_4 จะช่วยให้รอยสัมผัสผิวแบบขอตต์กีดีขึ้น [34] มีการใช้โลหะอะลูมิเนียมสร้างบนเพชรแบบโพลีที่ไม่มีการโคป ซึ่งจะทำให้ได้ค่าเบรคควานที่สูง [35] [36] โดยปรกติการทำความสะอาดด้วยสารละลาย CrO_3 กับ H_2SO_4 จะทำให้เกิดออกไซด์บนผิวซึ่งจะช่วยให้ปรับปรุงประสิทธิภาพของรอยสัมผัสแบบขอตต์กีดีขึ้น [34] และช่วยลดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลที่รอยสัมผัสได้ [37] แผนภาพโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อเพชรกับโลหะอะลูมิเนียมแสดงในรูปที่ 2.14

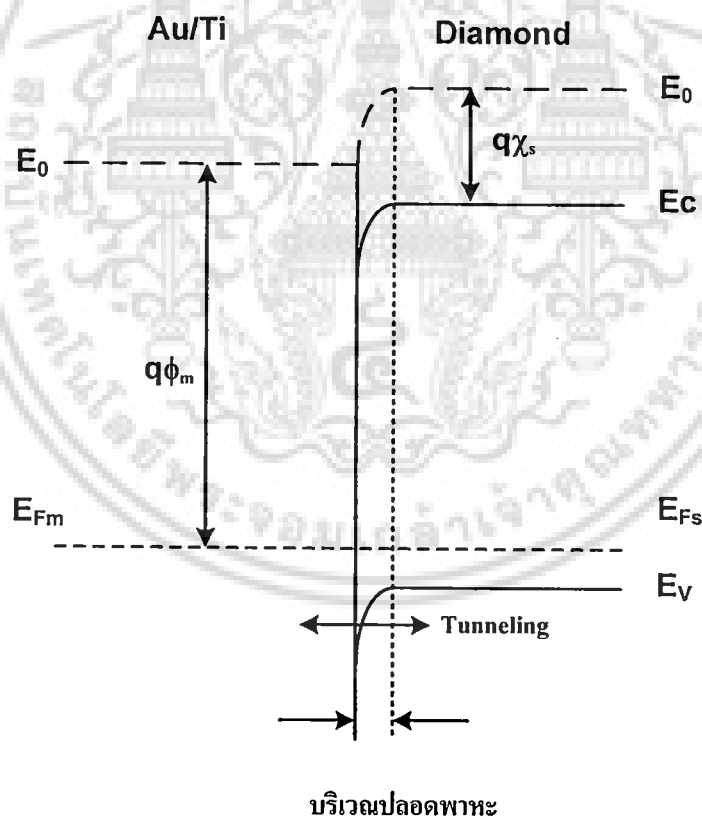


รูปที่ 2.14 แถบพลังงานรอยต่อเพชรและโลหะอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อเพชรแบบไอห่มมิก

โดยปรกติเป็นการยากที่จะทำการสร้างรอยต่อเพชรแบบไอห่มมิกที่ดีเนื่องจากค่า E_g ของเพชรมีค่าสูงถึง 5.45 eV สำหรับงานวิจัยนี้เราได้เลือก Au มาทำขั้วโลหะแบบไอห่มมิก แต่ที่จริงแล้วระหว่างรอยสัมผัสระหว่างทองกับเพชรจะเป็นรอยสัมผัสขอดีก็ การทำความสะอาดด้วยสารละลาย CrO_3 กับ H_2SO_4 จะช่วยลดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลที่รอยสัมผัสได้ [37] แต่ยังมีเหลือชั้นกราฟไฟท์อีกประมาณ 40 nm ถึง 60 nm ซึ่งเป็นชั้นที่จะต้องถูกทำลาย ขณะที่ทำการฉาบโลหะ (sputtering) ด้วยก๊าซ Argon ก็จะมีการทำลายผิวที่เป็นอะมอฟฟิสคาร์บอนและกราฟไฟท์ไปด้วย และใช้ทองเป็นขั้วสัมผัสจะทำให้ได้รอยสัมผัสแบบไอห่มมิก [38][39][40] อีกทางหนึ่งใช้ทองกับเพชรที่มีการโดปความเข้มสูงก็จะทำให้ได้รอยสัมผัสแบบไอห่มมิก หรือกับเพชร โพลีที่เป็นอินทรินซิก การใช้ขั้วโลหะ Ti/Au จะทำให้ได้รอยสัมผัสแบบไอห่มมิกได้เช่นกัน [41] แผนภาพโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อเพชรกับโลหะไทเทเนียม/ทองแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นผลจากสถานะของผิวทำให้เกิดผลของ tunneling



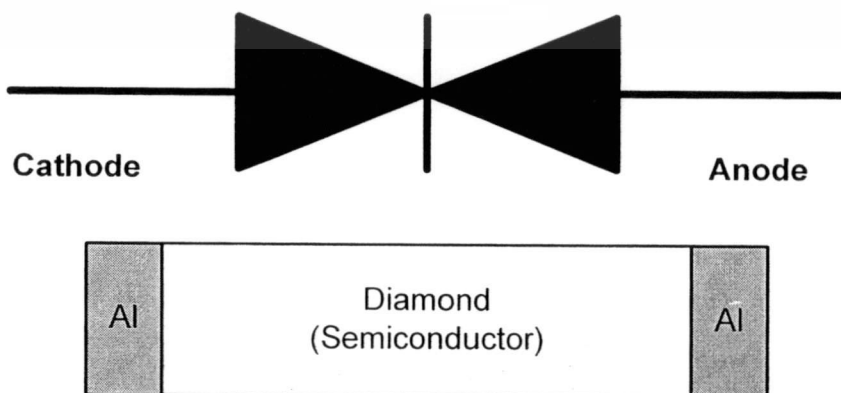
รูปที่ 2.15 โครงสร้างแถบพลังงานของเพชรแบบไอห่มมิก tunneling

2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง

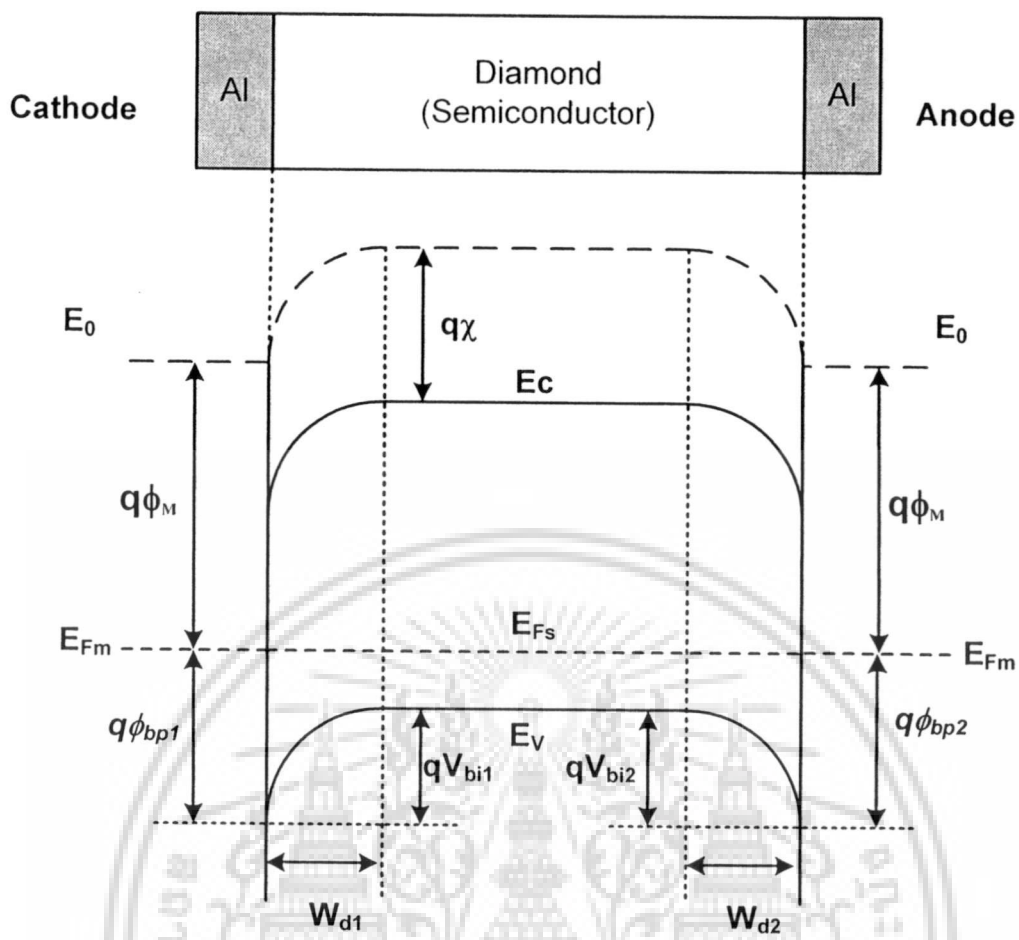
การตรวจวัดแสงมีความสำคัญมากในการนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากแสงมีความยาวคลื่นต่างๆ และมีพลังงานหลายค่า ดังนั้นการนำอุปกรณ์ตรวจวัดแสงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำแสงมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด สิ่งสำคัญคือให้การตอบสนองที่ดีกับความยาวคลื่นแสงที่นำมาใช้งาน ตอบสนองต่ำที่ย่านนอกเหนือการตรวจวัด มีการตอบสนองเชิงเวลาที่ดี มีความคงทน มีเสถียรภาพในการใช้งาน จะมีวัสดุที่นำมาใช้ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญ และการเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน โดยเราจะใช้วัสดุที่เป็นเพชรมาเป็นสารกึ่งตัวนำและนำมาติดกับโลหะแบบต่างๆ เกิดเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดขึ้นมา อย่างแรกคือใช้สารกึ่งตัวนำมาติดกับโลหะแบบโอห์มมิกทั้งสองด้านเรียกว่าอุปกรณ์ “โฟโตคอนดักเตอร์” อย่างที่สองคือใช้สารกึ่งตัวนำมาติดกับโลหะแบบโอห์มมิกด้านหนึ่ง และโลหะแบบชอตต์กีมาติดอีกด้านหนึ่งเราเรียกว่าอุปกรณ์นี้ว่า “ชอตต์กีโฟโตไดโอด” และอย่างที่สามคือใช้สารกึ่งตัวนำมาติดกับโลหะแบบชอตต์กีทั้งสองด้านเรียกว่าอุปกรณ์นี้ว่า “MSM โฟโตไดโอด” โดยทั้งสามโครงสร้างจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป แต่โครงสร้าง MSM เป็นโครงสร้างที่มีข้อได้เปรียบมากกว่าโครงสร้างอื่นคือมีพื้นที่บริเวณปลอดพาหะที่มากกว่า ทำให้มีโอกาสดักกระแสไฟฟ้าแสงจากตัวอุปกรณ์ที่มากกว่า และค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าน้อยส่งผลให้การตอบสนองทางเวลาของตัวอุปกรณ์ที่เร็วกว่า

2.3.1 โครงสร้าง MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรภาวะสมดุ

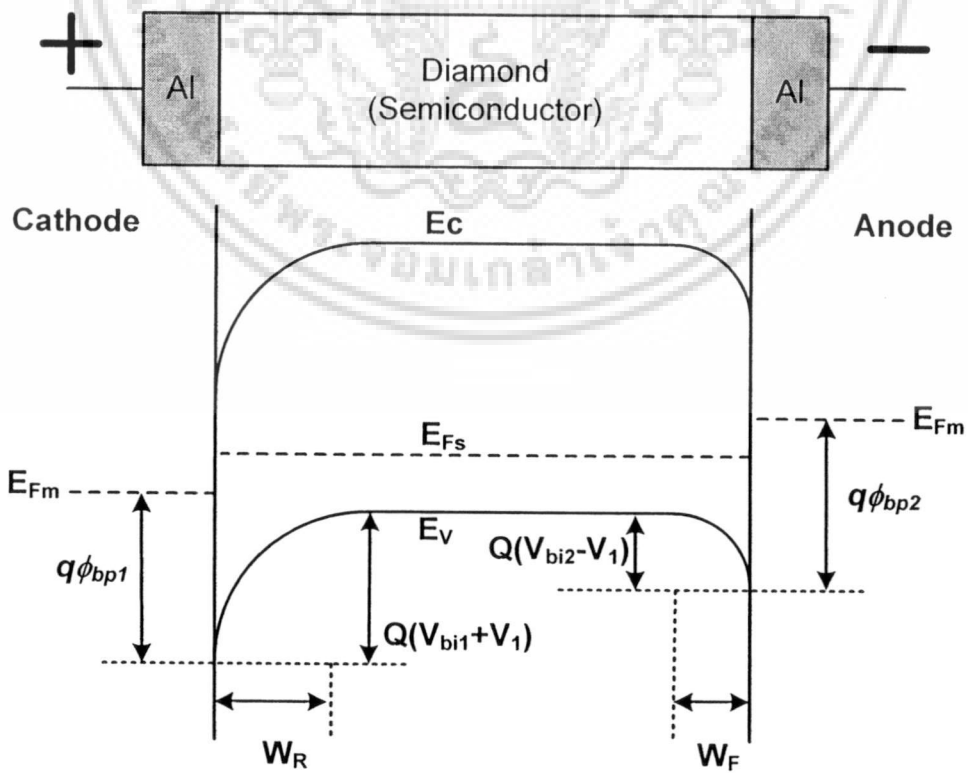
MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร เป็นอุปกรณ์ที่มีสนามไฟฟ้าภายในโครงสร้างสองด้าน โดยรอยต่อทั้งสองข้างระหว่างสารกึ่งตัวนำเป็นอะลูมิเนียม (Al) โครงสร้าง MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรภาวะสมดุแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 โดยค่าแฟงศักย์ของชอตต์กีของขั้วแคโทดคือ ϕ_{bp1} และขั้วแอโนดคือ ϕ_{bp2} โดยที่ $\phi_{bp1} = \phi_{bp2} = \phi_{bp}$ ค่าแฟงศักย์ภายในของขั้วแคโทดคือ V_{bi1} และขั้วแอโนดคือ V_{bi2} โดยที่ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด W_{d1} และด้านแอโนดคือ W_{d2} โดยที่ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ดังนั้นทำให้โครงสร้างลักษณะนี้เป็นแบบสมมาตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 2.16 สัญลักษณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แถบพลังงาน MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรภาวะสมดุล



รูปที่ 2.18 แถบพลังงาน MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อได้รับไบแอส

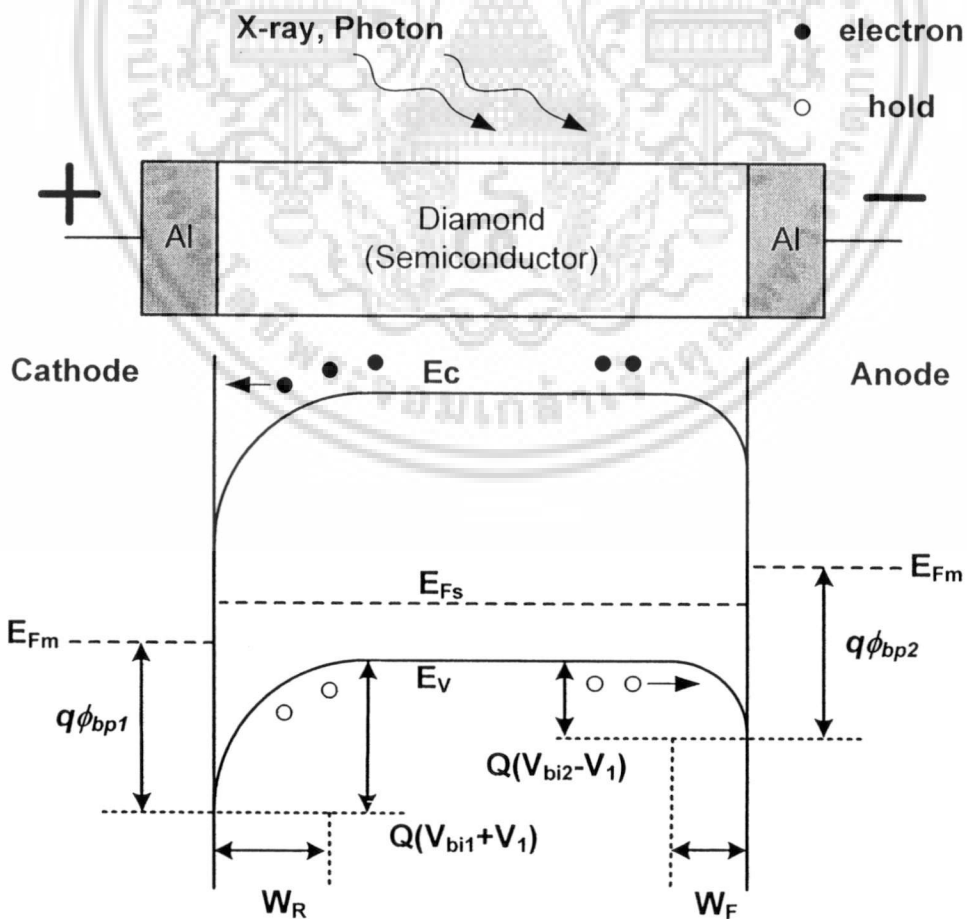
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 โครงสร้าง MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรขณะได้รับไบแอส

เมื่อด้านแคโทดได้รับไบแอสย้อนกลับพบว่าบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด W_R มีขนาดกว้างขึ้น ทำให้ได้กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทดคือ $V_{bi1} + V_1$ และเมื่อด้านแอโนดได้รับไบแอสตรงพบว่าบริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด W_R มีขนาดลดลง ทำให้ได้กำแพงศักย์ภายในของขั้วแอโนดคือ $V_{bi2} - V_1$ ดังนั้นที่ด้านแอโนดแสดงดังรูปที่ 2.18 โสลดจากสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ไปยังโลหะเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า I_{SM} และอิเล็กตรอนจากโลหะสามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ไปยังโลหะสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า I_{MS} ดังนั้น I_{SM} และ I_{MS} ก็เป็นกระแสไฟฟ้าวัวไหล หรือกระแสไฟฟ้ามืด I_{DARK} นั่นเอง

2.3.2 โครงสร้าง MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรขณะที่แสงตกกระทบบ

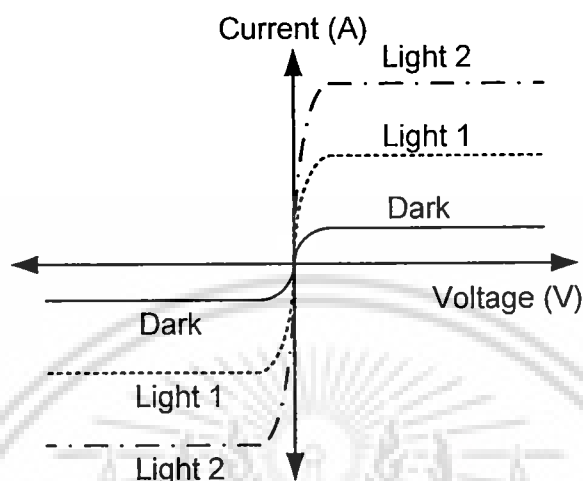
เมื่อแสงตกกระทบบนพื้นที่รับแสงซึ่งรวมถึงบริเวณปลอดพาหะและส่วนนิวทรัลชณะที่ทำการไบแอสดังรูปที่ 2.19 โดยที่พลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่าขนาดช่องว่างพลังงานสารกึ่งตัวนำ ($h\nu > E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่วาหะอิเล็กตรอน-โฮล เมื่อคู่วาหะอิเล็กตรอน-โฮลเกิดที่บริเวณปลอดพาหะก็จะถูกสนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะพัดพาเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าแสง โดยที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่สวนกับสนามไฟฟ้าและโฮลเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.19 แถบพลังงาน MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อได้รับไบแอสและมีพลังงานตกกระทบบนการคำนวณว่ากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าทั่วไปของโครงสร้าง MSM โฟโตไดโอดชนิดเพอร์

จากรูปที่ 2.20 เป็นลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพอร์ โดยมีลักษณะที่สมมาตรกันทั้งสองด้าน ซึ่งกระแสไฟฟ้าแสงจะมีค่ามากขึ้นตามความเข้มของแสงที่ตกกระทบ



รูปที่ 2.20 คุณสมบัติกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพอร์

เมื่อทำการไบแอสความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ได้คือ W

$$W = W_R + W_F \quad (2.24)$$

โดยที่

$$W_F = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V)}{qN_A}}$$

และ

$$W_R = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V)}{qN_A}}$$

และค่าความจุไฟฟ้าที่ได้คือ C_T

$$C_T = \frac{C_R C_F}{C_R + C_F} \quad (2.25)$$

โดยที่

$$C_R = \frac{\epsilon_s A}{W_R} = \epsilon_s A / \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V)}{qN_A}}$$

และ

$$C_F = \frac{\epsilon_s A}{W_F} = \epsilon_s A / \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V)}{qN_A}}$$

ความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์ ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความเร็วในการตอบสนองของตัวอุปกรณ์ได้แก่

1. เวลาพัดพา T_{drift} (drift time) คือ เวลาที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นปลอดพาหะ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15

$$T_{drift} = \frac{W^2}{\mu V_R} \quad (2.15)$$

โดยที่ w คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

μ คือ ความคล่องตัวของพาหะ

V_R คือ แรงดันไบแอสย้อนกลับ

2. เวลาแพร่ซึม T_{diff} (drift time) คือ เวลาที่พาหะเกิดขึ้นนอกบริเวณปลอดพาหะ ใช้ในการเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นปลอดพาหะ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$T_{diff} = \frac{d^2}{2D_C} \quad (2.16)$$

โดยที่ d คือ ระยะทางการแพร่

D_C คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อย

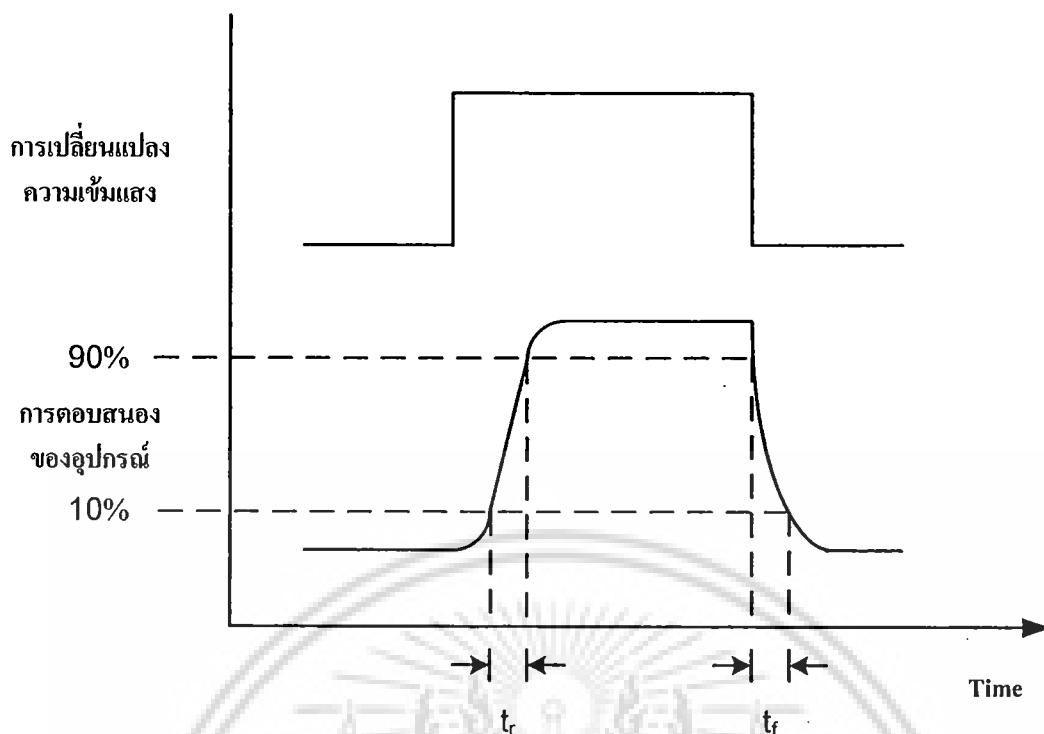
3. ค่าคงที่เวลา T_{RC} (RC time constant) คือ ของวงจรมายนอก เกิดจากเวลาที่ต้องใช้ในการคายประจุไฟฟ้าของรอยต่อผ่านความต้านทานโหลด

$$T_{RC} = 2.2R_L C_j \quad (2.17)$$

โดยที่ R_L คือ ค่าความต้านทานโหลด

C_j คือ ความจุรอยต่อ

เวลาตอบสนอง คือการวัดการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองของอุปกรณ์กับเวลาเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยน โดยที่ t_r (rise time) คือเวลาขาขึ้นจาก 10 % ถึง 90 % และ t_f (rise time) คือเวลาขาลงจาก 90 % ถึง 10 % ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การวัดเวลาตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสง

2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอกซ์

หลังจากการค้นพบรังสีเอกซ์โดย วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน เมื่อปี ค.ศ. 1895 พบว่าฟิล์มถ่ายรูปทั่วไปไม่สามารถตรวจจับรังสีเอกซ์ได้ เนื่องจากค่าการดูดกลืนพลังงานของฟิล์มต่อรังสีเอกซ์มีค่าต่ำเกินไป หรือบางครั้งการตรวจจับด้วยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอาจให้สัญญาณที่ได้ไม่คิดพอดังนั้นจึงได้มีการนำเอาสารเรืองแสงเข้ามาใช้ โดยสารเรืองแสงจะดูดกลืนพลังงานของรังสีเอกซ์และคายพลังงานออกมาในรูปของพลังงานแสงที่สามารถตรวจจับด้วยฟิล์มหรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการพัฒนาตัวตรวจจับรังสีเอกซ์นั้น จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ

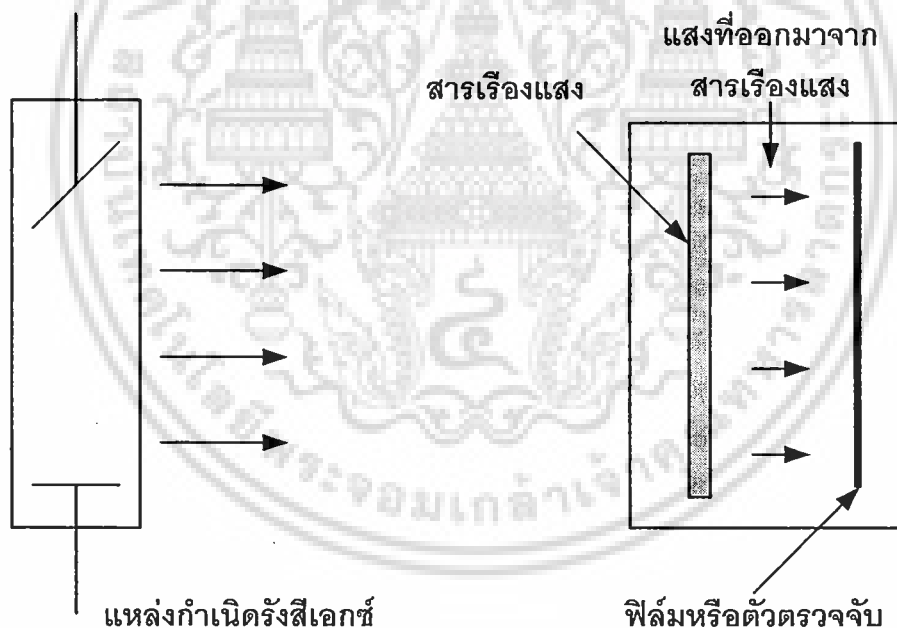
ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์โดยตรง (Direct Imaging) คือตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ที่สามารถแปลงรังสีเอกซ์ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้โดยตรง สัญญาณที่ได้นั้นจะมีความคมชัดสูง

ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์โดยอ้อม (Indirect Imaging) คือตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบที่ต้องแปลงรังสีเอกซ์ให้เป็นพลังงานในรูปแบบอื่นที่ตัวตรวจจับชนิดนั้นๆ สามารถตรวจจับได้ เช่นแปลงรังสีเอกซ์ให้กลายเป็นแสง จากนั้นจึงแปลงจากแสงให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์โดยอ้อมนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาหลายรูปแบบ เพื่อให้สะดวกในการใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน สัญญาณที่ได้นั้นจะมีคุณภาพที่ดีกว่าแบบแรกแต่ราคาจะถูกกว่ากันมาก [3]

2.4.1 สารเรืองแสง

การตรวจจ็ับรังสีโดยใช้สารเรืองแสง (scintillator) เป็นเทคนิคที่มีการใช้มาอย่างยาวนาน แต่ยังคงเป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาและใช้อยู่ในปัจจุบัน คุณสมบัติของสารเรืองแสงที่ดีมีดังนี้ [42]

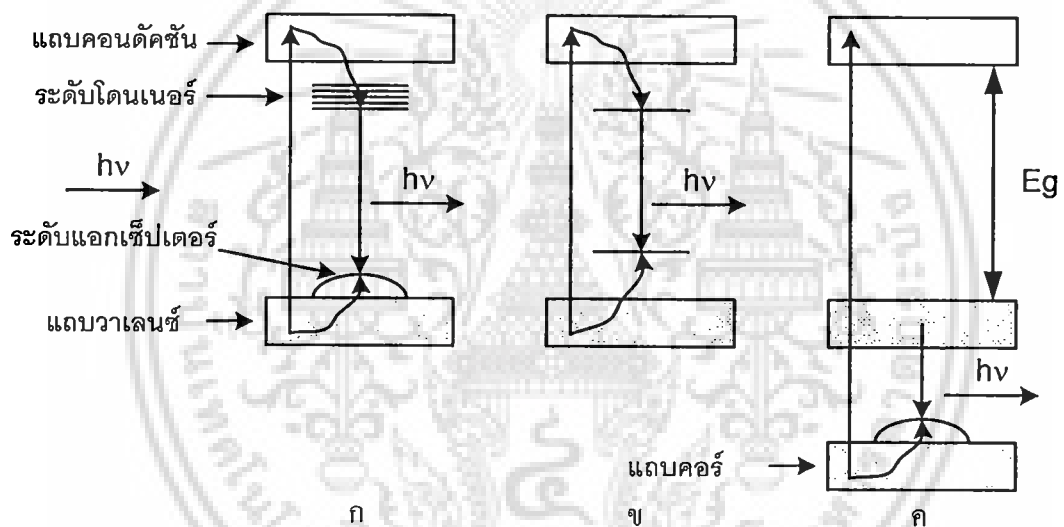
1. สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์ของประจุให้เป็นพลังงานแสงที่สามารถตรวจจ็ับได้ด้วยค่าการเปลี่ยนถ่ายที่สูง
2. การเปลี่ยนถ่ายพลังงานนี้ควรมีการตอบสนองที่เป็นเส้นตรงตลอดช่วงการเปลี่ยนถ่าย
3. ตัวกลางควร โปร่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน
4. เวลาที่ใช้ในลดลงของแสงหลังจากรับรังสีควรมีค่าสั้น
5. วัสดุที่ใช้ควรมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีและมีขนาดใหญ่เพียงพอต่อการนำมาทำตัวตรวจจ็ับ
6. ดัชนีการหักเหควรมีค่าใกล้เคียงกับกระจก (~ 1.5) เพื่อให้มีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดีระหว่างสารเรืองแสงและตัวตรวจจ็ับแสง



รูปที่ 2.22 แสดงการตรวจจ็ับรังสีเอกซ์แบบทางอ้อม โดยใช้สารเรืองแสง

หลักการพื้นฐานของสารเรืองแสงคือแสงจะถูกปล่อยออกมาจากการเปลี่ยนถ่ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากได้รับกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ระหว่างชั้นพลังงาน และการคืนของอิเล็กตรอนที่สถานะพื้น (Ground state) โดยคุณสมบัติของสารเรืองแสงของสารต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ข. และลักษณะการเกิดแสงทาง โครงสร้างมี 3 อย่างคือ luminescence of undoped host matrix, luminescence of doping ions และ cross luminescence [11] ดังรูปที่ 2.23 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยลักษณะของ luminescence of undoped host matrix และ luminescence of doping ions จะเกิดลักษณะเดียวกันคือ เมื่อมีพลังงานเข้ามาเกิดการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนไปอยู่ที่ระดับ แอกเซ็ปเตอร์หรือ ระดับโดเนอร์ หรือแถบคอนดักชันหลังจากนั้นอิเล็กตรอนคายพลังงานและย้าย มาในชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า การคายพลังงานทำให้เกิดแสงออกมา โดยแสงที่เปล่งออกมาก็ขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุนั้นๆ สำหรับ cross luminescence เกิดเมื่อมีพลังงานมากระตุ้นทำให้พาหะจะเกิดการ เคลื่อนที่ระหว่างแถบคอร์และแถบเวเลนซ์ ทำให้เกิดแสงซึ่งเรียกว่า fast fluorescence เช่น BaF_2 โดยและมีการทดลองในลักษณะนี้ในสารประกอบอื่นๆ ก็ให้ผลลักษณะคล้ายกัน กระบวนการที่ เกิดขึ้นนี้ก็จะเรียกว่า cross luminescence (CL) การเกิดของ CL เมื่อ $E_{core} < 2 E_{min}$ โดยที่ E_{core} คือระดับพลังงานด้านบนของแถบคอร์กับพลังงานด้านล่างของแถบคอนดักชัน และ E_{min} คือ พลังงานของพาหะที่เกิดการเอ็กซิตซ์ของวัสดุนั้นๆ



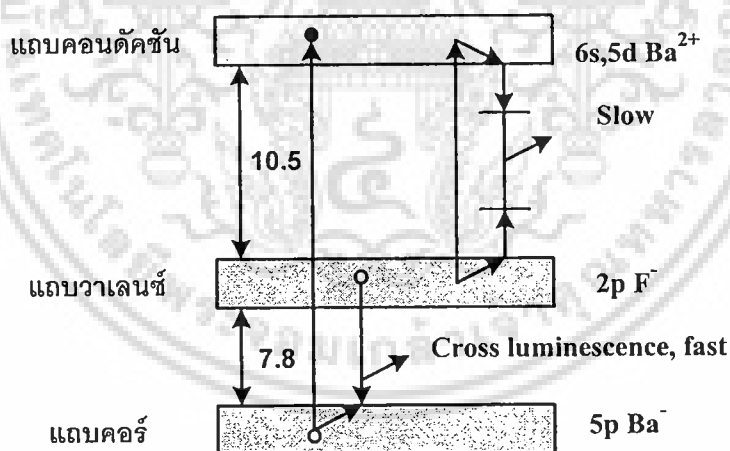
รูปที่ 2.23 การดูดกลืนแสงจากระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของ ก. luminescence of undoped host matrix, ข. luminescence of doping ions และ ค. cross luminescence

โดยส่วนใหญ่การเลือกสารเรืองแสงเราจะเลือกตามคุณสมบัติตามการตอบสนองของตัวตรวจจับแสงของอุปกรณ์นั้น หากเป็นใช้วัสดุซิลิคอนเป็นตัวตรวจจับก็จะตอบสนองได้ดีที่แสงสีเขียวเราก็จะเลือกสารเรืองแสงที่ให้แสงสีเขียวเช่น $Gd_2O_3:S:Tb$ ให้แสงสีเขียวที่ความยาวคลื่น $\lambda_{max} \approx 545 \text{ nm}$ หรือสำหรับวัสดุเพชรจะตอบสนองได้ดีที่แสง UVF เราก็จะเลือกสารเรืองแสงที่ให้แสง UV คือแบเรียมฟลูออไรด์ (Barium Fluoride; BaF_2) ให้แสง $\lambda_{max} \approx 210 \text{ nm}$ ถึง 310 nm ซึ่งเป็นคลื่น UV [9] [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแบเรียมฟลูออไรด์

OPTICAL PROPERTIES	
Transmission Range	0.13 to 10 microns
Refractive Index	1.4626 at 2.6 microns
Reflection Loss	6.9% at 2.6 μm (2 surfaces)
PHYSICAL PROPERTIES	
Density	4.89 g/cm ³
Melting Point	1280 °C
Thermal Conductivity	11.72 W/(m K) at 13 °C
Thermal Expansion	18.1 x 10 ⁻⁶ /°C at -100 to +200 °C
Hardness Knoop	82 kg/mm ² with 500g indenter
Specific Heat Capacity	410 J/(kg K) at 27 °C
Dielectric Constant	7.33 at 2MHz
Young's Modulus (E)	53.07 GPa
Shear Modulus (G)	25.4 GPa
Bulk Modulus (K)	56.4 GPa
Elastic Coefficients	C11 = 89.2 MPa; C12 = 40.0 MPa; C14=25.4 MPa
Apparent Elastic Limit	26.89 MPa
CHEMICAL PROPERTIES	
Solubility	0.17g/100g water at 23°C
Molecular Weight	175.36
Class/Structure Cubic	(111) cleavage

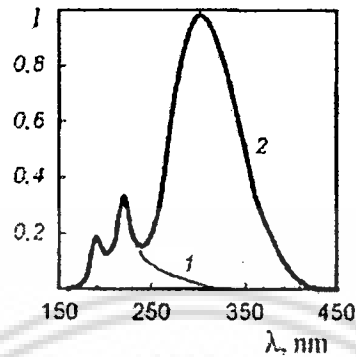


รูปที่ 2.24 แถบพลังงานของแบเรียมฟลูออไรด์

จากรูปที่ 2.25 เป็นแถบพลังงานของแบเรียมฟลูออไรด์ เมื่อมีพลังงานมากกระตุ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบคอร์ไปยังแถบคอนดักชันทำให้เกิดโฮล โดยโฮลจะเคลื่อนไปยังขอบแถบพลังงานของแถบคอร์ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เคลื่อนมาเติมที่ แถบคอร์เกิดปล่อยพลังงาน UV แบบ fast เรียกว่า cross luminescence ที่ความยาวคลื่นประมาณ 220 nm โดยมีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงาน แต่กระนั้นก็ทำให้เกิดโฮลในแถบวาเลนซ์หลังจากที่เกิด cross

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

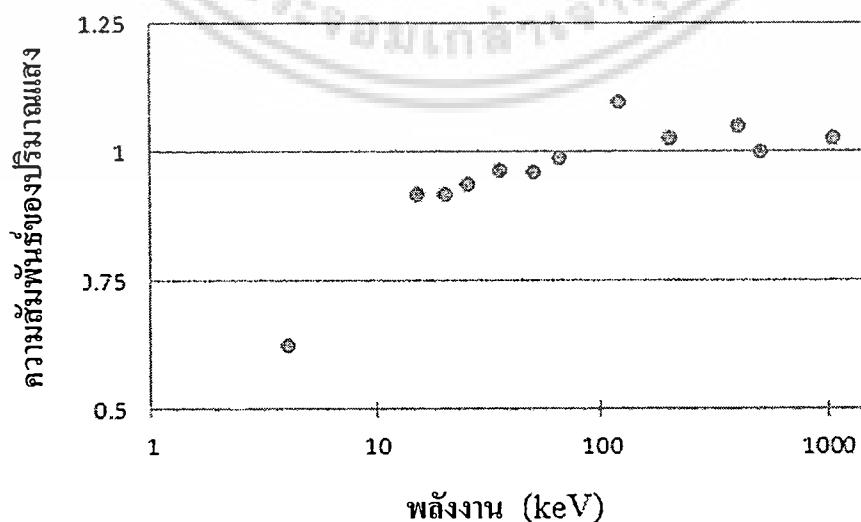
luminescence ทำให้อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ลงมาเติมที่แถบเวเลนซ์และคลายพลังงานแบบ slow emission ที่ความยาวคลื่นประมาณ 320 nm [12] และรูปที่ 2.26 สเปกตรัมแบบเรียมฟลูออไรด์ที่ $t \sim 0.6$ ns Fast (1) และ $t \sim 600$ ns slow (2)



(1) $t \sim 0.6$ ns Fast, (2) $t \sim 600$ ns slow

รูปที่ 2.25 สเปกตรัมแบบเรียมฟลูออไรด์

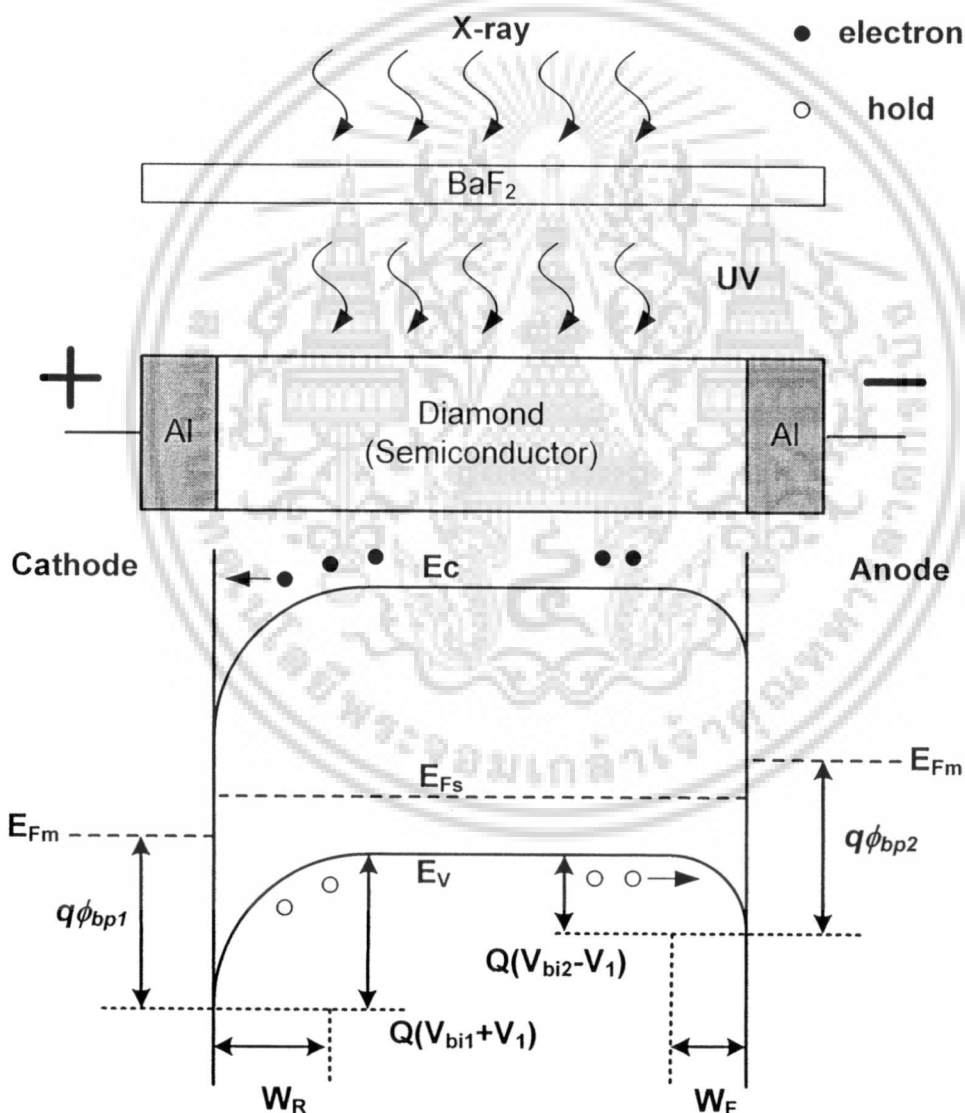
แบบเรียมฟลูออไรด์เป็นสารเรืองแสงถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ในทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ใช้ทำเป็นหน้าต่าง, ปริซึม และเลนส์ส่งผ่านรังสี แบบเรียมฟลูออไรด์เป็นสารเรืองแสงที่เกิดได้ยากโดยมีช่วงเวลาในการเรืองแสงที่สั้นและต้องใช้พลังงานสูงในการทำให้เกิดการเรืองแสง การแผ่รังสีของแบบเรียมฟลูออไรด์มีสองช่วงคือช่วง deep UV ความยาวคลื่น 175 nm ถึง 250 nm ช่วงเวลาในการแผ่รังสีประมาณ 0.6 ns (Fast emission) และช่วงความยาวคลื่น 250 nm ถึง 400 nm ช่วงเวลาในการแผ่รังสีประมาณ 620 ns (Slow emission) [13] ในขณะเดียวกันการให้ได้ปริมาณความเข้มแสงออกมาก็ขึ้นอยู่กับปริมาณการฉายรังสีเอกซ์ด้วย [14] ดังรูปที่ 2.27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.26 กราฟที่อธิบายสอดคล้องรังสีเอกซ์ของแบบเรียมฟลูออไรด์ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การตัวตรวจจับรังสีเอกซ์

โดยปรกติการการตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือโดยตรงและโดยอ้อม ลักษณะการตรวจจับรังสีเอกซ์โดยตรงของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรแสดงดังรูปที่ 2.19 และลักษณะการตรวจจับรังสีเอกซ์โดยอ้อมของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรแสดงดังรูปที่ 2.28 โดยกลไกการทำงานของตัวอุปกรณ์ขณะตรวจจับรังสีมีความคล้ายคลึงกันเพียงแต่ในรูปที่ 2.19 จะตรวจจับรังสีเอกซ์โดยตรงส่วนรูปที่ 2.28 มีสารเรืองคือแบเรียมฟลูออไรด์ทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีเอกซ์เป็นรังสี UV เมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์แบเรียมฟลูออไรด์ก็จะให้รังสี UV ออกมาแล้วตัวอุปกรณ์ก็จะทำการตรวจจับรังสี UV อีกที



รูปที่ 2.27 แถบพลังงาน MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อได้รับไบแอสและมีพลังงาน X-ray ตกกระทบแบบโดยอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสร้างตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

3.1 เทคโนโลยีการสร้าง

3.2.1 กระบวนการทำความสะอาด

ในกระบวนการทำความสะอาดนี้จะทำความสะอาดจากสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะมาจากเครื่องมือเครื่องใช้ จากมนุษย์ผู้ปฏิบัติงาน วัสดุที่ใช้กับชิ้นงานและกระบวนการสร้าง ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากโมเลกุลหรือไอออนที่มาจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ โดยกระบวนการสร้างจะเป็นกระบวนการทางเคมีแบบเปียก [43]

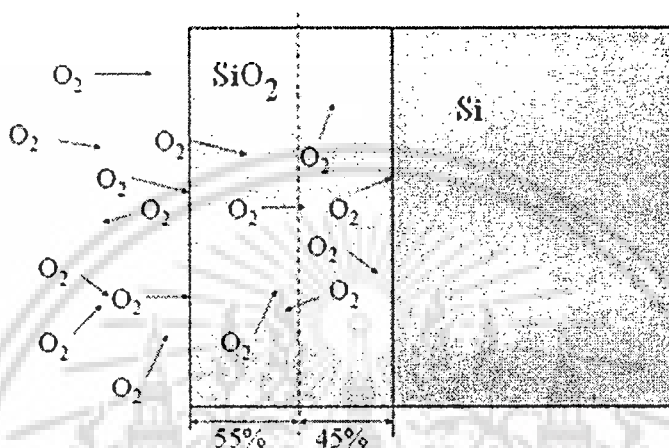
1. การกัดซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้ส่วนผสมระหว่างสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับน้ำ ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีความหนา 1 nm ถึง 1.5 nm จะใช้อัตราส่วนสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ต่อน้ำ ประมาณ 1:5 หรือ 1:10 สำหรับการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ส่วนผสมของสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์กับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์ ที่อัตราส่วน 1:7 (PH = 4.5) ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ ขณะที่มือน้ำยาไวแสงป้องกันส่วนอื่นอยู่ ซึ่งการเติมสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์จะไปเพิ่มค่า PH = 3 ถึง 5 จะทำให้การกัดมีอัตราการกัดที่

2. การกัดแบบปिरันยา (piranha etch) ใช้สารเคมีซัลฟูริกผสมกับสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ใช้ทำความสะอาดจำพวกสารอินทรีย์ออกจากแผ่นซิลิคอน และสามารถทำความสะอาดน้ำยาไวแสงที่เสร็จจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และยังทำความสะอาดอินทรีย์สารที่เกิดเองตามธรรมชาติได้แต่จะไม่สามารถทำความสะอาดจำพวกอนินทรีย์สารคือโลหะต่างๆ ได้ โดยจะใช้ส่วนผสมระหว่างสารเคมีซัลฟูริกผสมกับสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่อัตราส่วน 2-4:1 ที่อุณหภูมิมากกว่า 100 °C และเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพดีเราควรใช้ที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 10 min ถึง 15 min และล้างด้วยน้ำ หลังจากทำความสะอาดแล้วความร้อนทำให้เกิดซิลิคอนไดออกไซด์ บางๆบนผิวซิลิคอน ดังนั้นเราจึงต้องกัดด้วยสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์อีกครั้ง

3. การกัดคราไฟท์บนผิวเพชร ใช้สารเคมีโครเมียมไตรออกไซด์ผสมกับสารเคมีซัลฟูริก [50] ใช้ทำความสะอาดผิวเพชรหลังจากการสังเคราะห์เพชร โดยทำหน้าที่ในกำจัดคราไฟท์ที่เกิดบนผิวเพชร โดยใช้สารเคมีโครเมียมไตรออกไซด์ผสมกับสารเคมีซัลฟูริก ในอัตราส่วน 0.3 g : 200 ml ที่อุณหภูมิ 170 °C จากนั้นทำความสะอาดโดยการต้มในสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียในอัตราส่วน 1:1 แล้วล้างด้วยน้ำ

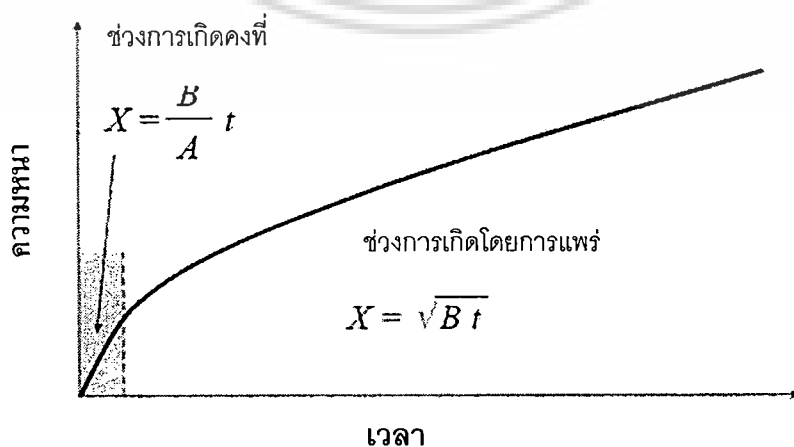
3.2.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์

ออกซิเดชันเป็นกระบวนการทางความร้อนที่สำคัญอย่างหนึ่ง โดยออกซิเจนจะแทรกเข้าไปในซิลิคอนและกลายเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 3.1 โดยประโยชน์การใช้งานของซิลิคอนไดออกไซด์ คือ มีอัตราการแพร่ต่ำสำหรับการเจือสารทำให้สามารถป้องกันการแทรกซึมของสารเจือได้ และยังเป็นฉนวนที่ดีอีกด้วย [44] และที่สำคัญสำหรับกระบวนการสังเคราะห์เพชรยังป้องกันการเกิดเพชรในขณะที่ทำการสังเคราะห์เพชรอีกด้วย [46]



รูปที่ 3.1 การเกิดซิลิคอนไดออกไซด์

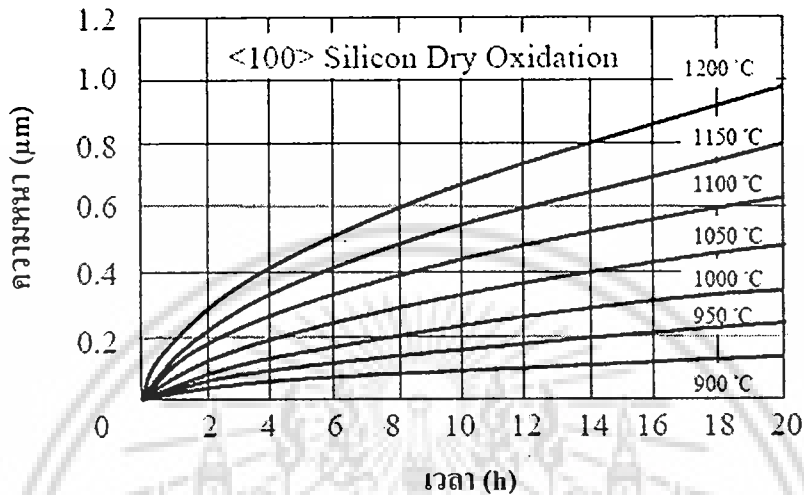
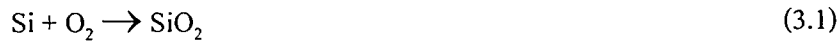
จากรูปที่ 3.2 เมื่อเริ่มเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ช่วงความหนาประมาณน้อยกว่า 500 Å จะเป็นช่วงที่เป็นเชิงเส้นเรียกว่า linear growth regime ตามสมการ $X = \frac{B}{A}t$ เมื่อชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนาเพิ่มขึ้นจากการที่ก๊าซออกซิเจนแทรกตัวเข้าไปในซิลิคอนมากกว่า 500 Å เรียกช่วงนี้ว่า diffusion-limited regime ซึ่งจะมีอัตราการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ลดลงตามสมการ $X = \sqrt{Bt}$ ได้จากแหล่งกำเนิดที่เป็นก๊าซออกซิเจนและน้ำ [46]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ รูปที่ 3.2 อัตราการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

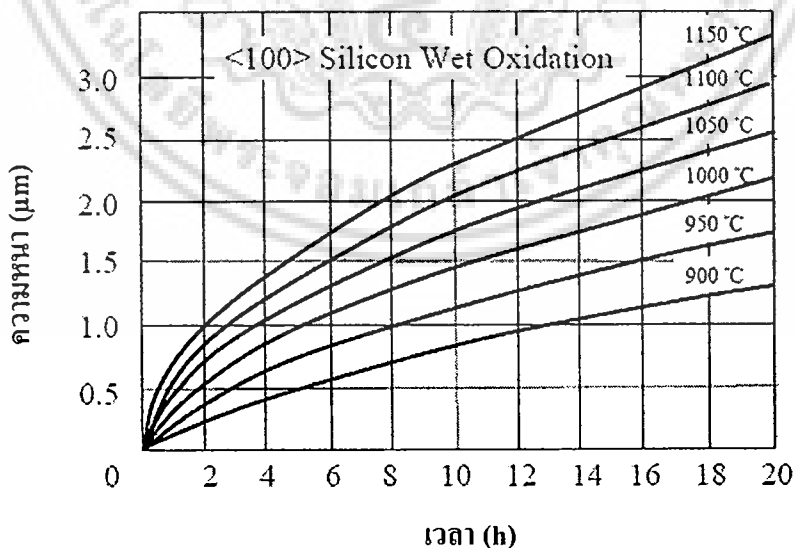
โดย X คือ thickness, A คือ encapsulate the properties of the reaction, B คือ the oxide layer และ t คือ time [45]

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งมีกระบวนการเกิด [46] คือ



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งกับอุณหภูมิและเวลา

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบเปียกมีกระบวนการเกิด [46] คือ



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบเปียกกับอุณหภูมิและเวลา

สำหรับสีและความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แสดงไว้ในภาคผนวก จ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การสร้างซิลิคอนในไตร

ในกระบวนการสร้างซิลิคอนในไตรได้มาจากการใช้พลาสมาสร้าง โดยทำหน้าที่ป้องกันการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อที่จะใช้เป็นพื้นที่ในการสังเคราะห์เพชรพลาสมา คือการเกิดไอออนของก๊าซที่มีจำนวนโปรตอนและอิเล็กตรอนเท่ากัน หรือประจุที่คล้ายจะเป็นกลางของก๊าซและอนุภาคที่เป็นกลางได้แสดงพฤติกรรมการจับหรือเกาะเกี่ยว [47] นั่นก็คือก๊าซที่เป็นไอออนซึ่งอิเล็กตรอนในอะตอมแยกตัวออกมาจากนิวเคลียส ซึ่งก็คือสถานะที่ 4 [43] โดยสามารถสร้างได้จากขดลวดความร้อนกับการจ่ายศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง, ระบบพลาสมาในเครื่องยิงไอออน (Ion Implanters), ระบบการกระจายของอนุภาค (PVD) ใช้เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้เกิดพลาสมาและความถี่วิทยุ เป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการของ PECVD ซึ่งในงานวิจัยก็ได้ใช้วิธีนี้สำหรับพลาสมาที่ถูกใช้ในกระบวนการเคมีคอนดักเตอร์มีการชนที่สำคัญ 3 อย่าง คือ การชนแล้วเกิดไอออน (การไอออไนเซชัน), การชนแล้วกลับคืนสู่สภาพเดิม (สภาวะกระตุ้นและการรวมตัว), การชนแล้วกระจายออกจากกัน (การแยกตัว) [43]

1. การชนแล้วเกิดไอออน เมื่ออิเล็กตรอนชนกับอะตอมหรือโมเลกุล ตัวมันจะส่งพลังงานบางส่วนไปให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรนิวเคลียสถ้าอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรได้รับพลังงานเพียงพอที่จะสามารถทำให้หลุดจากนิวเคลียสได้ เรียกกระบวนการนี้ว่า Electron-impact ionization

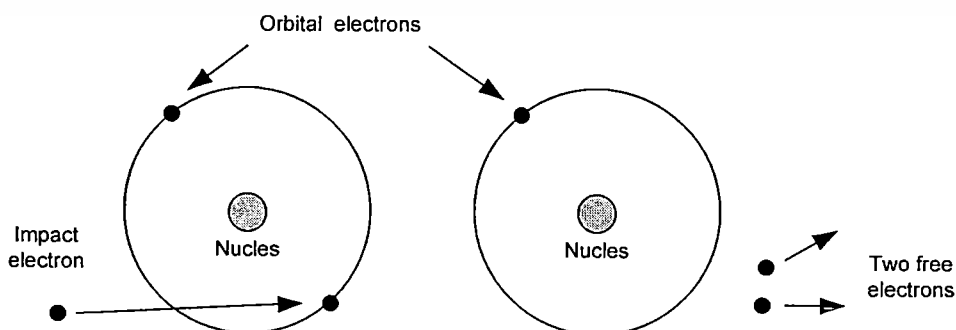


e^- คืออิเล็กตรอน

A คืออะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง

A^+ คือไอออนบวก

การไอออไนเซชันเป็นสิ่งที่สำคัญเพราะจะเป็นตัวกำเนิดและรักษาพลาสมา



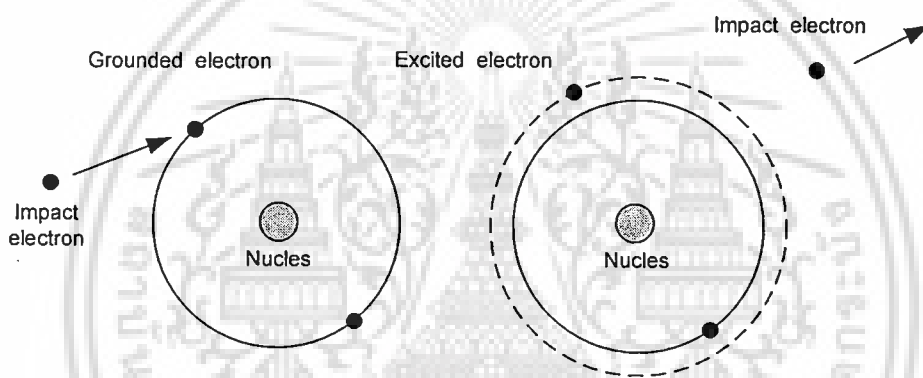
รูปที่ 3.5 ก่อนและหลังการชนของอิเล็กตรอนและอะตอมที่เป็นกลางแบบไอออไนเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การชนแล้วกลับคืนสู่สภาพเดิม บางครั้งอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรก็ไม่ได้รับพลังงานเพียงพอจากอิเล็กตรอนที่เข้ามาชนเพื่อที่จะหลุดเป็นอิสระจากนิวเคลียส แต่ถ้าการชนมีการส่งผ่านพลังงานมากพอทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรกระโดดข้ามพลังงาน ไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นกระบวนการนี้เรียกว่าสถานะกระตุ้น

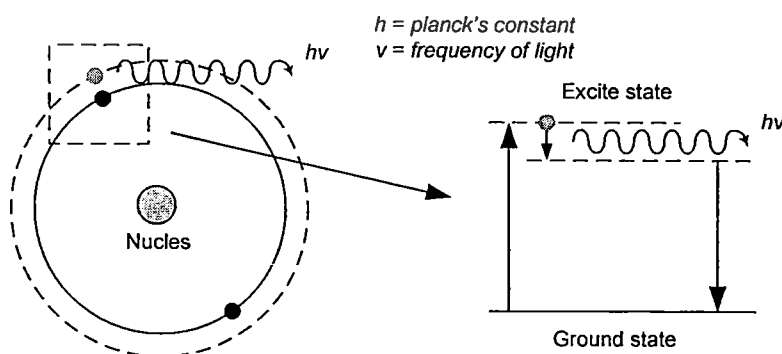


A^* คือสถานะที่ A ถูกกระตุ้น คืออะตอมหรือโมเลกุลมีอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น สถานะที่ถูกกระตุ้นนี้จะไม่เสถียรภาพและมีช่วงเวลาชีวิตที่สั้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรที่ถูกกระตุ้นจะไม่สามารถรักษาระดับพลังงานที่สูงไว้ได้นานและจะตกลงมาในวงโคจรเดิม



รูปที่ 3.6 ก่อนชนและหลังชนของอิเล็กตรอนและอะตอมที่เป็นกลางแล้วกลับคืนสู่สภาพเดิม

อะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นจะมีการรวมตัวอย่างรวดเร็วและกลับคืนสู่สถานะเดิม และปล่อยพลังงานออกมาอย่างมากมายในรูปแบบของแสงซึ่งเป็นพลังงานที่ได้รับมาจากอิเล็กตรอนที่มาชน



รูปที่ 3.7 กระบวนการกลับคืนสู่สถานะเดิมของอะตอมที่ถูกชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารพลังงานนิวเคลียร์เพื่อการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น เมื่อถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$h\nu$ คือพลังงานโฟตอน

h คือค่าคงที่ของพลังค์

ν คือความถี่ของแสงที่ปล่อยออกมา

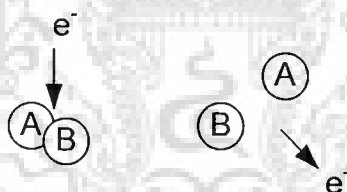
ดูจากสีของแสงที่ปล่อยออกมาจากพลาสมา ความแตกต่างของของอะตอมหรือโมเลกุลที่มีโครงสร้างวงโคจรและระดับพลังงานที่ต่างกันทำให้แสงที่ปล่อยออกมามีความถี่ที่แตกต่างกัน

3. การชนแล้วกระจายออกจากกัน เมื่ออิเล็กตรอนชนกับโมเลกุลก็จะทำลายพันธะทางเคมีและก่อให้เกิดเป็นธาตุเดี่ยว ถ้ามีพลังงานมากพอก็จะชนโมเลกุลที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวทางโมเลกุลสูงได้อธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้



AB คือ โมเลกุล

A, B คือธาตุเดี่ยวที่เกิดจากการชนแล้วแยกออกจากกัน



รูปที่ 3.8 กระบวนการแยกตัวของธาตุเมื่อถูกอิเล็กตรอนเข้าชน

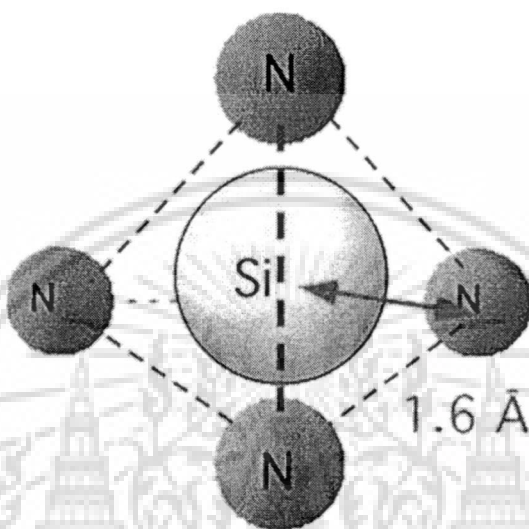
ธาตุเดี่ยวคือโมเลกุลที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งยังมีอิเล็กตรอนที่ยังไม่ได้จับกับธาตุอื่น ตัวมันจะไม่เสถียร ธาตุเดี่ยวอิสระนี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีที่รุนแรง โดยมีแนวโน้มที่จะไปจับอิเล็กตรอนจากอะตอมหรือโมเลกุลอื่นที่เสถียร โดยธาตุเดี่ยวอิสระนี้สามารถที่จะทำปฏิกิริยาเคมีในกรณีที่ทำให้การกัดกร่อนหรือกระบวนการ CVD ตัวอย่างของสารประกอบออกซิเจนกับธาตุกลุ่มอื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F, SiH₂, O จะทำปฏิกิริยาที่รุนแรงซึ่งเป็นเหตุผลที่พลาสมาจะใช้ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการ CVD และการสกัด

ทั้งสามกระบวนการหลักจะเกิดขึ้นในกระบวนการสร้างซิลิคอนไนไตร และจะใช้แหล่งจ่ายเป็นก๊าซไซเรนกับก๊าซไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดังนี้คือ [48] [49]



รูปที่ 3.9 พันธะระหว่างซิลิคอนกับไนโตรเจน

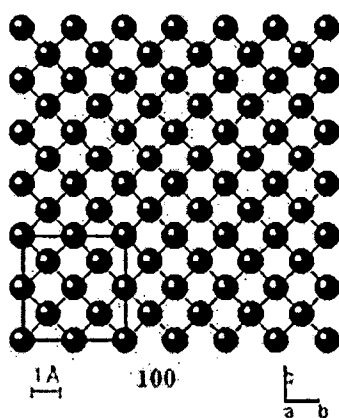
สำหรับสีและความหนาของชั้นซิลิคอนไนไตรแสดงไว้ในภาคผนวก จ.

3.2.4 การเตรียมแผ่นฐานรอง

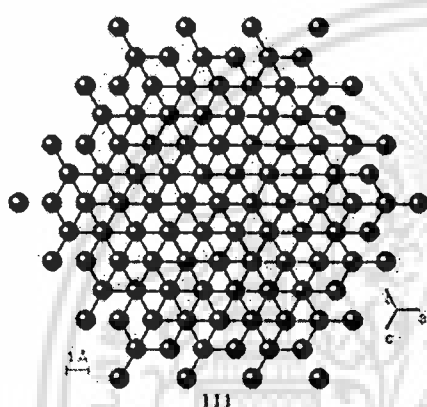
สำหรับการสังเคราะห์เพชรจะมีพื้นผิวที่สามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเพชรบนพื้นผิวของ square (100), triangular (111), less well-defined (110) [50] ดังรูปที่ 3.10 โดยการเกิดเพชรในแต่ละระนาบจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและองค์ประกอบของก๊าซ โดยระนาบ 100 เป็นระนาบที่เกิดเพชรที่เรียบที่สุด

การสังเคราะห์เพชรในการวิจัยนี้ ได้กำหนดฐานรองในการสังเคราะห์เพชรเป็นซิลิคอน เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ ก่อนที่จะนำฐานรองไปใช้ในการสังเคราะห์เพชรนั้นต้องมีการเตรียมฐานรองก่อน โดยขัดด้วยครีมเพชรที่มีผงเพชรขนาด 0.25 μm การขัดฐานรองจะขัดในลักษณะวนไปรอบๆ เป็นเวลาประมาณ 20 min หลังจากขัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำแผ่นไปทำความสะอาด โดยเพชรจะถูกสร้างลงฐานรองซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรสาเหตุที่ต้องขัดผิวหน้า เพื่อให้ง่ายต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชร โดยการเกิดเพชรจะเริ่มตั้งแต่ที่รอยขัดก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ

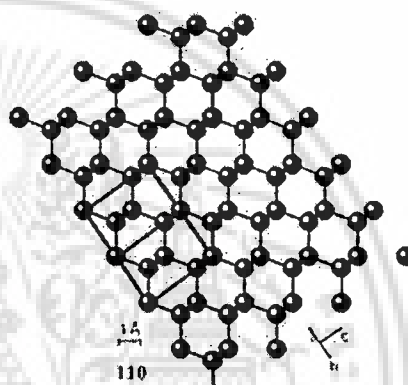
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The diamond 100 surface



The diamond 111 surface



The diamond 110 surface

รูปที่ 3.10 ระนาบของเพชร

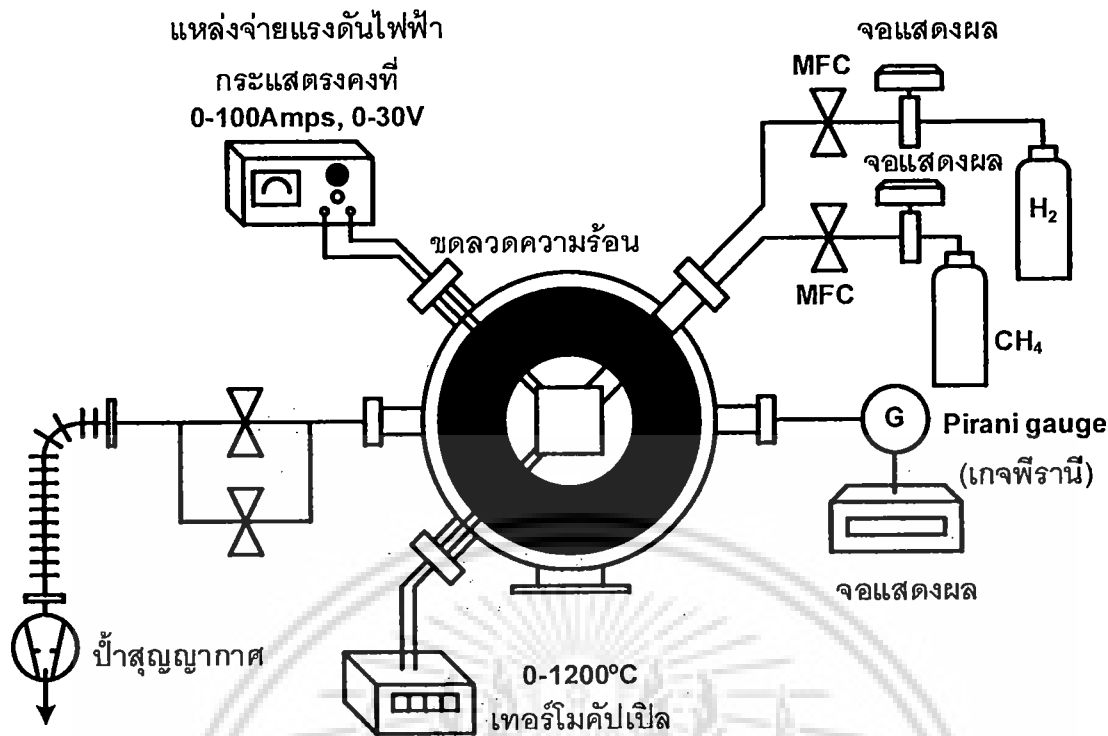
3.2.5 กระบวนการสังเคราะห์เพชร

เพชรได้สังเคราะห์พื้นฐานรองชนิดคอนด้วยระบบ HFCVD ดังรูปที่ 3.11 โดยใช้ก๊าซมีเทนกับก๊าซไฮโดรเจน สำหรับสังเคราะห์เพชรชนิดอินทรินซิก

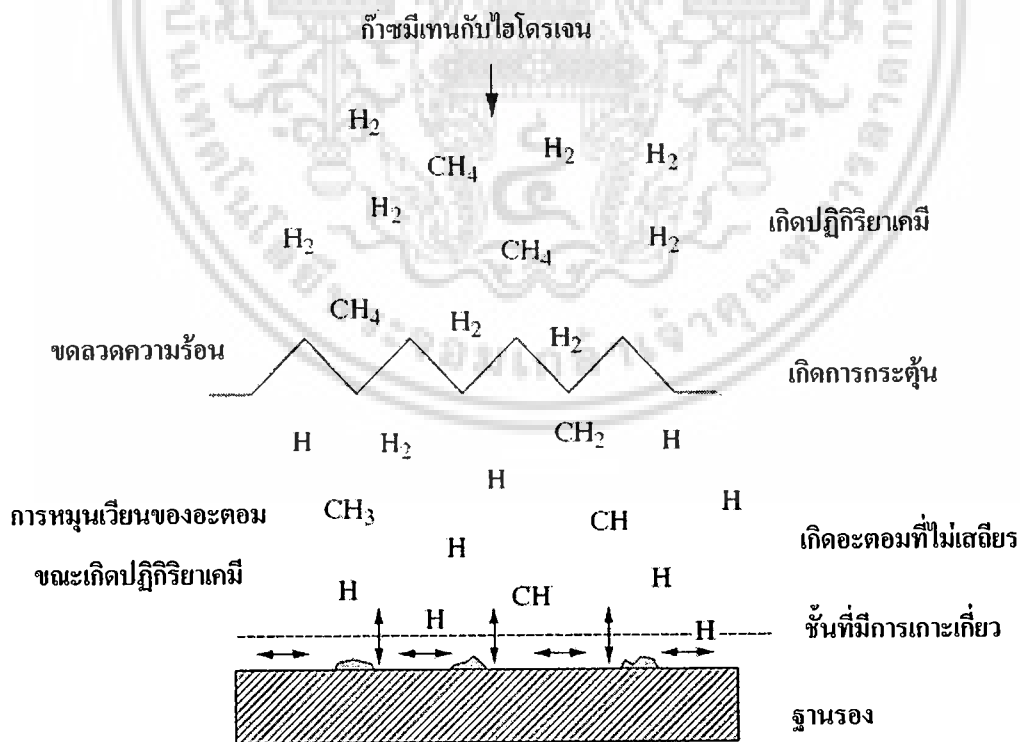
จากรูปที่ 3.12 เป็นกระบวนการผสมกันของก๊าซมีเทนกับก๊าซไฮโดรเจนในห้องทำปฏิกิริยาก่อนที่จะถูกกระตุ้นโดยขดลวดและไปเกาะเป็นเพชรบนฐานรอง เมื่อก๊าซถูกกระตุ้นจากความร้อนจะเกิดการแตกตัวและการของ โมเลกุลกลายเป็นธาตุเดี่ยวและอะตอม และจะมีการสร้างไอออนและอิเล็กตรอนขึ้นมา โดยก๊าซที่มีการแตกตัวจะไปเกาะกับผิวที่ฐานรองหากไม่เกาะที่ฐานรองก็จะมีกรรมรวมตัวของก๊าซคืนสู่สภาพเดิม หากเงื่อนไขเหมาะสมก็จะมีเกาะเกี่ยวของ โมเลกุลกลายเป็นเพชร โดยก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการเกิดเพชร [51]

สำหรับเงื่อนไขการสร้างเพชรที่ใช้งานโดยมีอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซมีเทน 200 : 2 sccm, ความดัน 50 torr, กำลังไฟฟ้า 1,250 W, อุณหภูมิที่ฐานรอง 850 °C, เวลา 8 h, ได้ความหนาประมาณ 7 μm ในขณะที่ทำการสร้างหากเงื่อนไขไม่เหมาะสมก็อาจเกิดเพชรได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



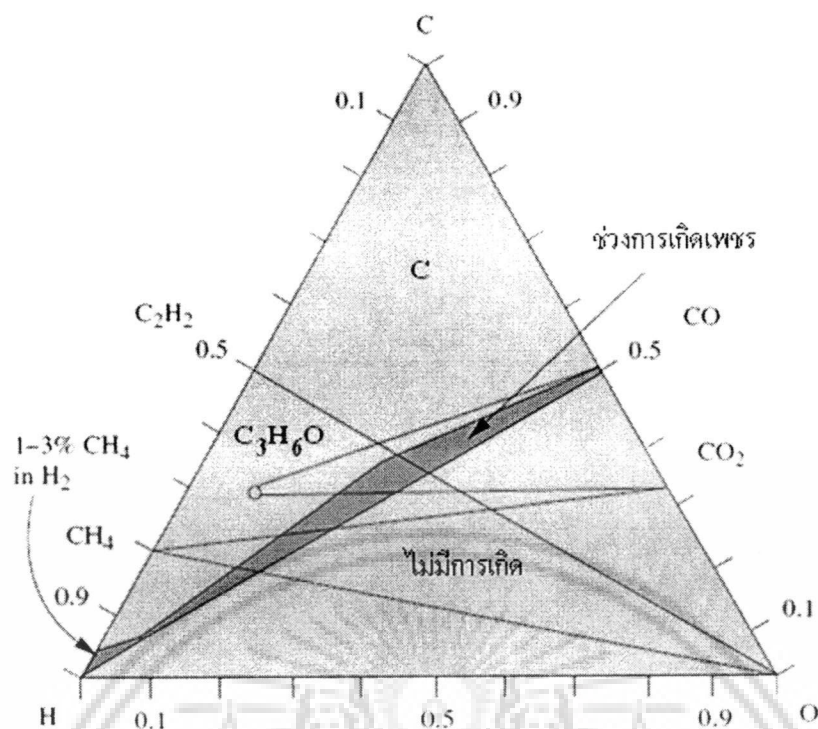
รูปที่ 3.11 ระบบ HFCVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์เพชร



รูปที่ 3.12 กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีการเกาะเกี่ยวของคาร์บอนที่เกิดขึ้น

ขณะที่อยู่ในห้องทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ไดอะแกรมสามเหลี่ยม C-H-O Bachmann

สำหรับไดอะแกรมสามเหลี่ยม C-H-O Bachmann ในรูปที่ 3.13 จะมีเงื่อนไขที่เหมาะสมในการที่จะเกิดเพชรก็คือช่วงแถบเข้ม และมีกระบวนการเกาะเกี่ยวของ C-H ดังนี้

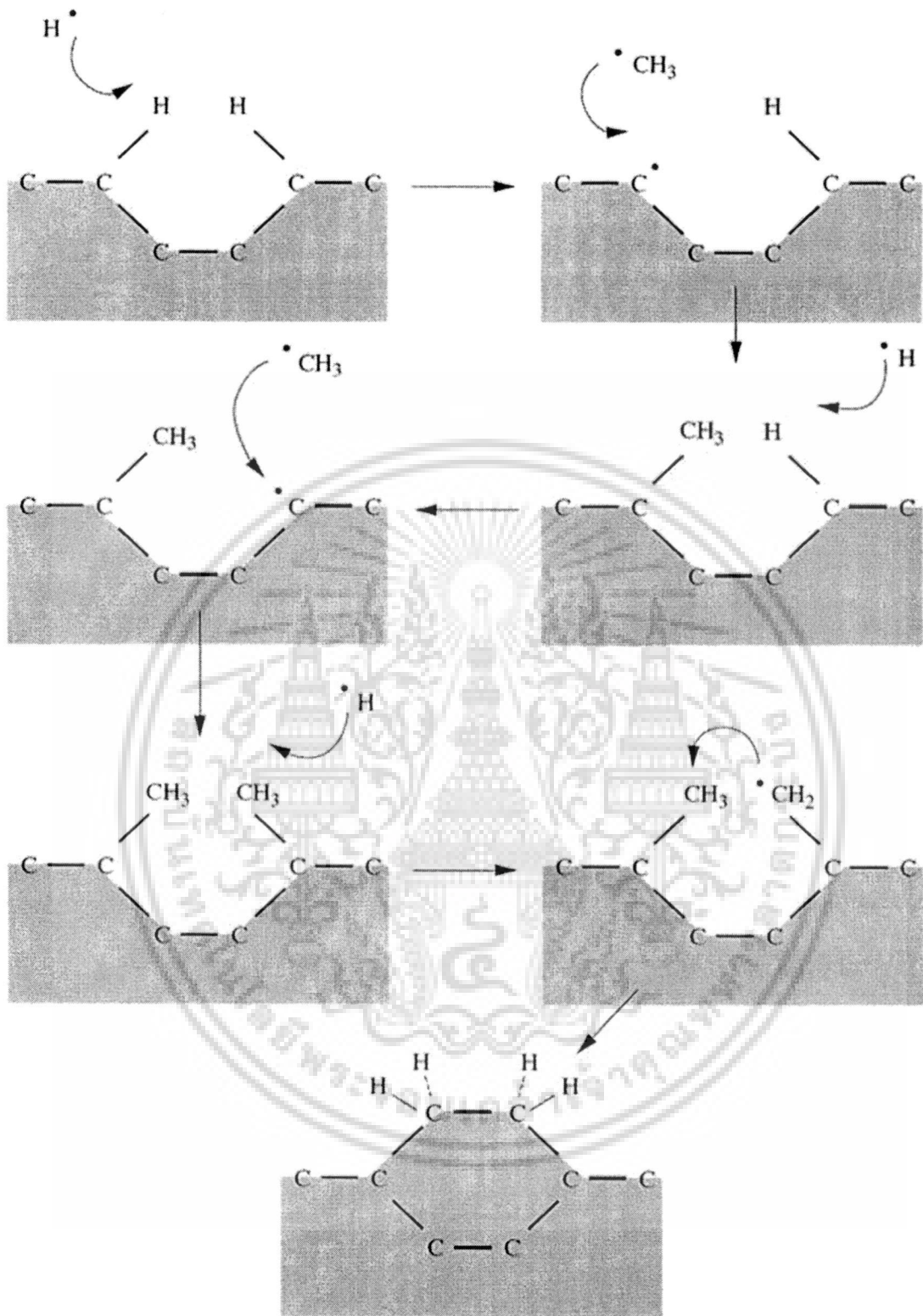
1. ถึงแม้ว่าโครงสร้าง sp^3 เป็นเพชรที่เกาะเกี่ยวกันเต็มแขนแล้วก็ตาม แต่ก็ยังมีอะตอมไฮโดรเจน ที่เกาะอยู่ที่ปลายแขนของคาร์บอนทำให้เป็นกราฟไฟต์ sp^2 ซึ่งจะทำให้ แลตทิซโครงสร้าง sp^3 ของเพชรเสถียร ดังนั้นในช่วงระหว่างการเกิดเพชรอะตอมไฮโดรเจน ที่เกาะอยู่ที่ปลายแขนของคาร์บอนก็จะต้องถูกดึงออกโดยอะตอมไฮโดรเจน ที่เป็นไอออน

2. อะตอมไฮโดรเจน ที่เป็นไอออนทำหน้าที่ในเอกร้าไฟท์ออก ซึ่งมีปฏิกิริยาที่รุนแรงกว่าโครงสร้าง sp^3 ของเพชร ที่จะมากเกาะเกี่ยว อาจจะทำให้อะตอมไฮโดรเจน ที่เป็นไอออน อีกด้วนมาเกาะแทน ความหมายก็คืออาจมี 5 ครั้งที่จะอะตอมไฮโดรเจนที่เป็นไอออนมากระทำที่กราฟไฟท์ และมี 4 ครั้งที่จะอะตอมไฮโดรเจนกลับมารวมตัวเหมือนเดิมเป็นกราฟไฟท์ และมี 1 ครั้งที่มีการเกิดการเกาะเกี่ยวกลายเป็นเพชรผลก็คือการเกิดเพชรที่ช้าลง

3. อะตอมไฮโดรเจน จะทำหน้าที่ไม่ให้เกิด การเกาะเกี่ยวของอะตอมไฮโดรเจน ที่ยาวเกินไป โดยจะทำหน้าที่ในการทำลายพันธะของอะตอมไฮโดรเจน ที่เกาะกับเพชรที่ฐาน เพราะหากมีการเกาะเกี่ยวของ อะตอมไฮโดรเจน ที่ยาวเกินไป จะทำให้ไม่สามารถเกิดการเกาะเกี่ยวของเพชรได้หรือเกิดเพชรได้ยาก

4. อะตอมไฮโดรเจน จะทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของก๊าซมีเทนที่เป็นกลางก็จะได้โมเลกุล CH_4 ที่เป็นไอออน (CH_4^+) ก็จะสามารเกาะเกี่ยวกับผิวคาร์บอนที่ฐานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 กระบวนการที่ปรากฏบนผิวที่ฐานของการเกาะเกี่ยวกันของโมเลกุล CH_3
และการขยายตัวของเพชรบนฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

3.2.6.1 สารไวแสงและเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี

โดยทั่วไปแล้ว คำว่า ลิโธกราฟี (lithography) หมายถึง การพิมพ์ภาพด้วยแม่พิมพ์ เรียบที่เป็นหินหรือโลหะ แต่ในกระบวนการสร้างวงจรรวม เทคนิคของโฟโตลิโธกราฟี หมายถึง เทคนิคการสกัด (Etching) ชั้นสารหรือวัสดุใดๆ ซึ่งส่วนใหญ่มักได้แก่ซิลิคอน ไดออกไซด์ ในบางส่วนหรือในบริเวณที่ต้องการ โดยอาศัยเทคนิคทางแสง (Optical Technique) ซึ่งคล้ายเทคนิคในการถ่ายภาพหรือพิมพ์ภาพ (Printing) เพราะการที่ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์บนแผ่นซิลิคอน บางส่วน ถูกสกัดหรือละลายออกไปด้วยสารเคมีที่ทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้เป็นภาพหรือลวดลาย ชั้นบนชั้นของซิลิคอน ไดออกไซด์เหมือนกับ การใช้เลื่อยฉลุ ทำการฉลุไม่เป็นลวดลายต่างๆ หรือการแกะสลัก หรือการสกัดแผ่นหิน เพื่อให้ปรากฏภาพหรือลวดลายขึ้นนั่นเอง

ในงานของอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ที่เรียกว่า “ไมโครอิเล็กทรอนิกส์” ชั้นส่วนของสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ จะมีขนาดที่เล็กมาก มีขนาดเป็นไมโครเมตร ดังนั้นการประดิษฐ์หรือการสร้างที่มีขนาดเล็กเช่นนี้ ไม่สามารถทำได้ด้วยอุปกรณ์หรือเครื่องมือปกติทั่วไป เช่น การแกะสลักหิน อาจใช้ค้อนใช้สิ่ว การสกัดหรือแกะสลัก แต่ถ้าเป็นภาพที่มีขนาดเล็กเป็นไมโครเมตร คงไม่สามารถใช้อุปกรณ์เครื่องมือเหล่านี้ได้ ดังนั้นจึงมีวิธีการสมัยใหม่ที่เรียกว่า “การสร้างลวดลายไมโครอิเล็กทรอนิกส์” โดยอาศัยเทคนิคด้านแสง หรือรังสีต่างๆ เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอกซ์ หรือลำแสงเลเซอร์ หรือลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ร่วมกับการใช้ภาพต้นแบบ และสารไวแสงหรือน้ำยาไวแสง (Photo sensitive film) เช่น น้ำยาไวแสงชนิดต่างๆ ทำการพิมพ์ภาพต่างๆ ลงบนชั้นวัสดุ เช่นซิลิคอน ซิลิคอนไดออกไซด์ หรืออะลูมิเนียม เป็นต้น ชั้นสารต่างๆเหล่านี้จะถูกสกัดโดยปฏิกิริยาเคมี จากสารเคมีบางชนิด ทำให้เกิดเป็นภาพหรือลวดลายขนาดเล็กๆ ได้ วิธีการหรือเทคนิคดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี” หรือบางครั้งเรียกสั้นๆ ว่า “กระบวนการโฟโตเอตซิงค์” ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการสร้างวงจรรวม โดยใช้เพื่อการเปิดออกไซด์ (ซึ่งเป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือไม่ให้เข้าไปในซิลิคอน) ในบางส่วนบางบริเวณที่ประสงค์จะแพร่อะตอมสารเจือเข้าไป เพื่อให้เกิดเป็นส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์หรือส่วนต่างๆของวงจรรวม ดังนั้นก่อนการแพร่อะตอมสารเจือทุกครั้งจำเป็นต้องใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี นอกจากนี้อาจนำมาใช้กับการสกัดชั้นของโลหะอะลูมิเนียมให้เกิดเป็นลวดลายของแถบตัวนำ เพื่อเชื่อมโยงชิ้นส่วนต่างๆที่สร้างขึ้นในชั้นผลึกซิลิคอนให้ต่อร่วมกัน เป็นวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่สมบูรณ์ ซึ่งวิธีการนี้ถูกเรียกว่า “การเชื่อมต่อภายใน” (Interconnection) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการสร้างวงจรรวม นอกจากนี้ยังนำมาใช้กับชั้นคอนตันอื่นๆ ในกระบวนการสร้างวงจรรวมได้ และกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีนี้ถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญของเทคโนโลยีวงจรรวม เพราะการเปิดช่องชั้นของซิลิคอนได

ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ขนาดเล็กมากๆ ในระดับไมโครเมตรสามารถทำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นเมื่อแพร์อะตอมสารเจือเข้าไปในผลึกซิลิคอนในบริเวณพื้นที่เล็กๆเช่นนี้ ทำให้เกิดเป็นชั้นส่วนของอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กๆ ได้ การเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ให้สามารถเปิดชั้นออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ ก็หมายถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์นั่นเอง ซึ่งในปัจจุบัน เราสามารถสร้างตัวทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดเล็กมากกว่าหนึ่งไมโครเมตรได้สำเร็จ ซึ่งเราเรียกเทคนิคนี้ว่า “ซับไมครอนเทคโนโลยี” (Submicron Technology) เช่นในวงจรระดับ VLSI ซึ่งในพื้นที่ประมาณ 1 cm^2 จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์มากกว่า 1 ล้านตัว นั่นแสดงให้เห็นว่าทรานซิสเตอร์ในวงจรมีขนาดเล็กมาก

3.2.6.2 นำยาไวแสงหรือสารไวแสง (Photo-resist)

วัสดุซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ก็คือสารไวแสง หรือนำยาไวแสง (Photo-sensitive) ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถทำปฏิกิริยากับแสงได้ โดยสารไวแสงนี้จะถูกนำมาใช้ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกัน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุใดๆ กับสารเคมีบางชนิดที่เป็นสารกัด (Etchant) เพราะนำยาไวแสงนี้จะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีนั้นๆ คุณสมบัติดังกล่าวถูกนำมาใช้กับการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อการแพร์สารเจือในบางส่วน หากบริเวณใดที่ต้องการให้มีชั้นออกไซด์คงอยู่ก็ใช้นำยาไวแสงนี้ บังหรือปกคลุมไว้ ส่วนบริเวณใดที่ต้องการสกัดหรือละลายชั้นออกไซด์ออก ก็ไม่ต้องมีชั้นสารไวแสงบังไว้ เมื่อนำแผ่นผลึกที่มีชั้นออกไซด์ไปทำปฏิกิริยากับสารตัวกัด ของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เช่น กรดกัดแก้ว (HF) โดยกรดกัดแก้วจะทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ ทำให้บริเวณที่ไม่มีชั้นสารไวแสงบังอยู่ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกกรดละลายออกไปยกเว้นบริเวณที่มีชั้นสารไวแสงบังอยู่ซิลิคอนไดออกไซด์จะคงอยู่ได้โดยไม่ถูกสกัดหรือละลายออกไป การทำหน้าที่ของสารไวแสงเพื่อป้องกันหรือต้านทาน ปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเกิดขึ้นกับชั้นฐานรอง นี้ อาจถูกนำมาใช้เรียกชื่อของสารไวแสงนี้ว่า “ชั้นต้านทานที่ไวแสง” หรือ Photo resist film หรือ Photo resist และนิยามเรียกสั้นๆว่า resist

3.2.6.3 ชนิดของสารไวแสง

ในน้ำ DIยาไวแสงที่นำมาใช้กับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีต่างๆ ไปจะประกอบด้วยสิ่งสำคัญต่างๆ คือวัสดุที่เป็นสารไวแสง (Photo sensitive material) ส่วนที่เป็นสารเคมี (Solvent) และส่วนที่เป็นสารเพื่อช่วยในการยึดติดกับพื้นผิวใดๆ (Epoxy) โดยพิจารณาปฏิกิริยาทางเคมีและแสง (Chemical-Photo reaction) ของวัสดุไวแสงที่มีอยู่ในนำยาไวแสง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญ ทำให้เราสามารถจำแนกนำยาไวแสงออกเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้ 2 ชนิด

1. **น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative Photo resist)** หมายถึงน้ำยาไวแสงที่เมื่อถูกฉายด้วยแสง และมีปฏิกิริยาเคมี-แสง เกิดขึ้นแล้วจะทำคุณสมบัติของการละลายในสารตัวทำละลายหรือที่เรียกง่าย ๆ ว่าน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) เปลี่ยนแปลงไป โดยขณะที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับแสงจะสามารถละลายได้ดีสารตัวทำละลาย แต่เมื่อถูกแสงแล้วจะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป คือ ไม่สามารถละลายได้ น้ำยาไวแสงชนิดลบนี้จะเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ฟิล์มถ่ายรูปทั่วไป ซึ่งภาพที่ปรากฏบนฟิล์มจะมีลักษณะเป็นภาพแบบลบ (Negative image) คือจะมีสภาพตรงข้ามกับภาพต้นฉบับ (เช่น เปลี่ยนจากขาวเป็นดำหรือดำเป็นขาว) หรือถ้าต้องการภาพที่เหมือนต้นแบบจริง จะต้องนำฟิล์มที่ได้ไปพิมพ์ (Print) หรืออัดภาพลงบนกระดาษอัดภาพอีกครั้งหนึ่ง จึงจะได้ภาพที่เหมือนต้นแบบ ผลของปฏิกิริยาเคมีแสงของน้ำยาไวแสง ซึ่งจะให้ภาพแบบลบดังกล่าวนี้ทำให้ถูกเรียกว่าน้ำยาไวแสงชนิดลบ

2. **น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photo resist)** น้ำยาไวแสงชนิดนี้ จะประกอบด้วยวัสดุสารไวแสง (Photo sensitive) ซึ่งมีคุณสมบัติปฏิกิริยาเคมี-แสง ที่แตกต่างกับกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ โดยให้ผลตรงข้ามกล่าวคือ เมื่อยังไม่ถูกแสงหรือเมื่อไม่มีปฏิกิริยากับแสง จะมีคุณสมบัติไม่ละลายในตัวทำละลายหรือน้ำยาล้างฟิล์ม แต่เมื่อถูกแสงหรือมีปฏิกิริยาแล้ว คุณสมบัติจะเปลี่ยนไปคือสามารถละลายน้ำได้ดีในน้ำยาล้างฟิล์ม น้ำยาไวแสงชนิดนี้จะมีคุณสมบัติเหมือนฟิล์มสไลด์ หรือฟิล์มภาพยนตร์ ซึ่งจะให้ภาพบนฟิล์มมีลักษณะที่เป็นภาพแบบบวก (Positive image) ซึ่งเป็นภาพจริงเหมือนกับภาพต้นแบบ (คือขาวหรือดำเหมือนต้นแบบ) ดังนั้นจึงเรียกน้ำยาไวแสงชนิดนี้ว่าน้ำยาไวแสงชนิดบวก

ในงานการสร้างวงจรรวม สามารถใช้น้ำยาไวแสงได้ทั้งชนิดบวกและชนิดลบ และคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำยาไวแสงก็คือความละเอียด (Resolution) ซึ่งอาจหมายถึงความละเอียดของภาพที่สามารถทำได้ สำหรับงานวงจรรวมระดับสูงที่มีขนาดเล็กมากๆ น้ำยาไวแสงนอกจากนี้ ปัจจัยภายนอกที่เกี่ยวข้องกับความละเอียดของภาพ ก็คือชนิดของแสงที่ใช้ เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต ที่ความถี่ต่างๆ รังสีเอกซ์หรือลำอิเล็กตรอน โดยที่แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะสามารถทำให้ภาพที่มีความละเอียดสูง เป็นต้น น้ำยาไวแสงที่มีขายตามท้องตลาดและใช้ในการสร้างวงจรรวมมีมากมายหลายชนิด ซึ่งแต่ละบริษัทผู้ผลิตจะใช้ชื่อเฉพาะทางการค้าและมีคุณสมบัติต่างๆ กัน

3.2.6.4 เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวมเพื่อการสกัด ชั้นซิลิคอนออกไซด์บางส่วนของเซลล์อยู่บนผิวผลึกซิลิคอน เพื่อแพร่อะตอมของสารเจือ เข้าไปในผลึกซิลิคอนทำให้เกิดส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทผู้ผลิตและใช้เฉพาะทางการค้าและมีคุณสมบัติ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวหน้าด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสงจากนั้นนำไปฉายแสง โดยผ่านกระจกฉายด้วยต้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโตมาสก์ (Photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบมีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจกซึ่งได้มากจากการออกแบบ (Design) แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์จะสามารถทะลุผ่านไปเฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสง จึงมีบางบริเวณที่ถูกแสงและบางบริเวณไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้นจะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง ซึ่งเมื่อผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไปบางส่วนจะคงเหลือค้าง อยู่บริเวณผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ ถูกกัดหรือเอตซิง (Etching) ด้วย “สารตัวกัด” หรือเอตเชนต์ (Etchant) เช่น กรดกัดแก้ว เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนของการเอตเชนต์ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถกัดหรือละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกไปได้ ในที่สุดหลังจากนั้น เมื่อชั้นของน้ำยาไวแสงถูกลอกออก ก็จะปรากฏภาพหรือลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยที่ลักษณะเป็นลวดลายเหมือนกับลวดลายบนกระจกโฟโตมาสก์ การเกิดภาพลวดลายได้ก็เพราะชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนถูกกัดกันออกไปนั่นเอง คล้ายกับการกัดหินลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยทั่วไป

3.2.6.5 ชนิดของโฟโตมาสก์

จากเทคนิคของโฟโตลิโธกราฟี จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่ดีของกระจกโฟโตมาสก์ก็คือ จะต้องสร้างวัสดุโปร่งแสงหรือวัสดุที่ยอมให้แสงผ่านได้ดีและจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำๆ นอกจากนี้จะต้องเป็นวัสดุที่แข็งแรง เรียบ และทนทานไม่เกิดความผิวยื่นของรอยลวดลายของวงจรรวมซึ่งมีขนาดเล็กมาก ซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้และถูกนำมาใช้งาน ได้แก่ แก้วควอทซ์ หรือแก้วโบโรซิลิเกตชนิดพิเศษ (Borosilicate) สำหรับวัสดุที่เป็นลวดลาย หรือส่วนดำทึบแสง บนแก้วควอทซ์หรือกระจกแก้วควอทซ์ จะต้องมีคุณสมบัติไม่ให้แสงผ่านได้ ซึ่งอาจจะเป็นวัสดุที่สามารถสะท้อนแสงได้ดีหรืออาจจะเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนแสงหรือรังสีได้ดี วัสดุที่นำมาใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่ น้ำยาไวแสงซึ่งมีลักษณะสีดำ ทึบแสงและโลหะโครเมียมหรือเหล็กออกไซด์ ก็ถูกนำมาใช้เช่นกัน เพราะสามารถสะท้อนแสงได้ดี และมีความทนทานสูง โดยเฉพาะในงานวงจรรวมที่มีภาพลายละเอียดหรือเล็กมากๆ เช่น VLSI

จากการพิจารณาความแตกต่างของวัสดุที่นำมาใช้ป้องกันแสง เราอาจจัดแบ่งชนิดของโฟโตมาสก์ได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. **ซอฟต์มาสก์ (Soft mask)** เป็นมาสก์บริเวณที่บแสงจะใช้หน้ายาไวแสงหรือฟิล์มไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงและไม่ให้แสงทะลุผ่าน ปกตินิยมใช้ในงานการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆไป รวมทั้งวงจรรวม และงานประเภทวิจยเพราะมีราคาถูก และสามารถสร้างได้ง่าย แต่ข้อเสียก็คือ เสียหาย หรือมีรอยขีดข่วนง่าย มีความทนทานน้อยกว่าแบบเมทัลมาสก์

2. **ฮาร์ดมาสก์ (Hard mask)** เป็นมาสก์บริเวณที่บแสงจะใช้โลหะที่สามารถสะท้อนได้ดี แสงจึงไม่สามารถผ่านไปได้ วัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ โครเมียม (Cr), โครเมียมไดรอกไซด์ (Cr_2O_3) หรือเหล็กไดรอกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งสารแต่ละชนิด จะมีคุณสมบัติที่มีความแตกต่างกัน และมีการใช้งานต่างกัน มาสก์ชนิดนี้จะมีความแข็งแรง และทนทาน จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดสูงๆ เช่นวงจรรวมระดับ VLSI และในงานอุตสาหกรรม ซึ่งต้องการมาสก์ที่มีอายุการใช้งานสูง นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาโฟโต้มาสก์ที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น โดยการนำเอาสารสองชนิดมาทำเป็นฟิล์มซ้อนกันหลายชั้น เช่น โครเมียมกับโครเมียมไดรอกไซด์ จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่า เมทัลมาสก์แบบธรรมดาเราเรียกโฟโต้มาสก์ชนิดนี้ว่า Compound Mask

3.2.6.6 การเคลือบหน้ายาไวแสงบนแผ่นผลึก

1. **การเตรียมผิวหน้าแผ่นผลึก** โดยปรกติแล้วหน้ายาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึก ก่อนที่จะเคลือบหน้ายาไวแสงบนผิวสารต่างกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามผิวที่มีการใช้งานมากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้นหรือโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพราะโดยปกติผิวของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ จะมีการดูดซึมน้ำหรือความชื้นจากอากาศได้ดี การกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า ดีไฮเดรชันเบค (dehydration bake) ที่ใช้อุณหภูมิราว 200 °C ถึง 250 °C ใช้เวลา 30 min ภายหลังจากการอบ ถ้าหากมีการนำออกมาทิ้งไว้นานเกิน 60 min ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ก็จะดูดความชื้นเข้าไปอีก จำเป็นจะต้องอบใหม่ใช้กระบวนการเดิมอีกที ดังนั้น เมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการ เคลือบหน้ายาไวแสงต่อไปทันที นอกจากนี้ก่อนที่เคลือบหน้ายาไวแสงอาจจะใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexa Methyl Disilazane (HMDS) ฉีดพ่นหรืออบไอรระเหยเพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับหน้ายาไวแสงได้ดีขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัด โมเลกุลของน้ำออกจากผิวของซิลิคอนไดออกไซด์โดยทั่วไปในเครื่องสปินเนอร์จะมีหัวฉีดสเปรย์ของสาร HMDS แล้วปั่นหรือหมุนแห้งจากนั้นเคลือบหน้ายาไวแสง

วิธีการเคลือบชั้นหน้ายาไวแสง ลงบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์หรือชั้นวัสดุอื่นๆ ที่อยู่ทีผิวด้านบนนั้นสามารถกระทำได้หลายวิธี ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมหรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้

1. แบบสปินเนอร์ (Spinner) เป็นวิธีที่นิยมใช้งานมากที่สุดสำหรับการเคลือบ น้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกวงกลมการเคลือบชั้นน้ำยาไวแสงวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าตัวหมุน หรือสปินเนอร์โดยที่มีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึก จะถูกวางบนแท่นหมุนและถูกยึดติดแท่นหมุนด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นน้ำยาไวแสงจะถูกหยด ลงบริเวณตรงกลางของแผ่นผลึกด้วยปริมาณที่พอเหมาะ เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (Spin) ด้วยความเร็ว รอบ 3000 round/min ถึง 6000 round/min ใช้เวลาประมาณ 10 s ถึง 30 s น้ำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบๆ เป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก ความหนาของฟิล์มสารไวแสงที่ได้ มีค่าทั่วไปประมาณ 1000 Å ถึง 2000 Å ถ้าความเร็วรอบต่ำเกินไป ชั้นของน้ำยาไวแสงจะมีความหนามาก แต่ถ้าความเร็วรอบสูงๆ ความหนาของชั้นน้ำยาไวแสงจะไม่เท่ากัน โดยทั่วไปบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะมีความหนามาก ในขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังฝุ่นเป็นพิเศษ ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงทำภายในห้องสะอาด (clean Room) ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศในห้องนี้ จะถูกควบคุมให้มีขนาดเล็ก และจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยการใส่ระบบกรองฝุ่นแบบพิเศษใส่ กรองฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter) ระดับความสะอาดจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนฝุ่น ละอองในอากาศ โดยปกตินิยมใช้ค่าความหนาแน่น ของฝุ่นละอองขนาด 0.5 μm ในปริมาตร 1 m^3 เป็นมาตรฐาน ค่าระดับความสะอาดของห้องสะอาดดังในตารางที่ 3.1 [52] [53]

ตารางที่ 3.1 ค่ามาตรฐาน Clean Room ของ Federal Standard 209E, 1992 / ISO14644-1

SI	ISO 14644-1	ROOM CLASS	Maximum allowable count per cubic foot of air.(μm)				
			0.1	0.2	0.3	0.5	5
-	Class 1	-	-	-	-	-	-
M1	Class 2	0	-	-	-	-	-
M1.5	Class 3	1	35	7.5	3	1	-
M2.5	Class 4	10	350	75	30	10	-
M3.5	Class 5	100	-	750	300	100	-
M4.5	Class 6	1,000	-	-	-	1000	7
M5.5	Class 7	10,000	-	-	-	10000	70
M6.5	Class 8	100,000	-	-	-	100000	700

2. แบบสเปรย์ (Spray Coating) วิธีนี้น้ำยาไวแสงจะถูกฉีดหรือพ่นออกมาเป็น ละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึกและจึงยึดเกี่ยวกันเป็นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสี สเปรย์ ซึ่งง่ายและสะดวก แต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท การควบคุมความหนาของฟิล์มทำได้ ยากปกติจะใช้งานในการสร้างชั้นตอนที่ไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกันชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ด้านล่างของแผ่น

3. แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller coating) การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีแบบใช้ลูกกลิ้งจะนิยมทำในขั้นตอนของการตัดแยกแผ่นผลึกซิลิคอนออกเป็นชิพ (Chip) โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงทั้ง 2 ด้าน เพื่อป้องกันเศษฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่เกิดขึ้นขณะตัดแยกชิพด้วยเลื่อย (Sawing) หรือแสงเลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก

2. การอบขั้น Pro bake หรือ Soft bake หลังจากเคลือบน้ำยาไวแสงแล้วจะต้องนำแผ่นผลึกไปอบ เพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิทก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในขั้นตอนนี้เรียกว่า Pre bake หรือ Soft bake ซึ่งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 90 °C ถึง 100 °C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกจะใช้ที่อุณหภูมิต่ำลงเล็กน้อยที่ 80 °C ถึง 90 °C การอบที่ใช้เวลานานเกินไปหรือที่อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อชั้นน้ำยาไวแสงได้เช่น เกิดปฏิกิริยาเคมี, เกิดปฏิกิริยาความร้อนหรืออาจจะไหม้ได้ การอบมีหลายวิธีที่สามารถกระทำได้ดังนี้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (Convection oven) ซึ่งในตู้อบจะมีใบพัดเพื่อช่วยพัดไอร้อน จากขดลวดความร้อน (Heater) ขึ้นมา แผ่นผลึกจะถูกเก็บไว้ในกล่องพิเศษ และวิธีการให้ความร้อนแบบนี้แผ่นผลึกจะให้ความร้อนจากผิวรอบนอกเข้าไปด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อนเข้าไปข้างใน จะทำให้เกิดการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ ซึ่งเป็นข้อเสียและไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง

สำหรับในสายการผลิตวงจรรวม ในโรงงานอุตสาหกรรม นิยมอบแผ่นผลึกที่ละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการเช่นนี้ ฐานรองที่แผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อน เพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติ ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้นน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้สามารถไล่ความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีการให้ความร้อนเช่นนี้ เรียกว่า “Bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (Hot plate) โดยนำแผ่นซิลิคอนไปวางแผ่นร้อนหรืออาจจะใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อน

3.2.6.7 การปรับซอมนาสก์และการฉายแสง (Mask Alignment and Exposure)

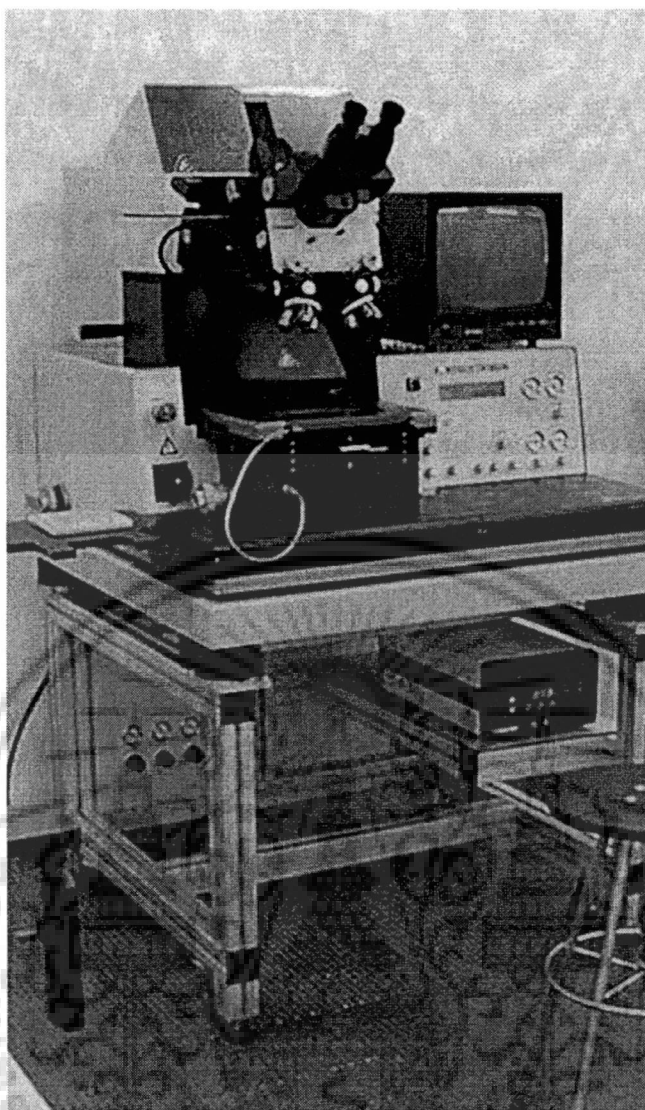
การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาสก์ ซึ่งโดยปกติจะถูกวางทาบทับลงไปบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่กระจกโฟโตมาสก์ชิ้นแรกหรือมาสก์ที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับซอมนาสก์ ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจรรวม บนแผ่นผลึกเลย แต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้นได้ผ่านการสร้างแผ่นวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณที่ถูกต้องเพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

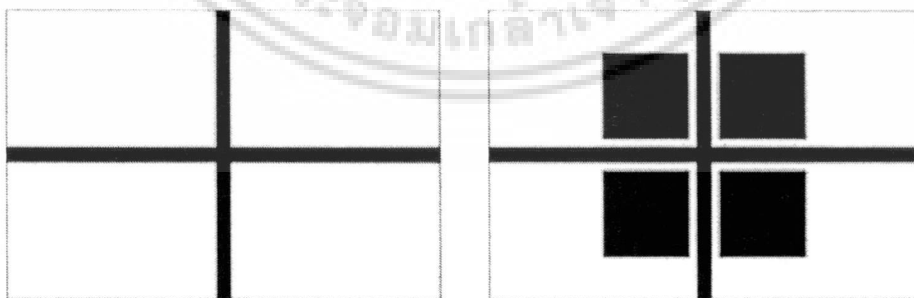
ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาส์กตั้งแต่มาส์กที่ 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับซ้อนมาส์กเพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาส์กซ้อนกันแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ในที่สุดของกระบวนการโฟโวลติโกราฟี จะทำให้สามารถเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งที่ถูกต้อง โครงสร้างของวงจรรวมจึงเป็นไปตามแบบและถูกต้องอย่างไรก็ดี เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซ้อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วยซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับซ้อนมาส์ก” (Mask aligner) ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือ แผ่นผลึกจะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (x-y-z table) ซึ่งสามารถปรับเชิงในแนวนอน (x) แนวตั้งฉาก (y) และแนวสูง (z) ได้ การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้ง แนว x, y และ z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ดังในรูปที่ 3.15 ส่วนกระจกโฟโตมาส์ก จะถูกยึดให้อยู่นิ่งเหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ สังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นละบนโฟโตมาส์ก พร้อมปรับเลื่อนแผ่นผลึกทั้งแกน x, y และมุมจนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกบนโฟโตมาส์กซ้อนกันตรงตำแหน่ง ที่ถูกต้อง จากนั้นจึงปรับให้แผ่นผลึกเลื่อนสูงขึ้นในแกน z จนแนบสนิทกับกระจกโฟโตมาส์ก ในกรณีที่ภาพลวดลายมีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซ้อนภาพนี้จะสามารถทำได้โดยการสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไปภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก นอกจากนี้ยังมีจำนวนมากอีกด้วย จึงเป็นการยากที่จะปรับซ้อนโดยการสังเกตจากภาพลวดลายของวงจรรวม ในทางปฏิบัติเพื่อให้การปรับซ้อนทำได้จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับซ้อนมาส์กโดยเฉพาะ และเรียกว่า “เครื่องหมายปรับซ้อน” (Alignment mark) ดังในรูปที่ 3.15 ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (Square in box), กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากบาท เช่นภาพลวดลายในแผ่นผลึกของ “เครื่องหมายปรับซ้อน” เป็นรูปจัตุรัสและภาพลวดลายบนกระจกมาส์กเป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น

การปรับซ้อนทำได้โดยการปรับเลื่อนแผ่นผลึก บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพ จัตุรัสเข้าไปซ้อนอยู่พอดีภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยม ดังในรูปที่ 3.16 ในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวมในแผ่นผลึก และบนกระจกโฟโตมาส์กจะอยู่ตรงตำแหน่งที่ถูกทุกประการ ถ้าหากปรับซ้อนตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะไม่ถูกต้อง และเกิดการเสียหายได้ขั้นตอนของการปรับซ้อนจึงเป็นเรื่องสำคัญมากการพิมพ์ ด้วยการ ใช้กระจกโฟโตมาส์กมาวางทับลงบนแผ่นผลึกๆ ให้แนบสนิทแล้วฉายแสง ซึ่งเรียกว่าวิธี Contact Printing ดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่าการสัมผัสกันระหว่างแผ่นผลึก และกระจกโฟโตมาส์ก ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยขีดขูดเกิดสิ่งสกปรกหรือความเสียหายต่างๆ ได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีวิธีการพิมพ์แบบอื่นๆ เช่น วิธี Proximity Printing หรือวิธี Projection Printing ซึ่งกระจกโฟโตมาส์ก จะไม่สัมผัส กับผิวหน้าของแผ่นผลึกเลยจึงลดความเสียหายต่างๆที่จะเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



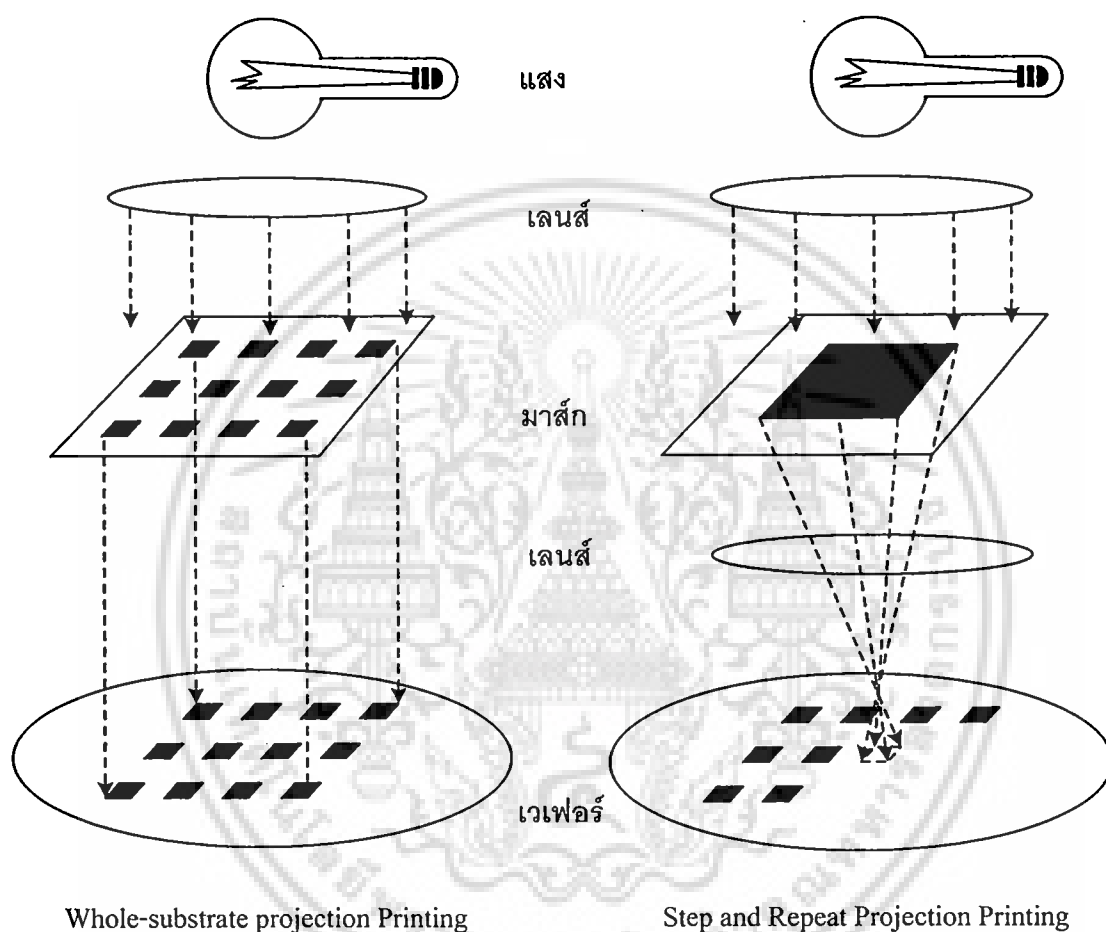
รูปที่ 3.15 เครื่องปรับซ็อนมวลัก



รูปที่ 3.16 ภาพลวดลายเครื่องหมายปรับซ็อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวิธีการ Projection printing อาจทำได้ 2 แบบ Whole-substrate projection printing ซึ่งเป็นการพิมพ์ภาพวงจรรวมลงบนแผ่นผลึกทั้งหมดครั้งเดียว และแบบ Step and Repeat Projection ซึ่งเป็นการพิมพ์ภาพวงจรรวมทีละภาพลงบนแผ่นผลึก ซึ่งการพิมพ์วิธี Projection Printing นี้ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมแต่อุปกรณ์ ที่ใช้จะต้องมีความละเอียดสูงมาราคาของเครื่องค่อนข้างสูง



รูปที่ 3.17 หลักการทำงานของอุปกรณ์ Projection Printing

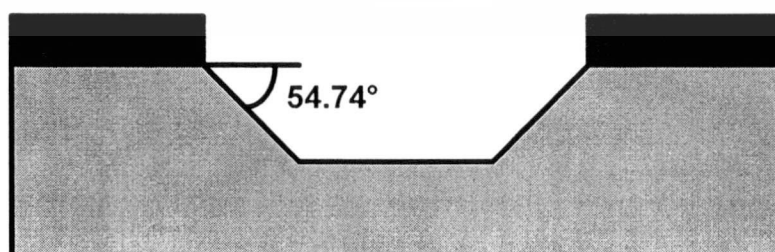
3.2.6.8 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อปรับซ็อนภาพระหว่างกระจกโฟโต้มาส์ก และแผ่นผลึกเรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสงผ่านกระจกโฟโต้มาส์กเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-แสงขึ้นที่ชั้นน้ำยาไวแสงปกติที่น้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น ในช่วง 300 nm ถึง 500 nm ซึ่งก็คือแสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วงและสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการเทคนิคโฟโต้ลิโธกราฟีจึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นเกิน 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ถ้าเป็นฟิล์มถ่ายรูปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องใช้แสงในห้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันโดยทั่วไปได้มาจากหลอดไอปรอท (Mercury Vapor Lamp) ซึ่งหลอดนี้ จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มสูงที่ความยาวคลื่นราว 310 nm, 365 nm, 405 nm และ 440 nm ตามลำดับ และจากการศึกษาพบว่าน้ำยาไวแสงชนิดลบจะมีความไวสูงสุดใกล้กับเส้นสเปกตรัม 365 nm จากสเปกตรัมของแสงความยาวคลื่นประมาณ 400 nm ถูกเรียกว่า Near Ultraviolet wave lengths หรือ Near UV ซึ่งเป็นแสงสำหรับเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี สำหรับความยาวคลื่นที่ต่ำกว่านี้ เราเรียกว่า Far Ultraviolet wave lengths หรือ Far UV จากการศึกษพบว่า การพิมพ์ที่มีขนาดเล็กๆ จำเป็นต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ เช่น ขนาดประมาณ $2\ \mu\text{m}$ ต้องใช้คลื่น Far UV ดังนั้นในวงจรรวมระดับ VLSI ที่มีขนาดอุปกรณ์เล็กราว $1\ \mu\text{m}$ จึงต้องใช้แสงประเภท Far UV ซึ่งมีความยาวคลื่น 100 nm ถึง 200 nm ความสัมพันธ์ของขนาดความละเอียดของวงจรรวม และความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ยิ่งไปกว่านี้ ยังสามารถใช้คลื่นรังสีเอกซ์ และลำอิเล็กตรอน มาใช้แทนแสงได้ด้วย ทำให้สามารถพิมพ์ลวดลายวงจรรวมที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ ซึ่งเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า “เอกซ์เรย์โฟโตลิโธกราฟี” (X-Ray Photolithography) และ Electron-beam lithography ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม น้ำยาไวแสงที่จะต้องใช้อาจแตกต่างจากธรรมดาเพราะรังสีเอกซ์และลำอิเล็กตรอน มีพลังงานสูงกว่าแสง Near UV ที่ใช้น้ำยาไวแสงปกติ

3.2 การสกัดแบบแอนไอโซโทรปิก

การสกัดทางเคมีชนิดแยกแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) เป็นเทคนิคกุญแจสำคัญสำหรับการสร้างตัวอุปกรณ์ระดับไมโครเมตร คุณสมบัติที่สำคัญของการสกัดแบบแอนไอโซโทรปิกคือ มุมป้านที่เกิดจากการสกัด การสกัดแบบเลือกได้ การควบคุมการสกัด และเป็นกระบวนการที่สามารถเข้ากับกระบวนการสร้างแบบปรกติได้ เนื่องจากตัวอุปกรณ์มีความจำเป็นที่ต้องสร้างกับกระบวนการระดับ LSI บนชิปเดียวกันเพื่อให้ได้ตัวอุปกรณ์ตัวใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง ลักษณะการสกัดแบบแอนไอโซโทรปิกของซิลิคอนระนาบ 100 ดังรูปที่ 3.18 [50][54][55]



รูปที่ 3.18 การสกัดแบบแอนไอโซโทรปิกของซิลิคอนระนาบ 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซโทรปิกมีสารเคมีมากมายที่ใช้ในการสกัด สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง โดยจะให้ความสำคัญไปที่สารเคมี KOH, สารเคมี EPD และสารเคมี TMAH เนื่องจากเป็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยที่สารเคมี KOH จะมีข้อเสียที่ไม่สามารถเข้ากับกระบวนการวงจรรวมปรกติได้เนื่องจากมีไอออนของโพแทสเซียม ส่วนสารเคมี EPD ก็จะมีความเป็นพิษแต่ก็ยังมีความเป็นพิษน้อย สำหรับสารเคมี TMAH จะไม่เป็นพิษมากและเข้ากับกระบวนการวงจรรวมปรกติได้ดี

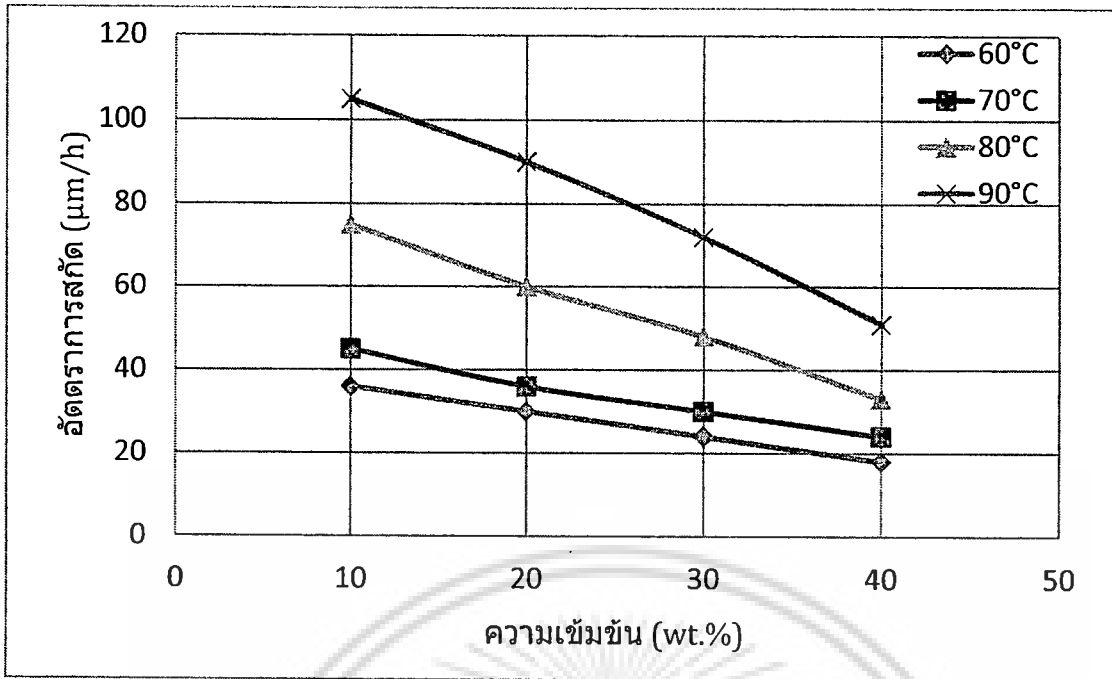
ในการใช้งานทั่วไปเราจะพิจารณาตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ง่ายต่อการใช้งาน
2. ความเป็นพิษ
3. อัตราการสกัด
4. โครงสร้างเคมีที่ใช้ในการสกัด (ระนาบของพื้น)
5. การใช้งานร่วมกับกระบวนการวงจรรวมปรกติ
6. การหยุดการสกัด
7. การสกัดที่สามารถเลือกพื้นที่สกัดได้
8. ความหนาของและวัสดุที่ใช้ในการป้องกันการสกัด

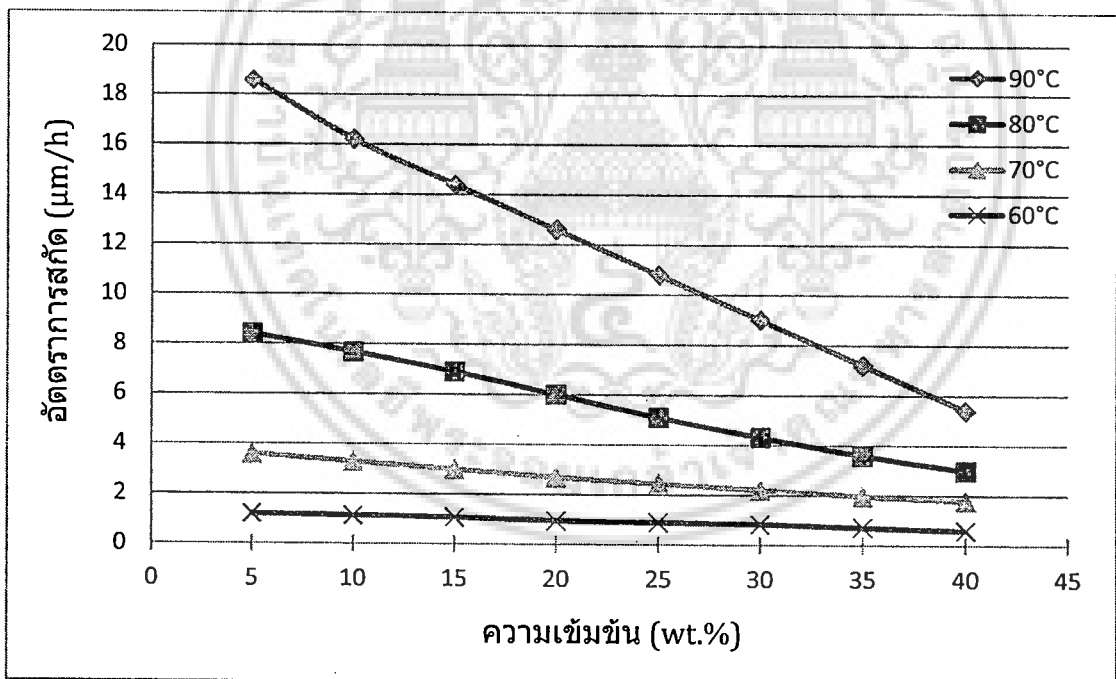
3.3.1 การสกัดโดยใช้สารเคมีเตตระเมทิลแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (TMAH)

เมื่อสารเคมีเตตระเมทิลแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (Tetra methyl ammonium hydroxide; TMAH หรือ TMAOH) ถูกทำให้เจือจางในน้ำ DI ก็จะทำให้ค่า PH ต่ำกว่า 12 จะต้องระวังสารเคมีจะเข้าตา ไม่เป็นพิษเหมือนกับสารเคมี EPD สารเคมี TMAH จะง่ายต่อการใช้งาน สารเคมี TMAH จะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศดังนั้นในขณะที่ทำการสกัดไม่ควรจะเปิดฝาเป็นเวลานาน สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งก็คือสารเคมี TMAH เป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงไม่ควรมีส่วนผสมของสารอนินทรีย์ ในขณะที่ทำการสกัด ดังนั้นสารเคมี TMAH จึงเหมาะที่จะใช้เป็นกระบวนการสร้างร่วมกับวงจรรวมปรกติได้ [54]

ในการทดลองเราใช้สารเคมีที่เกิดจากการผสมระหว่างสารเคมีเตตระเมทิลแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ผสมกับน้ำ มีอัตราส่วน TMAH (25%) 100 ml : น้ำ 50 ml ประมาณ 20 % โดยน้ำหนักทำการสกัดที่อุณหภูมิ 80 °C กวนสารเคมีด้วยความเร็ว 100 round/min มีอัตราการสกัดซิลิคอนประมาณ 60 $\mu\text{m}/\text{h}$ และมีอัตราการสกัดซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 6 nm/h ใช้เวลาประมาณ 7 h ถึง 8 h



รูปที่ 3.19 อัตราการสักัดซิลิคอน (100) ของสารเคมี TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอุณหภูมิ



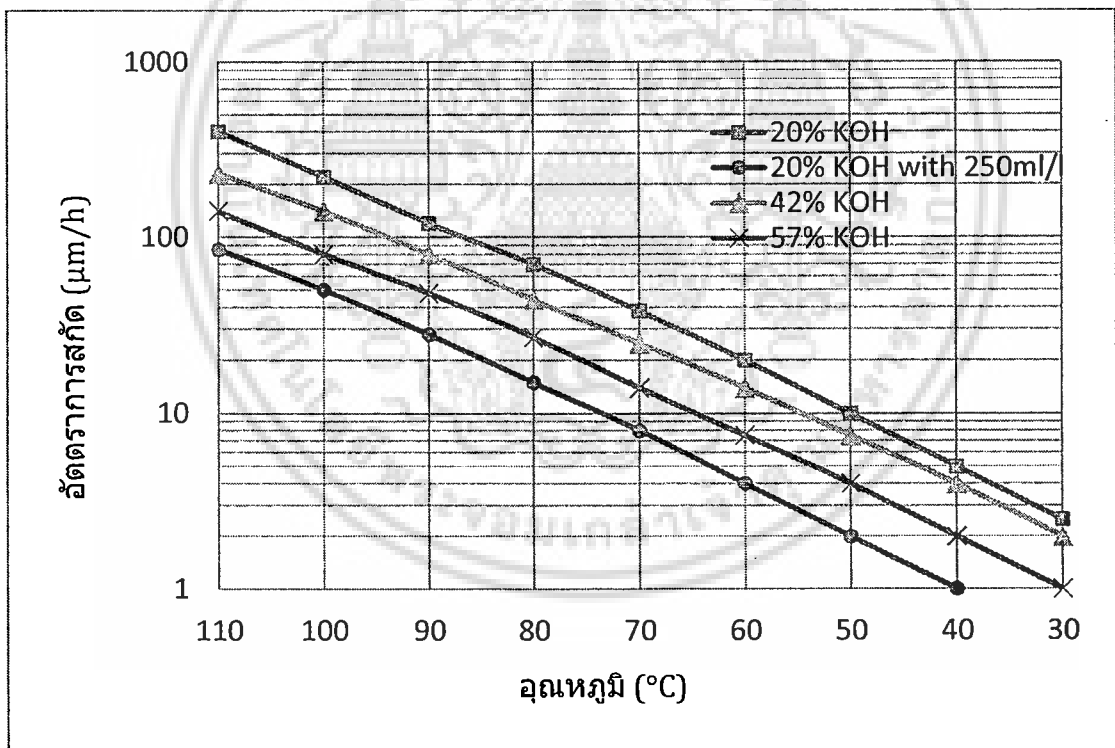
รูปที่ 3.20 อัตราการสักัดซิลิคอนไดออกไซด์ของสารเคมี TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

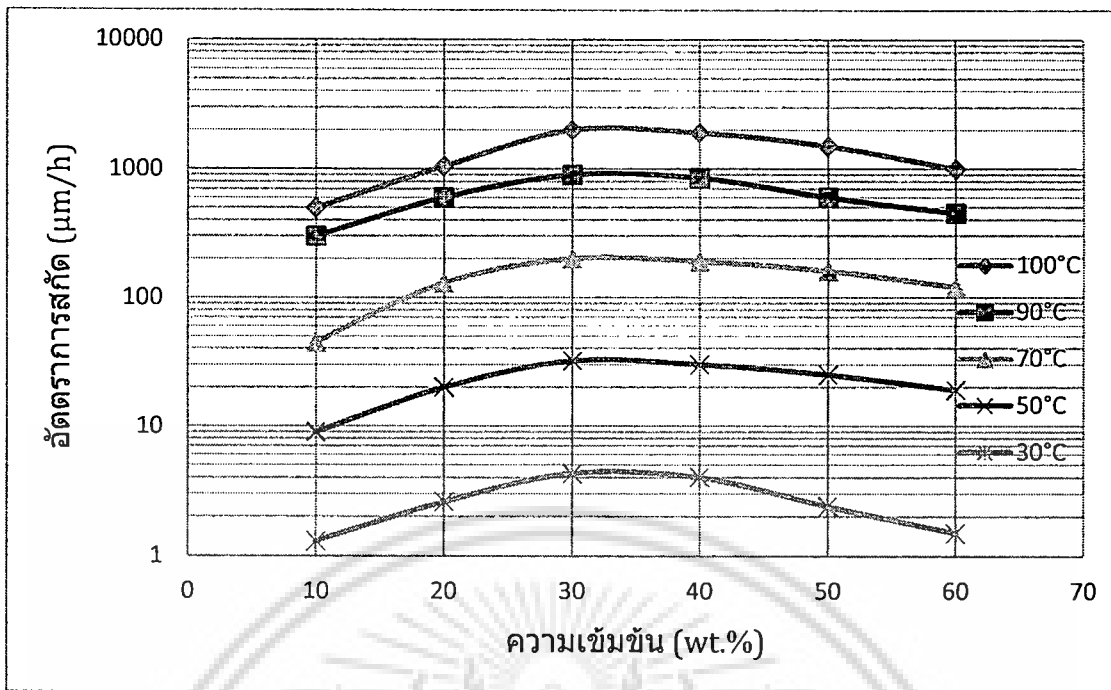
3.3.2 การสกัดโดยใช้สารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

สารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide; KOH) ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งจะอันตรายน้อยกว่าสารเคมีอื่น ง่ายต่อการใช้งาน เป็นสารเคมีที่พร้อมใช้งานได้โดยอัตราการสกัดเร็ว โดยจะต้องระวังเนื่องจากสารเคมี KOH อาจทำให้ตาบอดได้ โดยที่สารเคมี KOH จะมีข้อเสียที่ไม่สามารถเข้ากับกระบวนการรวมปรกติได้และการใช้ซิลิโคนไดออกไซด์เป็นหน้ากากก็จะทนทานได้ไม่ดี ในรูปที่ 3.21 อัตราการสกัดในทิศทาง (100) โดยมีอุณหภูมิเป็นตัวแปร และในรูปที่ 3.22 อัตราการสกัดซิลิโคนไดออกไซด์ของสารเคมี KOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอุณหภูมิ

ในการทดลองเราใช้สารเคมีที่เกิดจากการผสมระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ผสมกับน้ำ โดยมีอัตราส่วน 44.88 g: 200 ml คือประมาณ 20 % โดยน้ำหนัก ทำการสกัดที่อุณหภูมิ 70 °C กวนสารเคมีด้วยความเร็ว 100 round/min มีอัตราการสกัดซิลิโคนประมาณ 40 $\mu\text{m}/\text{h}$ และมีอัตราการสกัดซิลิโคนไดออกไซด์ประมาณ 120 nm/h ใช้เวลาประมาณ 9 h ถึง 10 h [54]



รูปที่ 3.21 อัตราการสกัดซิลิโคน (100) ของสารเคมี KOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอุณหภูมิ



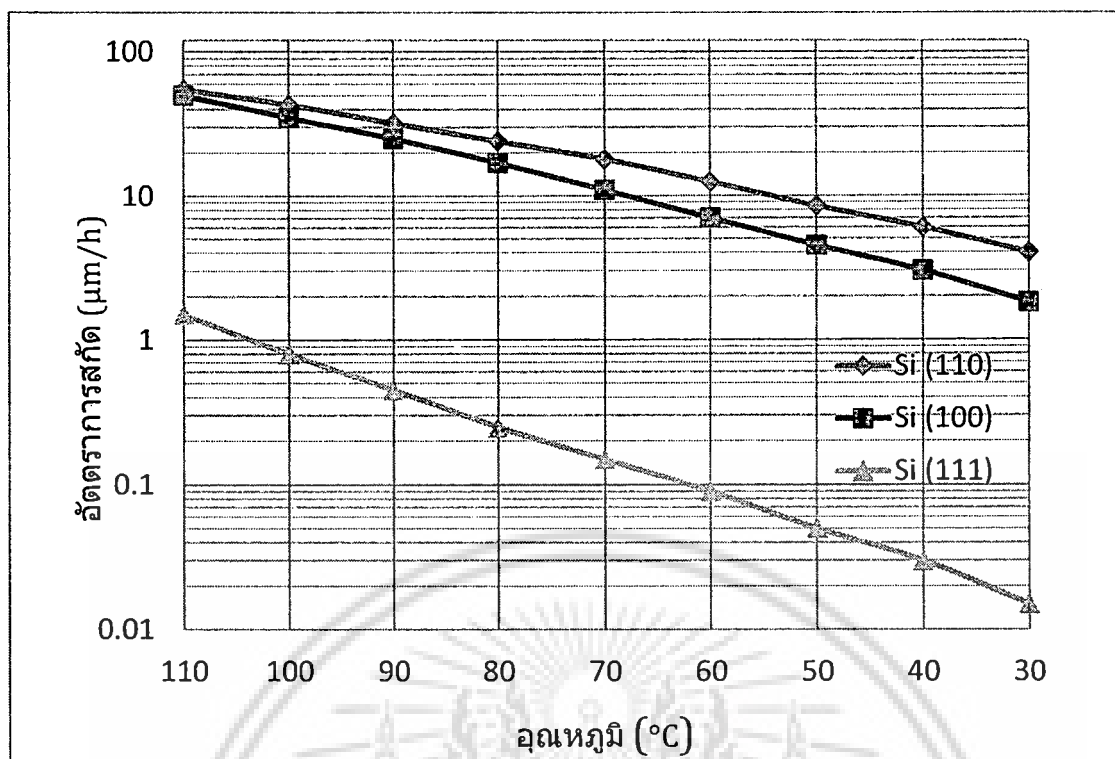
รูปที่ 3.22 อัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ของสารเคมี KOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอุณหภูมิ

3.3.3 การกัดโดยใช้สารเคมีเอธิลีนไดอะมีนกับไพโรแคทคอลและน้ำ (EPD)

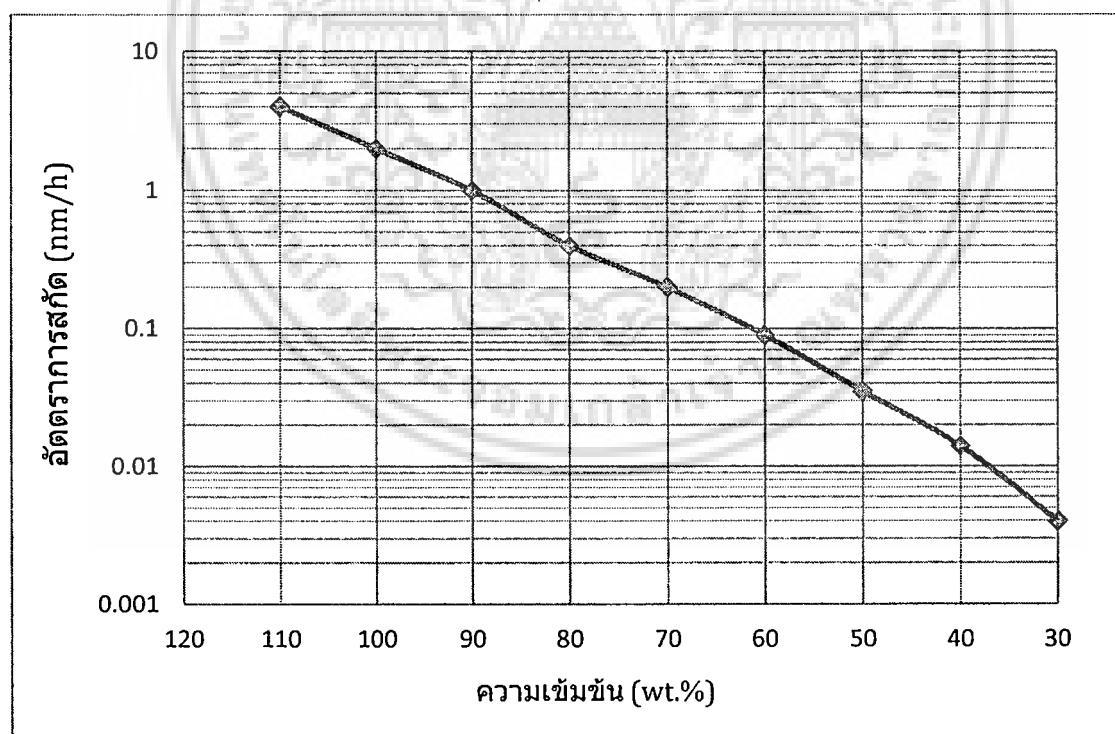
สารเคมีระหว่างเอธิลีนไดอะมีน (Ethylenediamine) กับไพโรแคทคอล (Pyrocatechol) และน้ำ (DI) หรือนิยมเรียกว่า EPD ใช้งานค่อนข้างยากเพราะมีพิษ และมีความเสื่อมของสารเคมีเมื่อสัมผัสกับก๊าซออกซิเจน จะทำให้สารเคมีเปลี่ยนสีน้ำตาลแดง ดังนั้นคุณสมบัติที่ดีในการกัดของสารเคมี EPD ก็จะลดลง ซึ่งไอของสารเคมีจะมีพิษและอันตรายจึงต้องมีการใช้ระบบการควบแน่นของไอน้ำที่ดี ในการผสมสารเคมี ส่วนผสมที่ควรเติมเป็นอันดับสุดท้ายคือน้ำ เนื่องจากเมื่อมีการเติมน้ำจะทำให้เริ่มทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน

โดยที่อายุการใช้งานของสารเคมี EPD จะหมดเร็ว เมื่อสารเคมีเย็นตัวหลังจากมีการกัดซิลิคอนแล้วจะมีการตกตะกอน ในการเลือกพื้นที่ในการกัดเราจะใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นตัวป้องกันและจะมีการกัดในอัตราที่ต่ำเมื่อซิลิคอนมีการโคปสาร B⁺ ในการกัดต้องมีการใช้สารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ สกัดผิวหน้าก่อนเนื่องจากซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (native SiO₂) ที่มีอยู่จะไปป้องกันการกัดได้ ตรงกันข้ามกับสารเคมี KOH ซึ่งไม่จำเป็น

ในการทดลองเราใช้สารเคมี EPD [51] โดยมีอัตราส่วน 50 ml : 8g : 16 ml ทำการกัดที่อุณหภูมิ 95 °C กวนสารเคมีด้วยความเร็ว 100 round/min มีอัตราการกัดซิลิคอนประมาณ 40 µm/h และมีอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 2 nm/h ใช้เวลาประมาณ 10 h ถึง 11 h [54]



รูปที่ 3.23 อัตราการกัดซิลิคอนของสารเคมี EPD กับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.24 อัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ของสารเคมี EPD กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

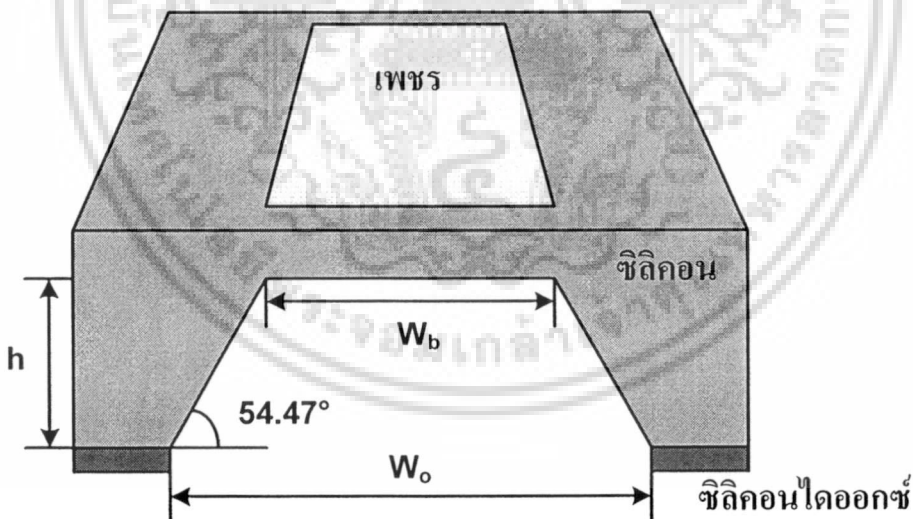
3.3 การออกแบบ

3.4.1 การออกแบบไดอะแฟรม

โครงสร้างของอุปกรณ์โฟโตไดโอดประกอบด้วยไดอะแฟรมบางของเพชรเป็นส่วนสำคัญ ด้วยเหตุนี้การสกัดซิลิคอนบางส่วนออกเพื่อให้เหลือเป็นไดอะแฟรมของเพชรจึงเป็นขั้นตอนสำคัญ ในการสร้างอุปกรณ์ ไดอะแฟรมของเพชรเกิดจากการสกัดฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) ออกโดย สารเคมีที่มีลักษณะการสกัดเป็นแบบแอนไอโซโทรปิกคือ การสกัดที่ตัวสกัด ซึ่งอยู่ในรูปของ สารเคมีจะสกัดเนื้อสารในทิศทางหรือระนาบต่างๆ ของผลึกไม่เท่ากัน [52] ดังในรูปที่ 3.25 ดังนั้น การออกแบบปากหลุมจึงมีความสัมพันธ์กับความกว้างของก้นหลุม ถ้าเปิดปากหลุมกว้างเท่ากับ W_o และทำการสกัด ได้ลึกเท่ากับ h จะได้ขนาดความกว้างก้นหลุม W_b ดังสมการ (3.11)

$$W_b = W_o - \frac{2h}{\tan(54.74^\circ)} \cong W_o - \sqrt{2}h \quad (3.11)$$

ถ้าต้องการความกว้างปากหลุม $2000 \mu\text{m}$ และแผ่นซิลิคอนมีความหนา $410 \mu\text{m}$ ดังนั้นต้อง เปิดปากหลุมเท่ากับ $W_b = 2000 - \sqrt{2}(410) = 1420 \mu\text{m}$



รูปที่ 3.25 ภาพตัดขวางลักษณะการสกัดแบบแอนไอโซโทรปิก

3.4.2 มาตรฐานโฟโตไดโอด

ในการสร้างโฟโตไดโอด ได้กำหนดมาตรฐานที่ใช้ในขั้นตอนกระบวนการสร้างทั้งหมด 3 มาตรฐาน ประกอบด้วยมาตรฐานกำหนดพื้นที่เพชร มาตรฐานไดอะแฟรม และมาตรฐานขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มาตรฐานกำหนดพื้นที่เพชร

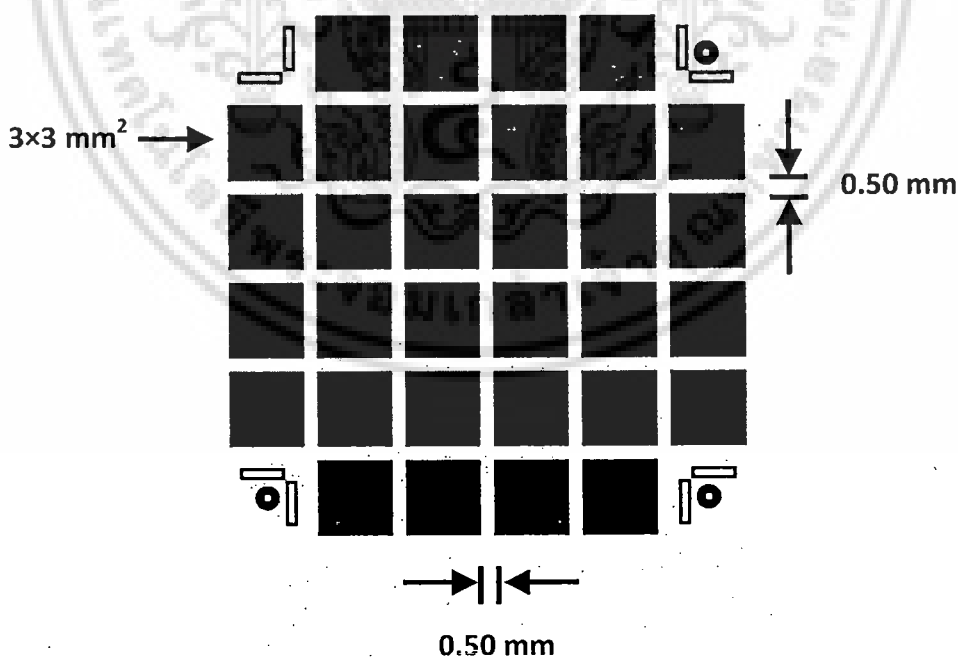
ในการสร้างโฟโตไดโอดได้กำหนดใช้ฐานรองซิลิคอนขนาด $23 \times 23 \text{ mm}^2$ โดยฐานรองนี้จะสร้างอุปกรณ์ได้ทั้งหมด 32 ตัว โดยแต่ละตัวจะมีขนาด $3.5 \times 3.5 \text{ mm}^2$ ดังนั้นจึงได้กำหนดพื้นที่เพชรของแต่ละตัวมีขนาด $3.3 \times 3.3 \text{ mm}^2$ ดังรูปที่ 3.26 มีตำแหน่งมุมทั้งสี่ สำหรับออกแบบเป็นรูปร่างของตัวปรับช้อนมาส์ก และมีร่องแบ่งพื้นที่เพชรกว้าง $500 \mu\text{m}$

2. มาตรฐานไดอะแฟรม

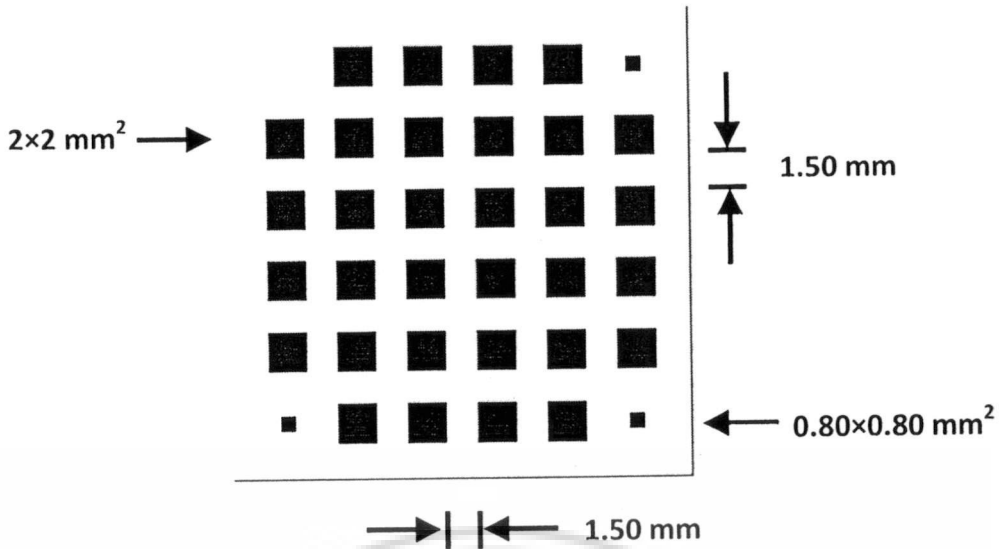
เนื่องจากการสร้างไดอะแฟรมเพชรต้องใช้เทคนิคการสกัดเนื่องจากฐานรองซิลิคอนจากด้านล่างแบบแอนไอโซโทรปิก ดังนั้นจึงได้กำหนดความกว้างและความยาว $W_0 \times W_0$ ของพื้นที่การสกัดเริ่มต้นที่ $2 \times 2 \text{ mm}^2$ เมื่อใช้ความหนาแผ่นฐานรองซิลิคอนขนาด $410 \mu\text{m}$ จะได้ขนาดความกว้างและความยาว $W_0 \times W_0$ ของพื้นที่รอยต่อขอตักกีขนาด $1.42 \times 1.42 \text{ mm}^2$ ดังรูปที่ 3.27

3. มาตรฐานขั้วไฟฟ้า

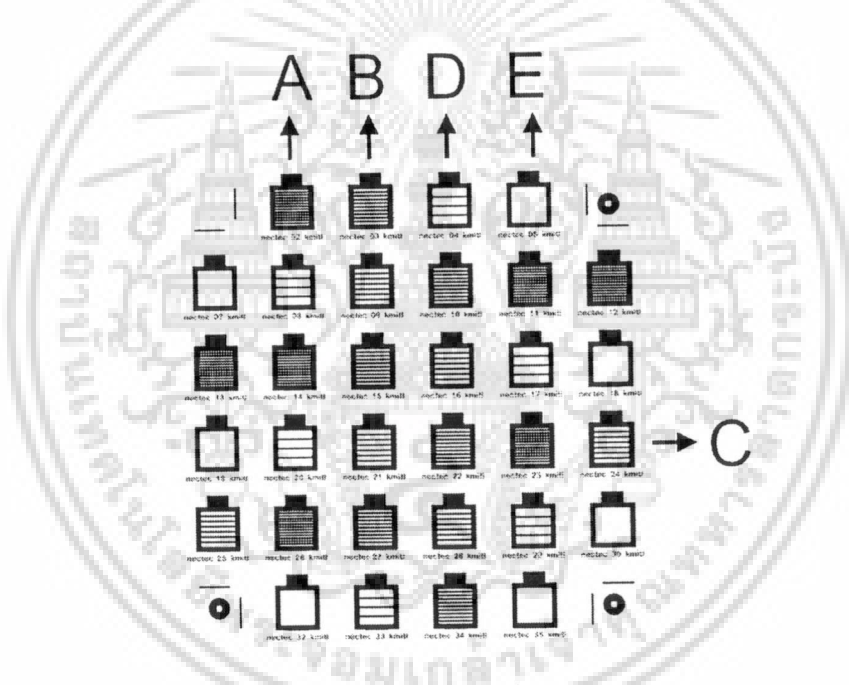
กำหนดออกแบบให้มาตรฐานขั้วไฟฟ้ามีความกว้างของขั้วโลหะ $100 \mu\text{m}$ มี 5 เงื่อนไข จำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น โดยพื้นที่ขั้วโลหะไฟฟ้าจะอยู่บนพื้นที่เพชร ดังรูปที่ 3.28 ต้นแบบมาตรฐานขั้วไฟฟ้าด้านบนของไดโอด และรูปที่ 3.29 กับรูปที่ 3.30 แบบจำลองโครงสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบน



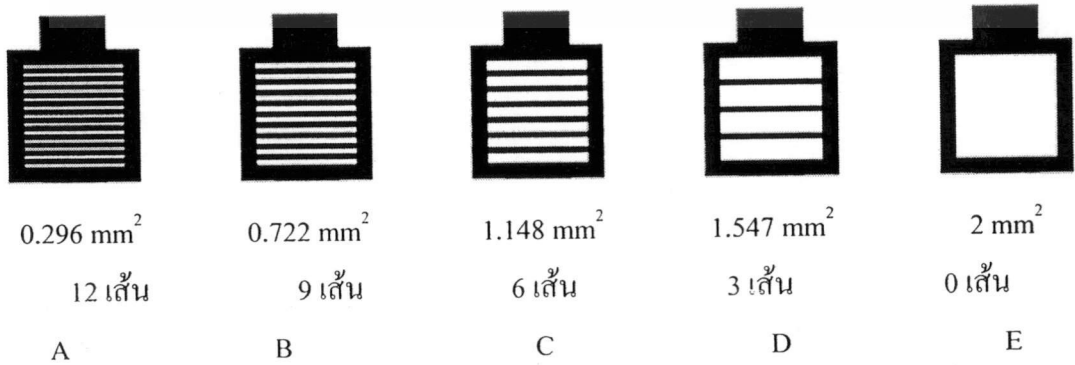
รูปที่ 3.26 ต้นแบบมาตรฐานกำหนดพื้นที่เพชร



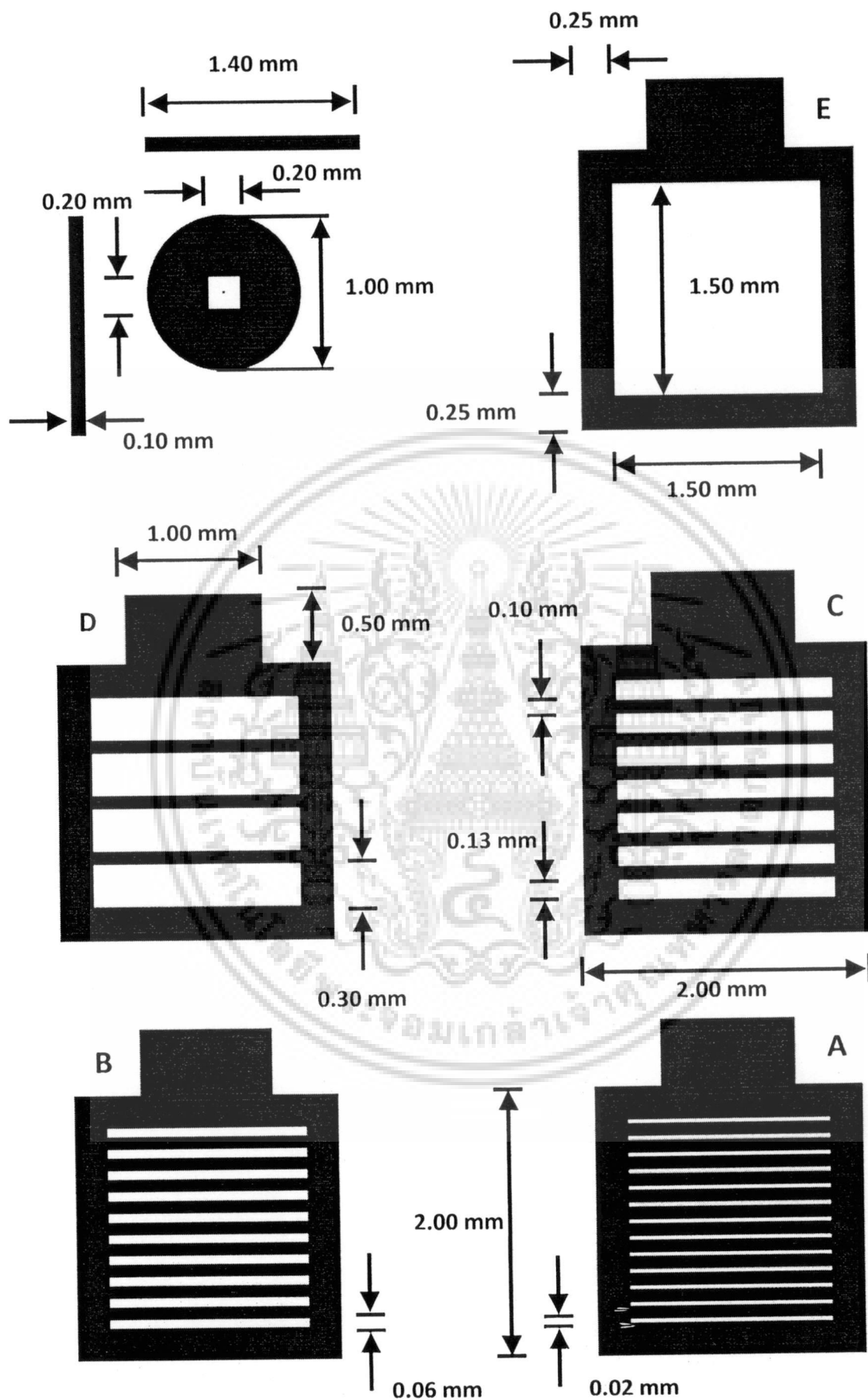
รูปที่ 3.27 ต้นแบบมาสก์ไดอะเฟรม



รูปที่ 3.28 ต้นแบบมาสก์ขั้วไฟฟ้า



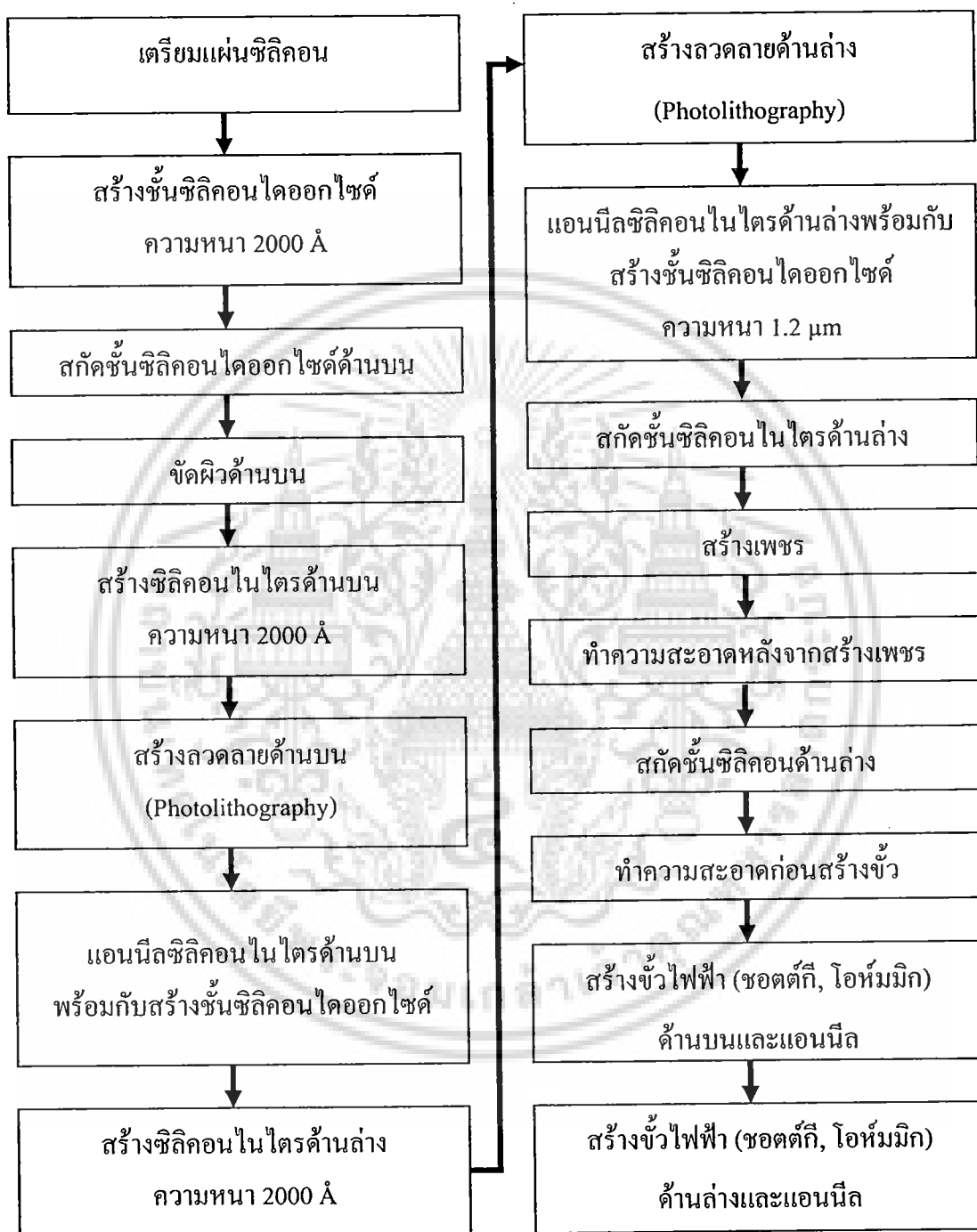
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการแข่งขันเพื่อชิงรางวัลเท่านั้น มิใช่ให้เผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.30 รายละเอียดโครงสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบนให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 แผนภูมิกระบวนการสร้างอุปกรณ์

กระบวนการสร้างอุปกรณ์ทั้งหมดโดยรวมมีกระบวนการสร้างสรูปดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 แผนภูมิกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์

3.5 ขั้นตอนกระบวนการสร้างชิ้นงาน

3.5.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดพีระนาบ 100 สภาพต้านทาน 5 โอห์ม-เซนติเมตร ความหนาแผ่นผลึกประมาณ 410 μm ตัดด้วยเครื่อง Dicing Saw ยี่ห้อ DISCO รุ่น DAD3350 ดังรูปที่ 3.32 ให้ได้ขนาด กว้าง \times ยาว = 23 mm \times 23 mm ภาพจำลองดังรูปที่ 3.33

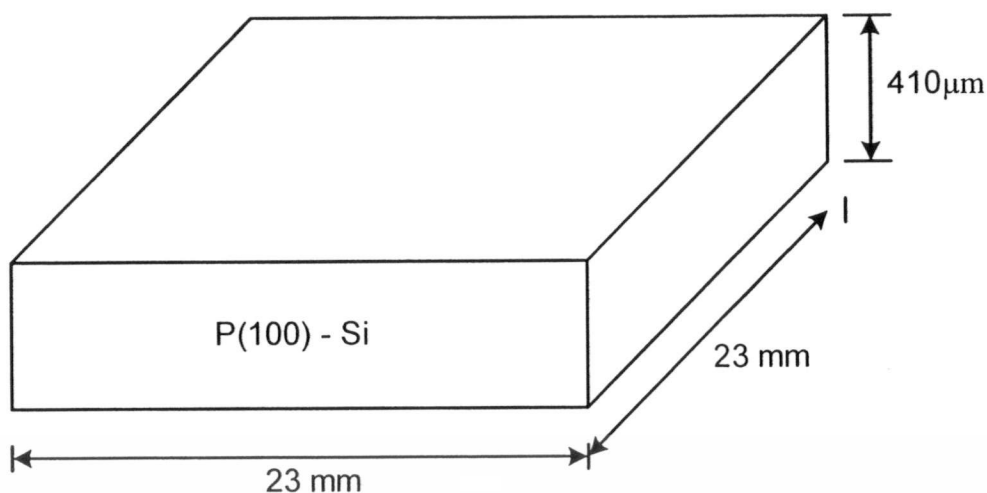


รูปที่ 3.32 เครื่อง Dicing Saw ยี่ห้อ DISCO รุ่น DAD3350

จากนั้นนำไปทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงาน โดยมีกระบวนการดังนี้

1. ทำความสะอาดชิ้นงานในสารเคมีซัลฟูริกผสมกับสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วน 3:1 อุณหภูมิ 120 $^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลา 5 min ถึง 10 min
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ อุณหภูมิ 98 $^{\circ}\text{C}$ 2 ครั้ง
3. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ โดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
4. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
5. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 $^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลา 30 min

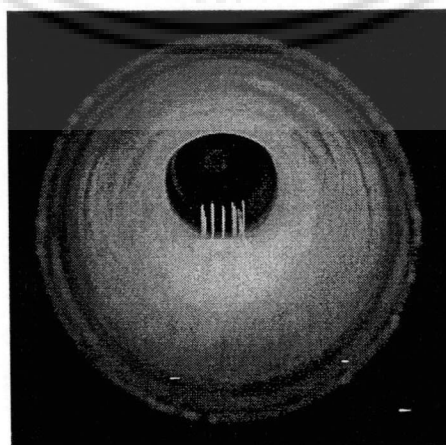
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 ภาพจำลองขนาดแผ่นซิลิคอนที่ใช้งาน

3.5.2 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ความหนาประมาณ 2000 Å

1. ทำความสะอาดชิ้นงานในสารเคมีซัลฟูริกผสมกับสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วน 3:1 อุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 5 min ถึง 10 min
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 97 °C 2 ครั้ง
3. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำโดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
4. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
5. สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับน้ำอัตราส่วน 1:6 ใช้เวลา 10 s
6. ล้างชิ้นงานในน้ำ DI 2 ครั้ง
7. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
8. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min

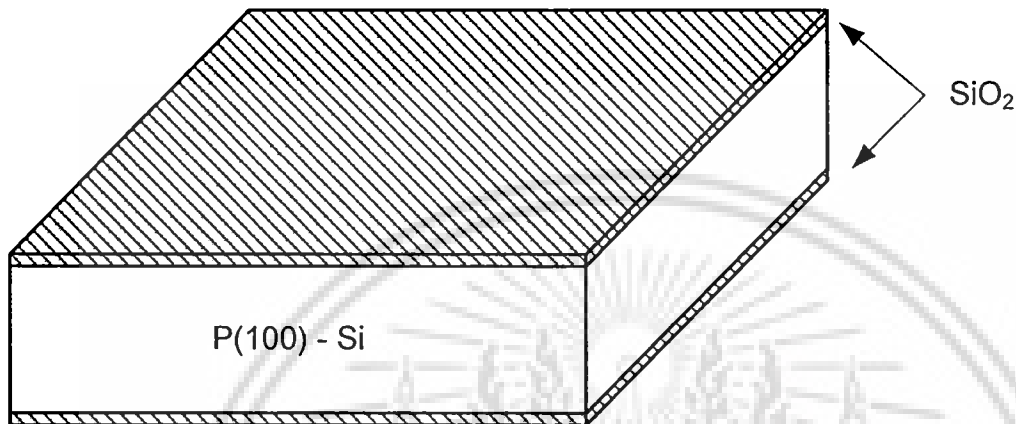


รูปที่ 3.34 แผ่นซิลิคอนที่อยู่ในสถานะสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีเงื่อนไขดังนี้

9. ปรับอุณหภูมิเตาความร้อน 1000 °C วัสดุด้วยเทอร์โมคัปเปิล
10. จ่ายก๊าซออกซิเจน ประมาณ 1200 sccm สำหรับ dry oxidation ใช้เวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ประมาณ 6 h ได้ความหนาประมาณ 2000 Å

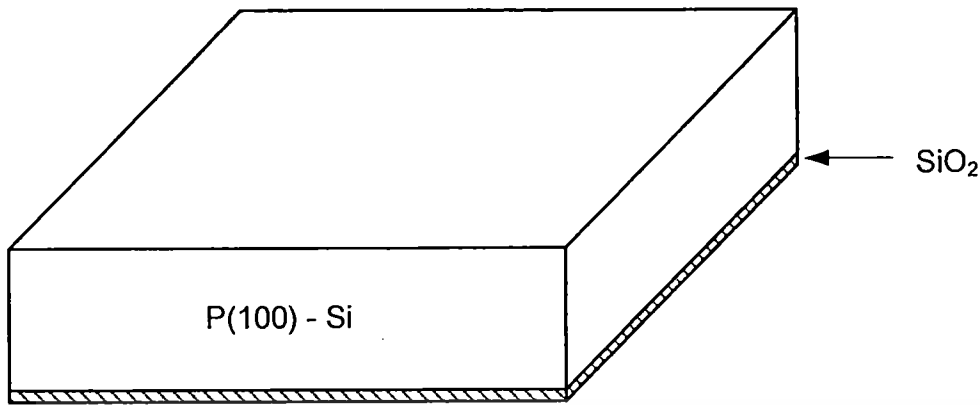


รูปที่ 3.35 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ความหนาประมาณ 5000 Å

3.5.3 กระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านบน

1. ทำความสะอาดชิ้นงาน โดยจุ่มในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคใช้เวลา 5 min
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
3. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
4. อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min
5. เคลือบชิ้นงานด้วยน้ำยาไวแสง AZ 1350 ด้านล่าง
6. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงแล้วที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 20 min
7. สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านบนออกโดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์อัตราส่วน 1:5 เป็นเวลา 3 min
8. ล้างชิ้นงานในน้ำ DI 2 ครั้ง
9. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
10. ล้างน้ำยาไวแสงออกโดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคใช้เวลา 5 min
11. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
12. ทำความสะอาดชิ้นงานตามหัวข้อ 3.5.1

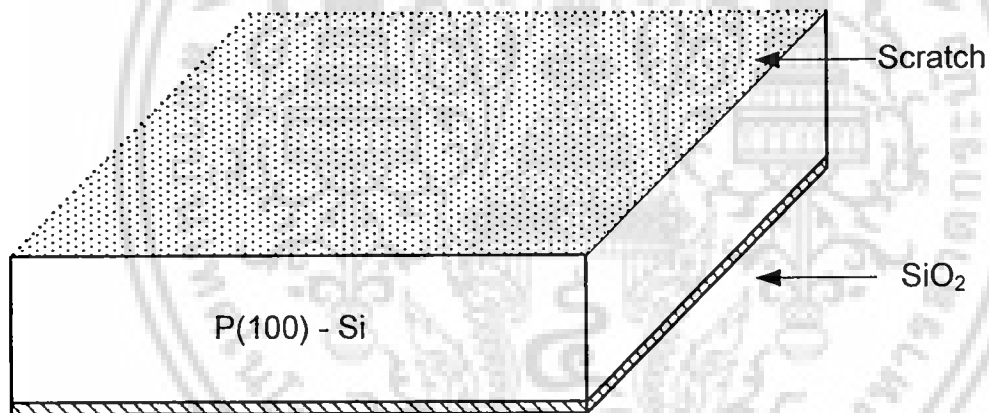
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลัง

3.5.4 การขัดผิวด้านหน้า

1. ขัดด้วยครีมเพชรด้วยขนาด $0.25\ \mu\text{m}$ เป็นเวลา 30 min
2. ทำความสะอาดชิ้นงานตามหัวข้อ 3.5.1



รูปที่ 3.37 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่ขัดด้วยครีมเพชรด้านบน

3.5.5 กระบวนการสร้างซิลิคอนไนไตรต์ด้านบนความหนาประมาณ $2000\ \text{\AA}$

เมื่อขัดผิวหน้าเสร็จแล้ว ก็จะสร้างซิลิคอนไนไตรต์ด้วยเครื่อง Plasma Deposition System ยี่ห้อ SAMCO รุ่น Model PD-10 ดังรูปที่ 3.38 โดยมีกระบวนการดังนี้

1. ทำความสะอาดชิ้นงานตามหัวข้อ 3.5.2

การสร้างซิลิคอนไนไตรต์มีเงื่อนไขดังนี้

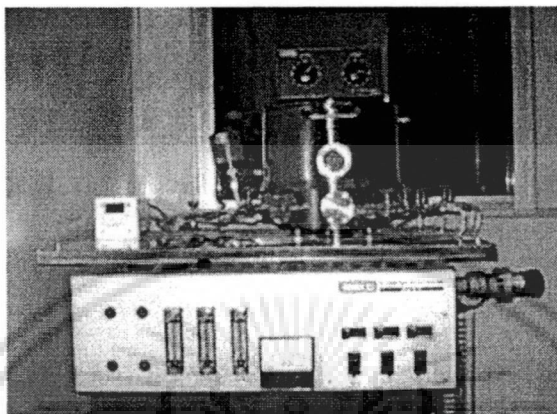
2. ปรับอุณหภูมิฐานรอง $300\ ^\circ\text{C}$ วัสดุด้วยเทอร์โมคัปเปิลที่สัมผัสอยู่ใต้ผิวของฐานรอง

ซิลิคอน

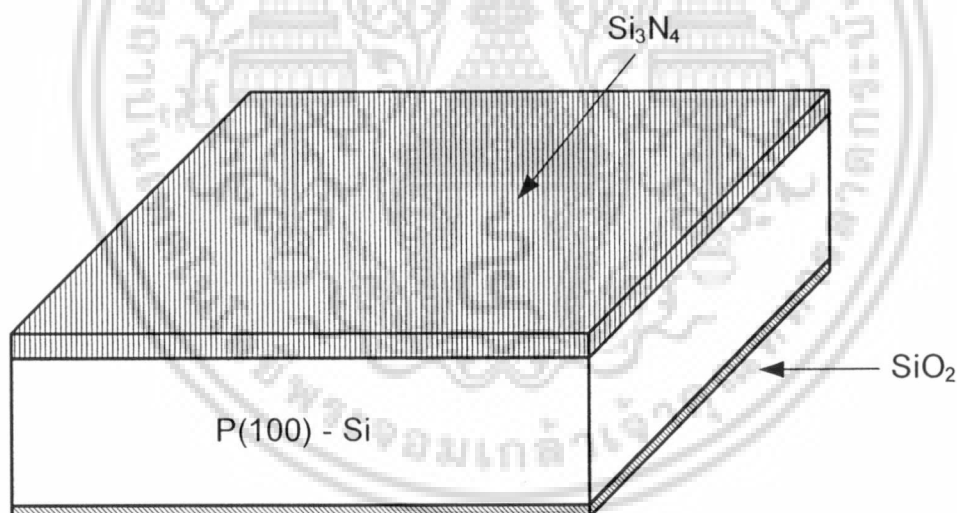
3. ถ่ายก๊าซไนโตรเจนอัตราการไหล $50\ \text{sccm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จ่ายก๊าซไซเลนอัตราไหล 10 sccm
5. ควบคุมความดันสุญญากาศในห้องปฏิกิริยาให้ได้ความดัน 0.35 Torr
6. จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แผ่นเพลตความถี่ RF 30 W ทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซไซเลน และก๊าซไนโตรเจนใช้เวลา 8 min ได้ความหนาประมาณ 2,000 Å



รูปที่ 3.38 เครื่อง Plasma Deposition System ยี่ห้อ SAMCO รุ่น Model PD-10



รูปที่ 3.39 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่สร้างซิลิคอนไนไตรด์ด้านบน

3.5.6 กระบวนการสร้างลวดลายด้านบน

หลังจากสร้างซิลิคอนไนไตรด์เสร็จก็จะสร้างลวดลายด้านบนเพื่อใช้เป็นพื้นที่สร้างเพชรทันที โดยมีกระบวนการดังนี้

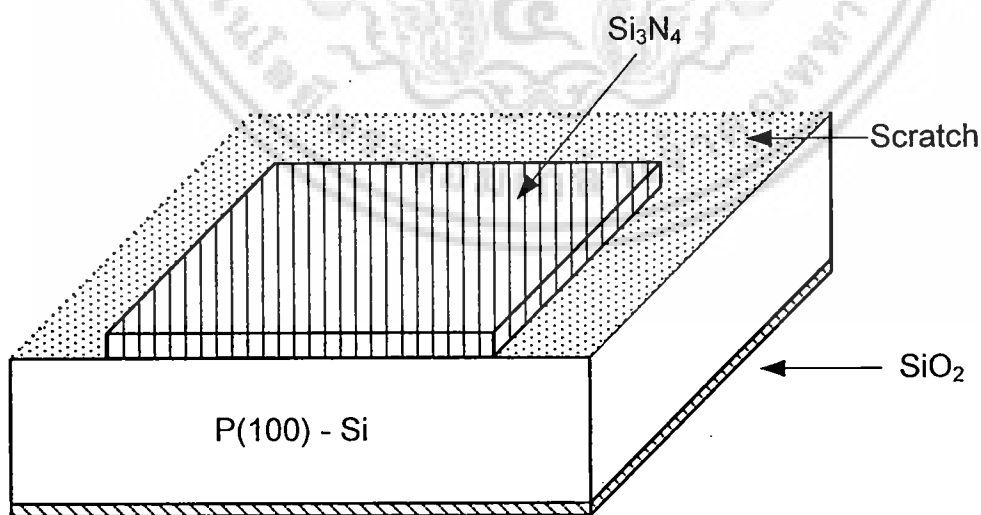
1. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min
2. เคลือบชิ้นงานด้านบนด้วยน้ำยาไวแสง AZ 1350 ด้วยเครื่อง Spinner ความเร็วรอบ

500 รอบ 5 s และต่อด้วย 3,000 รอบ 30 s เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงแล้วที่อุณหภูมิ 95°C ใช้เวลา 20 min
4. ปรับชั้นบนมากที่สุด 1 และฉายแสง UV ใช้เวลา 20 s
5. ล้างน้ำยาไวแสงที่ได้ฉายแสง UV แล้วด้วยสารเคมี Developer 400K ผสมกับน้ำอัตราส่วน 1: 4 ใช้เวลา 30 s ก็จะเหลือส่วนที่น้ำยาไวแสงที่ไม่โดนแสง UV เป็นลวดลายตามที่ต้องการ

6. ล้างน้ำ 2 ครั้ง
7. อบชิ้นงานที่เป็นลวดลายแล้วที่อุณหภูมิ 95°C ใช้เวลา 5 min
8. เคลือบชิ้นงานด้วยน้ำยาไวแสง AZ 1350 ด้านล่าง
9. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงแล้วที่อุณหภูมิ 95°C ใช้เวลา 20 min
10. สกัดซิลิคอนไนไตรด์ โดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์ อัตราส่วน 1:5 เป็นเวลา 4 min ถึง 5 min เพื่อสกัดซิลิคอนไนไตรด์ ที่ไม่มีน้ำยาไวแสงปิดอยู่

11. ล้างชิ้นงานในน้ำ DI 2 ครั้ง
12. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
13. ทำความสะอาดน้ำยาไวแสงโดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคใช้เวลา 5 min
14. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
15. ทำความสะอาดชิ้นงานตามหัวข้อ 3.5.2



รูปที่ 3.40 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรด์ด้านบนถูกสกัดเป็นลวดลายของมาส์ก 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

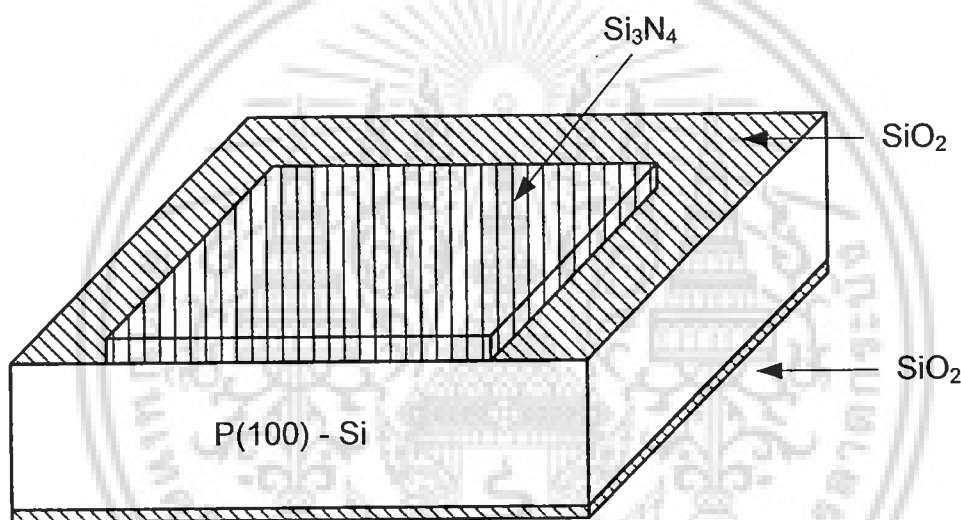
3.5.7 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และแอนนีสซิลิคอนไนไตรต์ด้านบน

หลังจากสร้างลวดลายด้านบนเสร็จก็จะทำการแอนนีสซิลิคอนไนไตรต์ด้านบนทันที โดยมีกระบวนการดังนี้

1. ทำความสะอาดชิ้นงานตามหัวข้อ 3.5.2 หากทำความสะอาดแล้วก็นำเข้าเตาความร้อนได้เลย

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และแอนนีสซิลิคอนไนไตรต์ มีเงื่อนไขดังนี้

2. ปรับอุณหภูมิเตาความร้อน 1000 °C วัตต์ด้วยเทอร์โมคัปเปิล
3. จ่ายก๊าซออกซิเจนประมาณ 1200 sccm สำหรับการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้ง ใช้เวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ 3 ชั่วโมง ได้รับความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1,000 Å



รูปที่ 3.41 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรต์ที่ได้ทำการแอนนีสพร้อมกับการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์

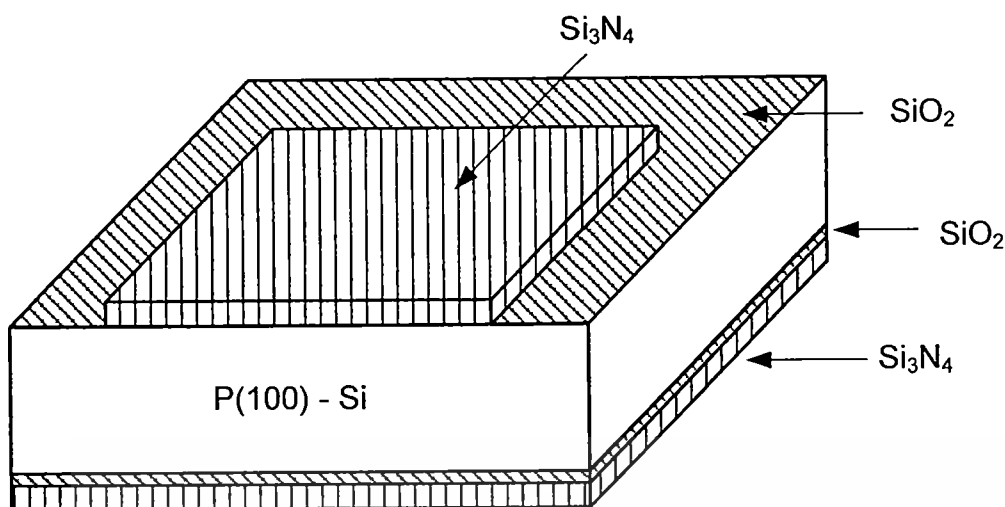
ในกระบวนการสร้างลวดลายซิลิคอนไนไตรต์ด้านบนเพื่อใช้เป็นพื้นที่สร้างเพชรจะทำการสร้างกระบวนการนี้ให้เสร็จภายในวันเดียวคือตั้งแต่กระบวนการ 4.5.5, 4.5.6 และ 4.5.7

3.5.8 กระบวนการสร้างซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่างความหนาประมาณ 2000 Å

เมื่อทำการแอนนีสเสร็จก็จะสร้างซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่างด้วยเครื่อง Plasma Deposition System อีกครั้งโดยมีกระบวนการดังนี้

1. ทำความสะอาดชิ้นงานตามหัวข้อ 3.5.2
2. สร้างซิลิคอนไนไตรต์ตามเงื่อนไขข้อ 3.5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.42 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่สร้างซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่าง

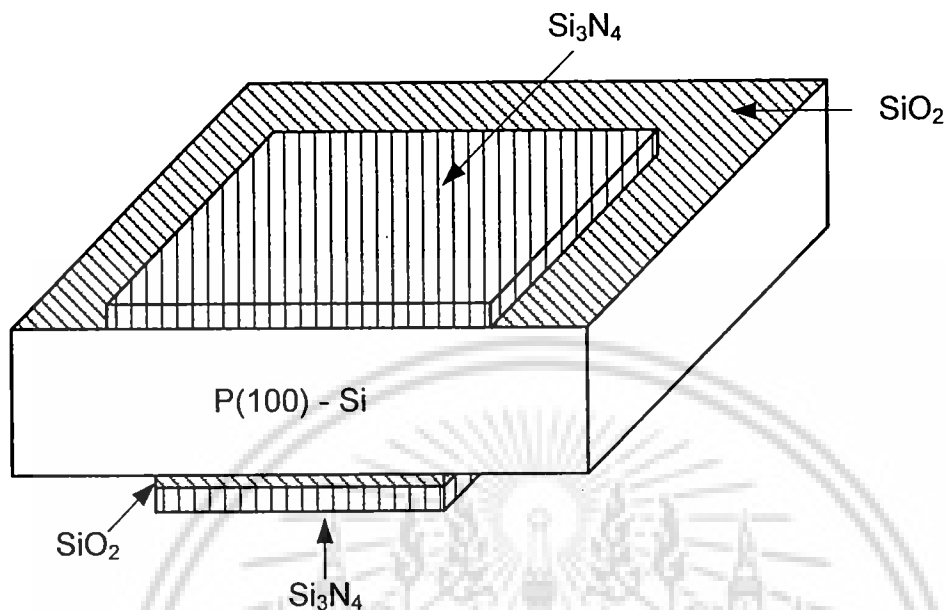
3.5.9 กระบวนการสร้างลวดลายและกัดซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่าง

หลังจากสร้างซิลิคอนไนไตรต์ ก็จะสร้างลวดลายด้านล่างเพื่อใช้เป็นพื้นในการสกัดด้านล่างทันที โดยมีกระบวนการดังนี้

1. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min
2. เคลือบชิ้นงานด้วยน้ำยาไวแสง AZ 1350 ด้านล่างด้วยเครื่อง Spinner ความเร็วรอบ 500 รอบ 5 s และต่อด้วย 3,000 รอบ 30 s
3. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 15 min
4. ปรับซ็อนมาส์ก 2 และฉายแสง UV ใช้เวลา 20 s
5. ล้างฟิล์มที่ได้ฉายแสงแล้วด้วยสารเคมี Developer 400K ผสมกับน้ำ อัตราส่วน 1: 4 ใช้เวลา 30 s ก็จะเหลือส่วนที่น้ำยาไวแสงที่ไม่โดนแสง UV เป็นลวดลายตามที่ต้องการ
6. ล้างน้ำ 2 ครั้ง
7. อบชิ้นงานที่เป็นลวดลายแล้วที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 5 min
8. เคลือบชิ้นงานด้วยน้ำยาไวแสง AZ 1350 ด้านล่าง
9. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงด้านล่างที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 20 min
10. จุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์ อัตราส่วน 1:5 เป็นเวลา 4 min เพื่อสกัดซิลิคอนไนไตรต์ที่ไม่มีน้ำยาไวแสงปิดอยู่
11. ล้างชิ้นงานในน้ำ DI 2 ครั้ง
12. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
13. ทำความสะอาดน้ำยาไวแสงโดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกใช้เวลา 5 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
15. ทำความสะอาดชิ้นงานตามหัวข้อ 3.5.2



รูปที่ 3.43 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่างถูกสกัดเป็นลวดลายของมาสก์ 2

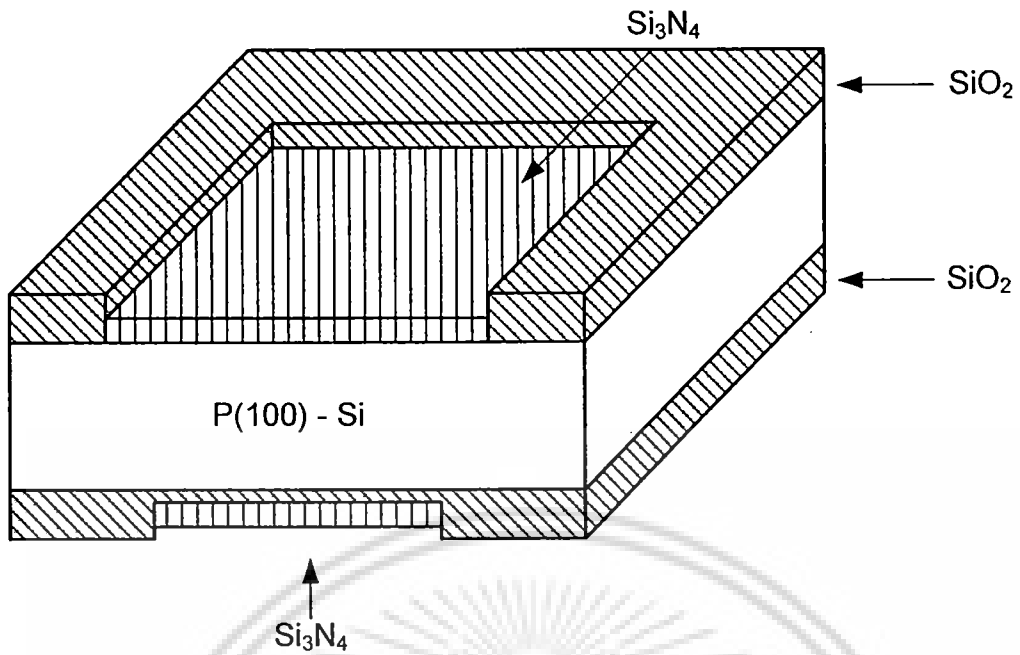
3.5.10 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และแอนนีสซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่าง

หลังจากสร้างลวดลายด้านล่างเสร็จก็จะทำการแอนนีสซิลิคอนไนไตรต์ด้านบนทันที โดยมีกระบวนการดังนี้

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และแอนนีสซิลิคอนไนไตรต์มีเงื่อนไขดังนี้

1. ปรับอุณหภูมิเตาความร้อน $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ วัตด้วยเทอร์โมคัปเปิล
2. จ่ายก๊าซออกซิเจนประมาณ $1,200\text{ sccm}$ สำหรับ dry oxidation ใช้เวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ 3 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ $1,000\text{ \AA}$
3. จ่ายก๊าซออกซิเจนประมาณ $1,000\text{ sccm}$ ผ่านไอน้ำ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ 10 ชั่วโมง ได้ความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์รวมประมาณ $12,000\text{ \AA}$

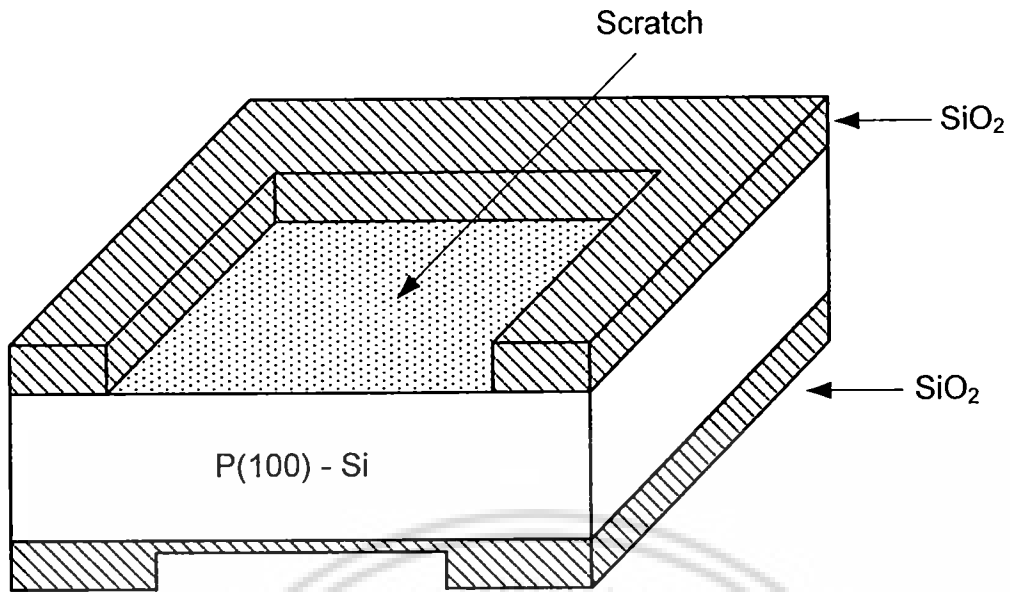
ในกระบวนการสร้างลวดลายซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่างเพื่อใช้เป็นพื้นที่สร้างเพชรเรา จะทำการสร้างกระบวนการนี้ให้เสร็จภายในวันเดียวคือตั้งแต่ 4.5.8, 4.5.9 และ 4.5.10



รูปที่ 3.44 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรที่ได้ทำการแอนนีกัลพร้อมกับการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์

3.5.11 กระบวนการสกัดซิลิคอนไนไตร

1. จุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์ อัตราส่วน 1:5 เป็นเวลา 15 s เพื่อสกัดซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นอยู่บนผิวหน้าออก
2. ล้างชิ้นงานในน้ำ DI 2 ครั้ง
3. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
4. สกัดชั้นซิลิคอนไนไตร โดยต้มชิ้นงานในสารเคมีฟอสฟอริกอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา ประมาณ 90 min
5. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 97 °C 2 ครั้ง
6. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำโดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
7. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
8. ทำความสะอาดชิ้นงานตามหัวข้อ 3.5.1



รูปที่ 3.45 ภาพจำลองซิลิคอนไนไตรที่ถูกสกัดออก

3.5.12 กระบวนการสังเคราะห์เพชร

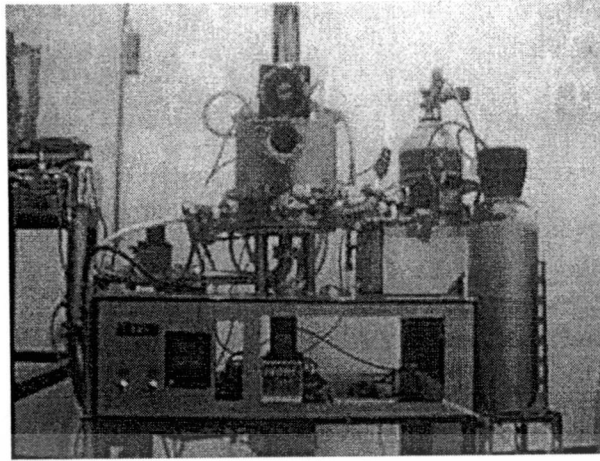
หลังจากที่เราสกัดชั้นซิลิคอนไนไตรออกเราก็จะนำชิ้นงานมาสร้างเพชร โดยเครื่องระบบ Hot-filament CVD ดังรูปที่ 3.46 มีรายละเอียดในการสังเคราะห์เพชรดังนี้

1. สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยจุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับน้ำอัตราส่วน 1:6 ใช้เวลา 5 s
2. ล้างชิ้นงานในน้ำ DI 2 ครั้ง
3. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
4. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min

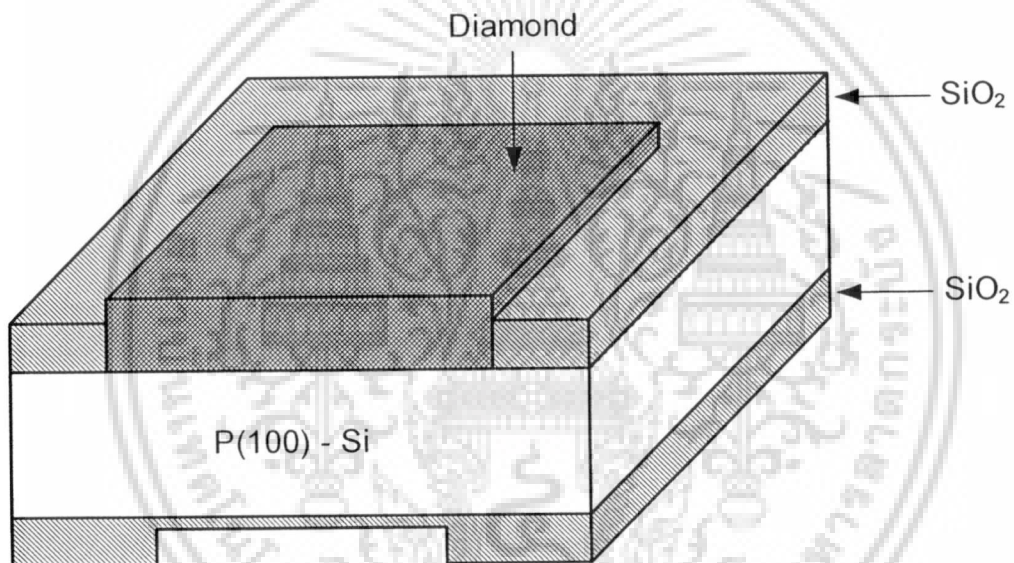
เงื่อนไขการสังเคราะห์เพชร

5. จ่ายก๊าซไฮโดรเจนอัตราการไหล 200 sccm
6. จ่ายก๊าซมีเทนอัตราการไหล 2 sccm
7. ควบคุมความดันสุญญากาศในห้องปฏิบัติการให้ได้ความดัน 50 Torr
8. จ่ายกำลังไฟฟ้าให้ขดลวด 1,250 W ทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน มีระยะห่างจากฐานรองประมาณ 5 mm
9. อุณหภูมิฐานรอง 500 °C วัตต์ด้วยเทอร์โมคัปเปิลที่สัมผัสอยู่ได้ผิวของฐานรองซิลิคอน
10. ใช้เวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์เพชร 8 ชั่วโมง ให้ความหนาของเพชรชนิดอินทรินซิกประมาณ 7 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.46 ภาพถ่ายเครื่องระบบ Hot- filament CVD



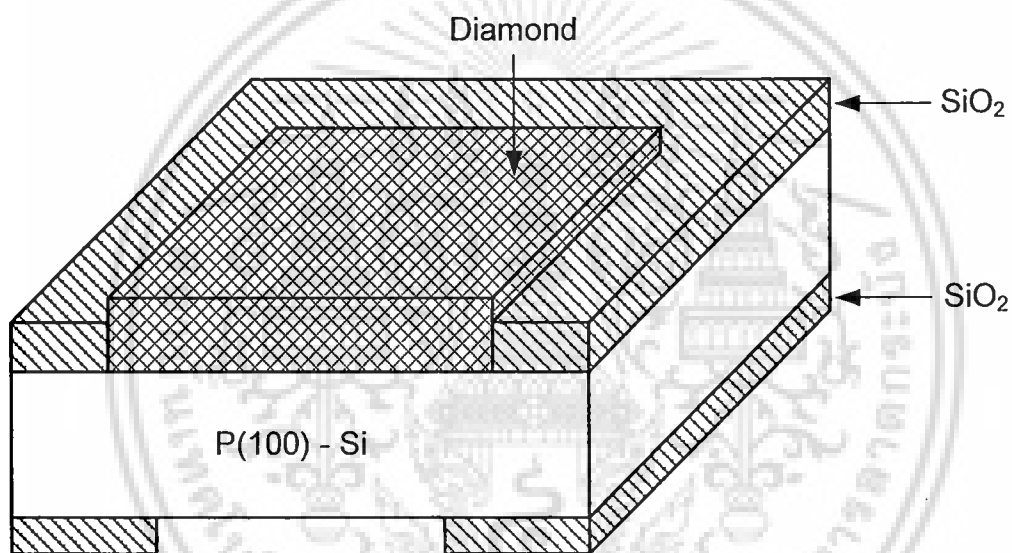
รูปที่ 3.47 ภาพจำลองเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์จากเครื่องระบบ Hot- filament CVD

3.5.13 กระบวนการทำความสะอาดหลังจากสร้างเพชร

1. ทำความสะอาดผิวหน้าเพชรโดยต้มชิ้นงานในสารเคมีโครเมียมไตรออกไซด์ผสมกับสารเคมีฟอสฟอริกอัตราส่วน 0.2 g : 100 cc อุณหภูมิ 170 °C ใช้เวลาประมาณ 20 min
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 97 °C 2 ครั้ง
3. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำโดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
4. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
5. ทำความสะอาดผิวหน้าเพชรอีกครั้งโดยต้มชิ้นงานในสารเคมีแอมโมเนียผสมกับสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัตราส่วน 1 : 1 อุณหภูมิ 80 °C ใช้เวลาประมาณ 10 min
6. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 97 °C 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำโดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
8. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
9. ทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.5.1
10. จุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์ อัตราส่วน 1:5 เป็นเวลา 2 min เพื่อสกัดซิลิคอนไดออกไซด์ ที่อยู่ด้านล่างออกเพื่อจะเตรียมสกัดซิลิคอนไดออกไซด์ด้านล่าง
11. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
12. เป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
13. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min



รูปที่ 3.48 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่พร้อมจะสกัดด้านล่าง

3.5.14 กระบวนการสกัดชั้นซิลิคอนด้านล่าง

1. ป้องกันเพชรด้านหน้า
2. จุ่มลงในสารเคมี EPD ที่อุณหภูมิ 95 °C ตามเงื่อนไขดังนี้

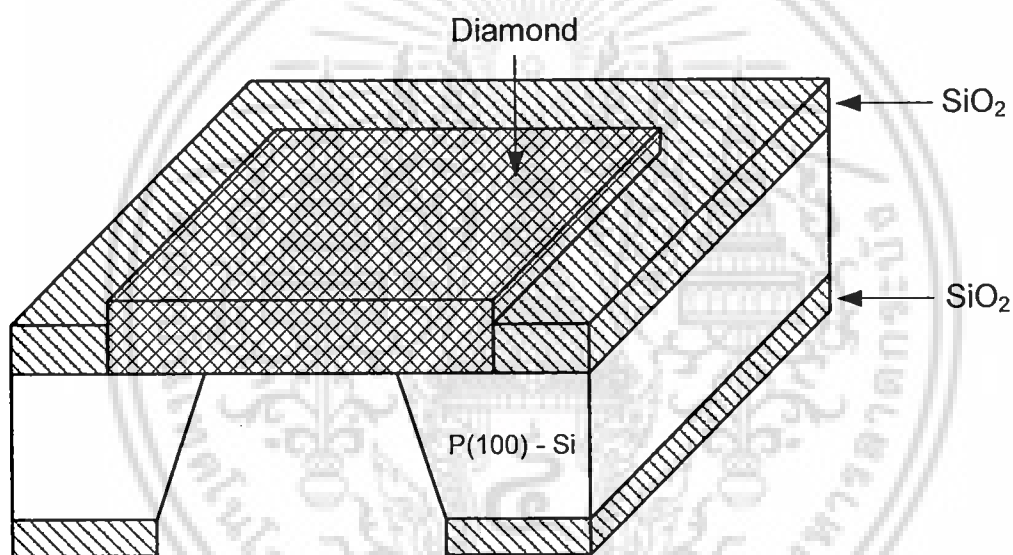
Ethylendiamine	=	150	cc
Pyrocatechol	=	24	g
H ₂ O	=	48	cc

ใช้เวลาประมาณ 7-8 ชั่วโมงหรือจนกว่าจะเห็นเพชรจากด้านล่าง

3. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 97 °C 2 ครั้ง
4. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำโดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เมื่อสกัดจากด้านล่างถึงเพชรก็จะทำความสะอาดของส่วนป้องกันด้านหน้าโดยการต้มในสารเคมีไตรโคโลเอธิลีนอุณหภูมิ 80°C 2 ครั้ง
6. จุ่มชิ้นงานในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกใช้เวลา 5 min
7. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
8. ทำความสะอาดชิ้นงานในสารเคมีซัลฟูริก ผสมกับสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วน 3:1 อุณหภูมิ 120°C ใช้เวลา 5 min
9. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 97°C 2 ครั้ง
10. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำโดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
11. ห้ามเป่าชิ้นงานแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนอาจทำให้เพชรเสียหายหากต้องการทำให้แห้งก็ให้นำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 10 min



รูปที่ 3.49 ภาพจำลองแผ่นซิลิคอนที่ถูกสกัดด้านล่าง

3.5.15 กระบวนการทำความสะอาดเพชรหลังจากสกัดด้านล่าง

1. ทำความสะอาดชิ้นงานในสารเคมีโครเมียมไตรออกไซด์ผสมกับสารเคมีฟอสฟอริก อัตราส่วน 0.2 g : 100 cc อุณหภูมิ 170°C ใช้เวลาประมาณ 20 min
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 97°C 2 ครั้ง
3. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำโดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
4. ทำความสะอาดชิ้นงานในสารเคมีแอมโมเนีย ผสมกับสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัตราส่วน 1 : 1 อุณหภูมิ 80°C ใช้เวลาประมาณ 10 min
5. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 97°C 2 ครั้ง
6. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำโดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำความสะอาดชิ้นงานในสารเคมีซัลฟูริก ผสมกับสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วน 3:1 อุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 5 min
8. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 97 °C 2 ครั้ง
9. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำโดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
10. จุ่มชิ้นงานในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์ผสมกับสารเคมีแอมโมเนียฟลูออไรด์ อัตราส่วน 1:5 เป็นเวลา 2 min เพื่อสกัดซิลิคอนไดออกไซด์ที่อยู่ด้านล่างออกเพื่อจะเตรียมสกัดด้านล่างต่อ
11. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
12. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min

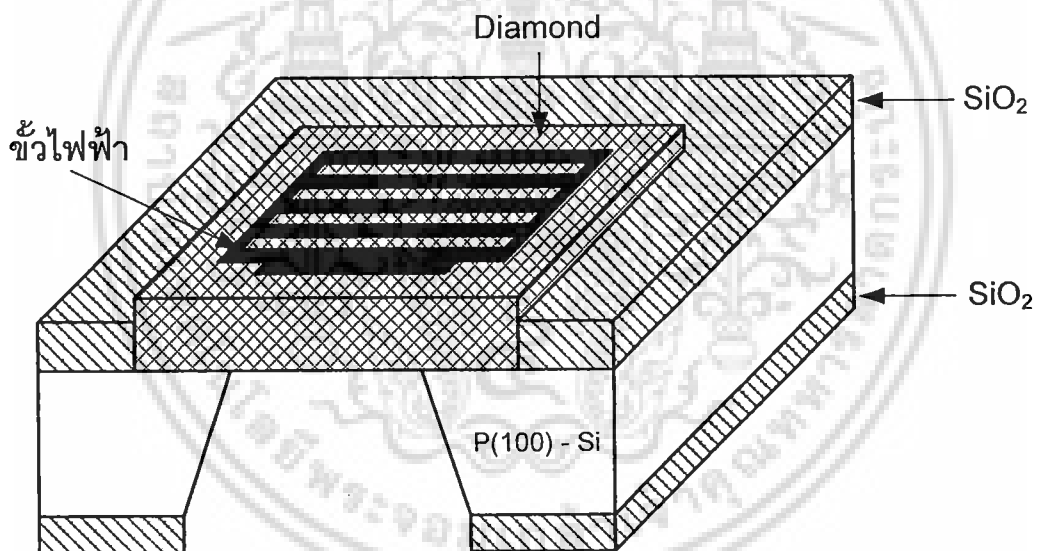
การสร้างตัวอุปกรณ์หากต้องการ โครงสร้างแบบขอตต์กีโฟโตไดโอดด้านบนของเพชรก็จะ เป็นโลหะไทเทเนียมและโลหะทอง ส่วนด้านล่างเป็นโลหะอะลูมิเนียม หากต้องการ โครงสร้างแบบ MSM โฟโตไดโอด ด้านบนและด้านล่างของเพชรก็จะเป็นโลหะอะลูมิเนียม

3.5.16 กระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าโหมกด้านบน (Ti/Au)

1. ทำความสะอาดชิ้นงานโดยจุ่มในสารเคมีอะซิโตน พร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคใช้ เวลา 5 min ก็จะได้สวดลายตามที่ต้องการ
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
3. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min
4. ฉาบโลหะไทเทเนียมความหนาประมาณ 0.1 μm ด้านบนชิ้นงาน
5. ฉาบโลหะทองความหนาประมาณ 1 μm บนโลหะไทเทเนียมอีกครั้ง
6. สร้างลวดลายด้านบนด้วยกระบวนการลิโธกราฟีโดยอบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้น อุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min
7. เคลือบชิ้นงานด้วยน้ำยาไวแสง AZ 4620 ด้วยเครื่อง Spinner ความเร็วรอบ 500 รอบ 5 s และต่อด้วย 3,000 รอบ 30 s
8. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 20 min
9. ปรับซ็อนลวดลายด้วยมาสก์ 3 และฉายแสง UV ใช้เวลา 120 s
10. ล้างน้ำยาไวแสงที่ได้ฉายแสงแล้วด้วยสารเคมี Developer 400K ผสมกับน้ำ อัตราส่วน 1: 2 ใช้เวลา 60 s จะเหลือส่วนน้ำยาไวแสงที่ไม่โดนแสง UV เป็นลวดลายตามที่ต้องการ
11. ล้างน้ำ 2 ครั้ง
12. อบชิ้นงานที่เป็นลวดลายแล้วที่อุณหภูมิ 95 °C ใช้เวลา 10 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. สกัดโลหะทองโดยจุ่มในสารเคมีไนตริกผสมกับน้ำและสารเคมีไฮโดรคลอริก ด้วยอัตราส่วน 1:2:3 ใช้เวลา 30 s
14. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ โดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
15. สกัดโลหะไทเทเนียมโดยจุ่มในสารเคมีไฮโดรเจนฟลูออไรด์กับสารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผสมกับน้ำด้วยอัตราส่วน 1:1:5 ใช้เวลา 10 s
16. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ โดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง
17. หลังจากนั้นล้างน้ำยาไวแสงในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกใช้เวลา 5 min ก็จะได้ลวดลายตามที่ต้องการ
18. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
19. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min
20. นำชิ้นงานไปแอนนัลอีกครั้งโดยเข้าเตาที่อุณหภูมิ 550 °C ใช้เวลา 5 min ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1200 sccm



รูปที่ 3.50 ภาพจำลองขั้วไฟฟ้าที่ถูกสร้างบนเพชรด้านบน

3.5.17 กระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะอะลูมิเนียมด้านบน

1. ทำความสะอาดชิ้นงานโดยจุ่มในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกใช้เวลา 5 min
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง
3. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120 °C ใช้เวลา 30 min
4. เคลือบโลหะอะลูมิเนียมความหนาประมาณ 1 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สร้างลวดลายด้านหน้าด้วยกระบวนการลิโธกราฟีโดยอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 120°C ใช้เวลา 30 min

6. เคลือบชิ้นงานด้วยน้ำยาไวแสง AZ 4620 ด้วยเครื่อง Spinner ความเร็วรอบ 500 รอบ 5 s และต่อด้วย 3,000 รอบ 30 s

7. อบชิ้นงานที่เคลือบน้ำยาไวแสงที่อุณหภูมิ 95°C ใช้เวลา 20 min

8. ปรับช้อนมาส์ก 3 และฉายแสง UV ใช้เวลา 120 s

9. ล้างน้ำยาไวแสงที่ได้ฉายแสงแล้วด้วยสารเคมี Developer 400K ผสมกับน้ำ อัตราส่วน 1:2 ใช้เวลา 60 s ก็จะเหลือส่วนที่น้ำยาไวแสงที่ไม่โดนแสง UV เป็นลวดลายตามที่ต้องการ

10. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง

11. อบชิ้นงานที่เป็นลวดลายแล้วที่อุณหภูมิ 95°C ใช้เวลา 10 min

12. สกัดอะลูมิเนียมในสารเคมีฟอสฟอริกกับสารเคมีไนตริกผสมกับน้ำด้วยอัตราส่วน 5:1:4 อุณหภูมิ 40°C ใช้เวลา 30 s

13. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ โดยให้น้ำไหลผ่าน 3 ครั้ง

14. หลังจากนั้นล้างน้ำยาไวแสงโดยจุ่มในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคใช้เวลา 5 min ก็จะได้ลวดลายตามที่ต้องการ

15. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง

16. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120°C ใช้เวลา 30 min

3.5.18 กระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะอะลูมิเนียมด้านล่าง

1. ทำความสะอาดชิ้นงานโดยจุ่มในสารเคมีอะซิโตนพร้อมสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคใช้เวลา 5 min

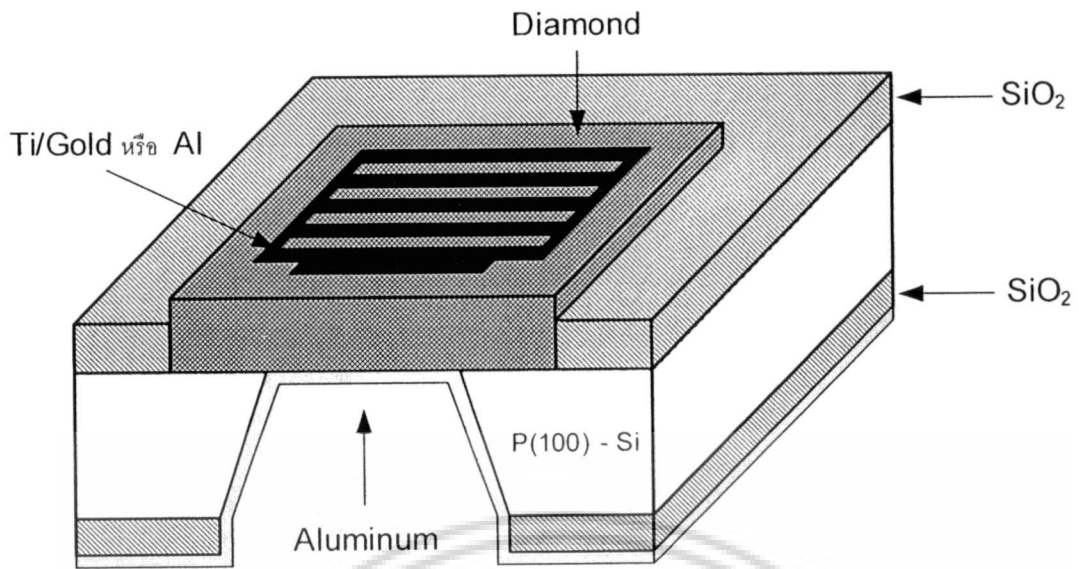
2. ล้างชิ้นงานด้วยน้ำ 2 ครั้ง

3. อบชิ้นงานเพื่อกำจัดความชื้นอุณหภูมิ 120°C ใช้เวลา 30 min

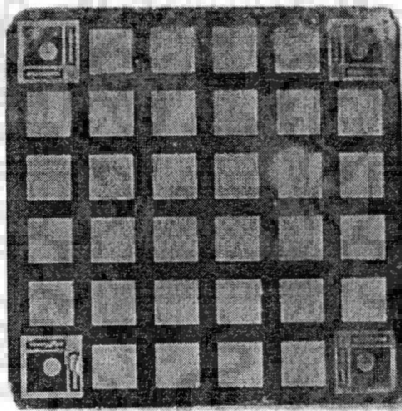
4. เคลือบโลหะอะลูมิเนียมความหนาประมาณ $1\ \mu\text{m}$

5. นำชิ้นงานไปเข้าเตาที่อุณหภูมิ 450°C ใช้เวลา 5 min ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1200 sccm

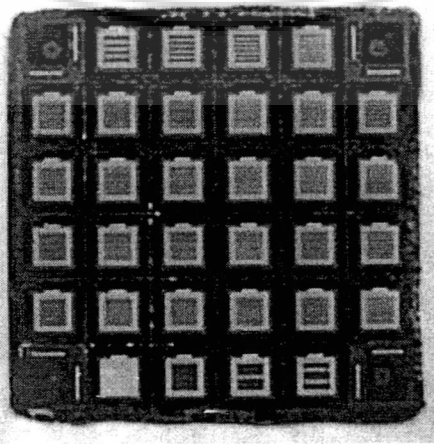
6. ตัดแยกชิ้นและบรรจุในตู้ถัง TO-8



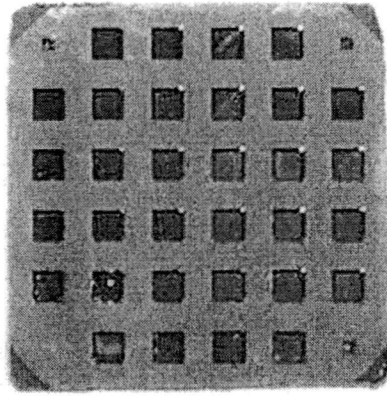
รูปที่ 3.51 ภาพจำลองขั้วทองที่ถูกสร้างบนเพชรด้านบน



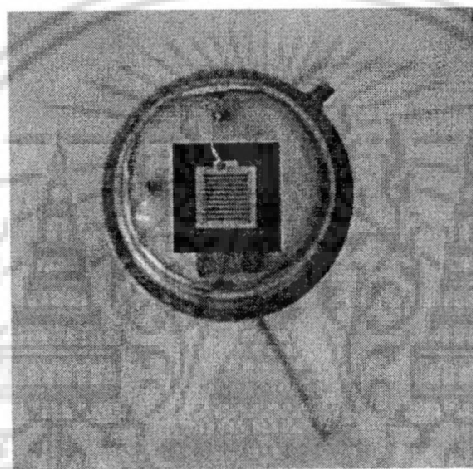
รูปที่ 3.52 พื้นที่เพชรที่ได้จากการสังเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.53 ลวดลายขั้วโลหะไฟฟ้าด้านบน
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.54 พื้นที่ไดอะแฟรมและทวคล้ายขั้วโลหะไฟฟ้าด้านล่าง



รูปที่ 3.55 การติดตั้งอุปกรณ์บนตัวถัง TO-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

การสังเคราะห์เพชรในการทดลองนี้ใช้วิธีการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ เพชรถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอน โดยรายละเอียดวิธีการสังเคราะห์เพชรแสดงในหัวข้อต่อไป

4.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน

เพชรถูกสร้างลงบนฐานรองซิลิคอนที่ทำการขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชร สาเหตุที่ต้องขัดผิวหน้า เพื่อให้ง่ายต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชร โดยการเกิดเพชรจะเริ่มต้นเกิดที่รอยขีด ก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ การสังเคราะห์เพชรในการทดลองนี้เราใช้ฐานรองเป็นซิลิคอน ระบาย 100 ขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด $0.25\ \mu\text{m}$ ภาพซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าแล้วแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นจึงนำซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้วไปเข้าเครื่องสังเคราะห์เพชร



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้า
แผ่นซิลิคอนที่ขัดด้วยครีมเพชร $0.25\ \mu\text{m}$

4.1.2 การสังเคราะห์เพชร

ในการทดลองสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ ระยะห่างระหว่างไส้ทั้งสแตงกับฐานรองซิลิคอนจะมีผลต่อขนาดของเม็ดผลึกเพชร โดยที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์เท่ากัน จากการทดลองพบว่าถ้าลดระยะห่างระหว่างไส้ทั้งสแตงกับฐานรองซิลิคอนลงจะทำให้ขนาดของเม็ดผลึกเพชรใหญ่ขึ้น โดยในการทดลองระยะห่างที่เหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

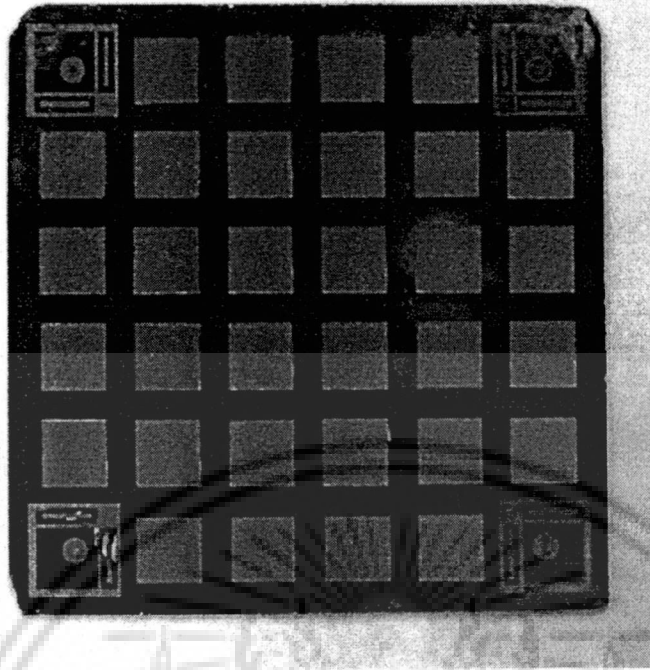
สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยระบบนี้คือ 4 mm เนื่องจากฐานรองซิลิคอนจะอยู่ใกล้กับหลอด ทั้งสแตนมากโดยบริเวณนี้จะมีความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัวมากทำให้การก่อตัวเป็นผลึกเพชรเกิดขึ้นได้เร็ว ในขณะที่ระยะห่างจากไส้ทั้งสแตนมากขึ้นความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัวจะลดลง ทำให้การก่อตัวของผลึกเพชรช้าลงด้วย สำหรับระยะห่างต่ำกว่า 3 mm ลงมา จะเกิดการแพร่กระจายของอุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนมายังฐานรองซิลิคอนมากทำให้อุณหภูมิตั้งสูงมากกว่า 1000 °C อีกทั้งความหนาแน่นของก๊าซที่แตกตัวมีปริมาณมากทำให้ได้ผลึกเพชรรูปร่างเป็นแบบบอล (ball shape)

นอกจากนี้ในการทดลองพบว่าความดันที่ใช้ในขณะที่ทำการสังเคราะห์เพชรจะมีผลต่อขนาดพื้นที่ของเพชรบนฐานรองซิลิคอน ผลการทดลองพบว่าที่ความดันต่ำการกระจายตัวของเพชรจะได้พื้นที่มากกว่าที่ความดันสูง ทั้งนี้เนื่องจากการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำช่วงอายุ (lift time) ของก๊าซที่แตกตัวจะมีค่ามากกว่าช่วงอายุของก๊าซแตกตัวที่ความดันสูง ดังนั้นที่ความดันต่ำจะทำให้การเกิดนิวเคลียสสามารถกระจายตัวได้บริเวณกว้าง ทำให้ได้พื้นที่เพชรบนฐานรองซิลิคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันถ้าความดันต่ำเกินไปก็จะทำให้อัตราการเกิดผลึกเพชรลดลงเนื่องจากปริมาณก๊าซที่จะเกิดปฏิกิริยาลดลงทำให้ต้องใช้เวลาในการสังเคราะห์นานขึ้น ในการทดลองพบว่าความดันที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 50 Torr สำหรับอัตราส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่อไอระเหยจะเป็นตัวแปรสำคัญในการสังเคราะห์เพชร จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนปริมาณของเอทิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมคือ 1 % ทั้งนี้จะได้เพชรที่มีปริมาณของคาร์บอนกราไฟท์และอะมอร์ฟัสคาร์บอนน้อยลง

เพชรที่ใช้นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลองนี้จะสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอน โดยมีเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มดังนี้

1. อุณหภูมิฐานรอง 500 °C วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ที่สัมผัสอยู่บนผิวของฐานรองซิลิคอน
2. อุณหภูมิไส้ทั้งสแตน 2000 °C
3. ระยะห่างระหว่างไส้หลอดทั้งสแตนกับฐานรองซิลิคอน 4 mm
4. อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 200 cm³/min ควบคุมโดย mass flow controller (MFC)
5. อัตราการไหลของมีเทน 2 cm³/min ควบคุมโดย MFC
6. ควบคุมความดันที่ 50 Torr วัดด้วย pirani gauge
7. เวลาในการสร้าง 8 h ได้เพชรพื้นที่ขนาด 2.54×2.54 cm² ความหนาประมาณ 7 μm อัตราการก่อตัวของผลึกเพชรประมาณ 0.9 μm/h สำหรับภาพถ่ายเพชรที่สังเคราะห์ได้แสดงในรูปที่ 4.2 เป็นการสังเคราะห์ฟิล์มบนฐานรองซิลิคอนพื้นที่ขนาด 2.54 x 2.54 cm²

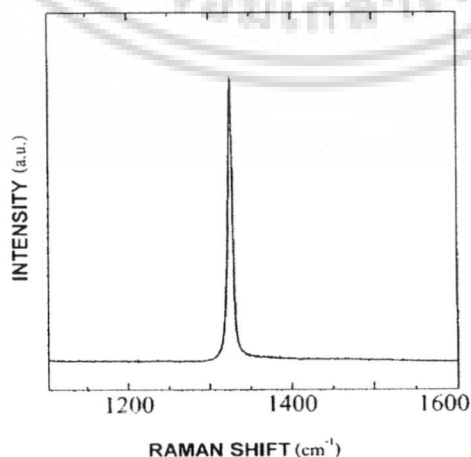
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ระยะเวลาสังเคราะห์เพชร 8 h ความหนาเพชร 7 μm

4.1.3 ผลการวิเคราะห์เพชรด้วยรามัญเปกโทรสโคปี

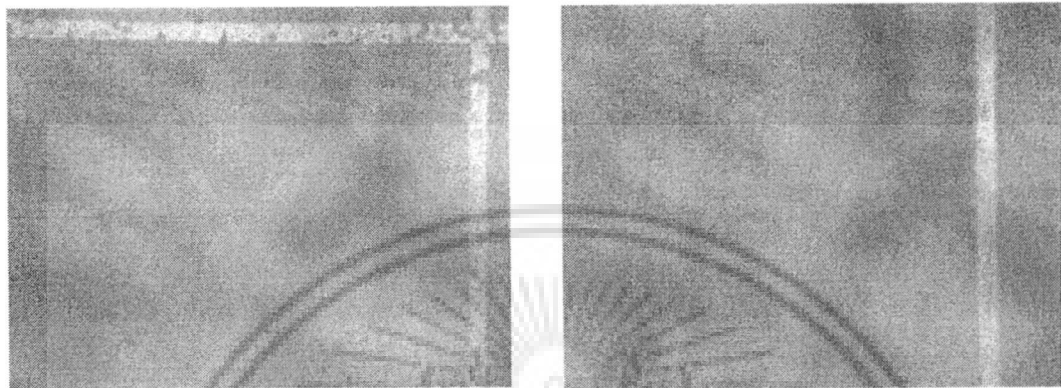
เพชรที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเครื่องสเปกโทรสโคปีเพื่อพิสูจน์ว่ามีคุณสมบัติเป็นเพชรหรือไม่ โดยสเปกตรัมรามัญนั้นสามารถแยกชนิดของคาร์บอนที่เป็นเพชร กราไฟท์ และอะมอร์ฟัสได้ โดยปกติเพชรตามธรรมชาติจะมียอดของสเปกตรัมรามัญเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ดังนั้นถ้าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรจะต้องมียอดของสเปกตรัมรามัญใกล้เคียงกับธรรมชาติ รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมรามัญของเพชรเป็นการยืนยันได้ว่าเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.3 สเปกตรัมรามัญของเพชร ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลจากการสร้างลวดลายเพชรโดยใช้วิธีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกัน

เพชรจะถูกสร้างให้เกิดลวดลายตามที่ถูกออกแบบไว้ด้วยวิธีตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบวงจรต่อไป โดยในการทดลองมีการเตรียมพื้นฐานรอง โดยการขัดแผ่นซิลิคอนด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm



รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างลวดลายที่ใช้ในการทดลอง (กำลังขยาย 100เท่า)

ภายหลังจากการสังเคราะห์เพชรเสร็จแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำมาวิเคราะห์ถึงผลที่ได้ว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด เช่น การเกิดเพชรหรือผลึกเพชรบนพื้นที่ที่ไม่ต้องการให้เกิดลักษณะเพชรที่เกิดขึ้น ความผิดพลาดของระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายของเพชร รวมไปถึงถึงค่าความกว้างน้อยที่สุดของลวดลายเพชรที่เกิดขึ้น เมื่อเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ด้วยลวดลายก่อนทำการสังเคราะห์เพชรแสดงดังรูปที่ 4.4

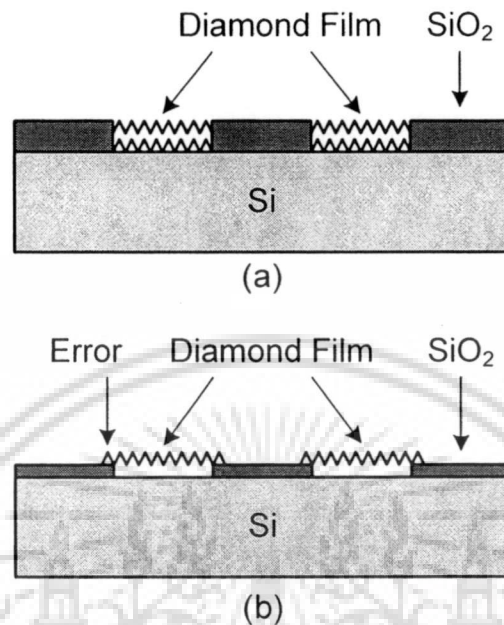
ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่าการเกิดลวดลายเพชรจะขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีออกซิเดชันแบบความร้อน ภายหลังจากการสร้างเสร็จสิ้นจะพบว่าจะไม่เกิดเพชรตามลวดลายที่ต้องการ แต่จะเป็นผลึกเดี่ยวกระจายต่างๆ ทั่วไปทั้งผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน และผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

สาเหตุที่ไม่เกิดเพชรตามลวดลายที่ต้องการ แต่เกิดผลึกกระจายทั่วไปหมด สันนิษฐานได้ว่ากระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แบบความร้อนเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ลึกลงไปในแผ่นซิลิคอน เมื่อดอกซิลิคอนไดออกไซด์ออก ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกลอกออกไปจะมีผลต่อรอยขีดที่เกิดจากการขัดครีมเพชร คือไปลดให้รอยขีดลดลง ทำให้เกิดนิวมล็ดเอชเอ็นของเพชรน้อยลงด้วย

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่าความหนาชั้นซิลิคอนมีผลต่อการเกิดลวดลายเพชรด้วย หากความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าน้อยเกินไป ลวดลายของฟิล์มจะไม่ค่อยชัด และข้อผิดพลาดสูงเนื่องจากการเกิดผลึกเพชรขึ้นบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างลวดลายของเพชร แต่ถ้าความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดของลวดลายก็จะมีค่าลดลง

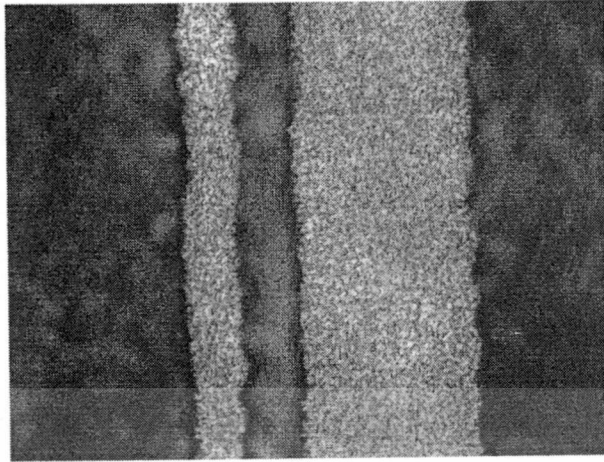


รูปที่ 4.5 ภาพจำลองแสดงผลความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีต่อการเกิดลวดลายของเพชร
(a) กรณีซิลิคอนไดออกไซด์บาง (b) กรณีซิลิคอนไดออกไซด์หนา

สาเหตุที่เกิดข้อผิดพลาดระหว่างลวดลายเพชรมากในกรณีที่ซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนา น้อย สันนิษฐานได้ว่าอาจเกิดจากที่ผลึกเพชรบริเวณขอบของลวดลายเกินออกมาบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แต่หากซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนามากพอ โอกาสที่ผลึกเพชรบริเวณขอบของลวดลายเกินออกมาที่ซิลิคอนไดออกไซด์จะลดลง

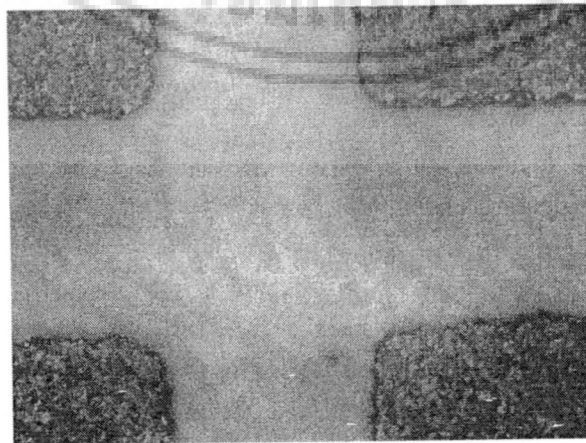
โดยจากการสังเคราะห์เพชรระยะห่าง และขนาดความกว้างของลวดลายมีผลต่อความผิดพลาดของการเกิดเพชรคือบริเวณขอบด้านนอกของลวดลายจะเกิดเพชรเกินออกมาจากลวดลายที่ออกแบบไว้ โดยที่ขนาดความกว้างของลวดลายเพชรต่างๆ จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นสูง แต่หากความกว้างเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากขนาดของผลึกที่เกินมายังขอบนอกลวดลายมีค่าคงที่ เช่นเดียวกับระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลาย คือที่ระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายมีค่าน้อยความผิดพลาดก็จะเกิดขึ้นสูง และที่ระยะระยะห่างใกล้ที่สุดระหว่างลวดลายมีค่ามากความผิดพลาดก็จะเกิดจะลดลง ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกัน โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จะเกิดขึ้นเท่าๆกันทุกทิศทางของพื้นที่ที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

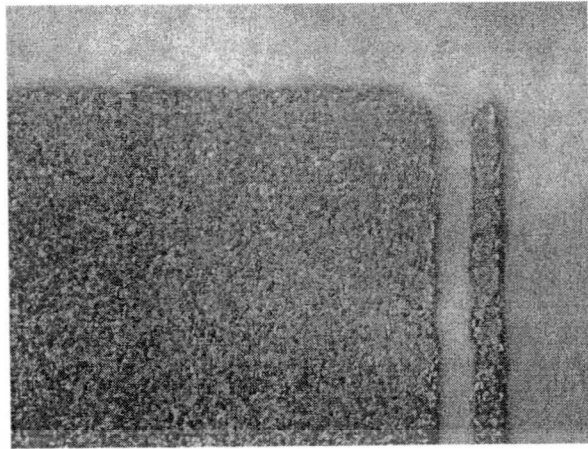


รูปที่ 4.6 แสดงรายละเอียดของรอยเส้นเพชรขนาด 20 μm

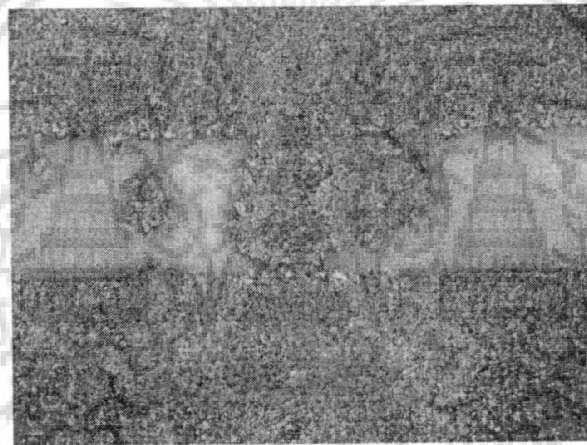
จากการทดลองสร้างเพชรตามลวดลายจะพบว่าในบางครั้งจะมีข้อผิดพลาดทำให้ลวดลายของเพชรเสียหาย เช่น อุณหภูมิฐานรองไม่เหมาะสม คือถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะเป็นการไปเพิ่มความหนาแน่นการเกิดนิวคลีเอชันให้มากขึ้น ทำให้เกิดเพชรบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นมา ซึ่งบางครั้งไม่สามารถกำจัดออกได้ กระบวนการเตรียมพื้นผิวฐานรองมีข้อผิดพลาด คือในการขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนหากมีวัสดุอื่นที่ไม่ใช่ครีမ်เพชรเจือปน เช่น เศษแผ่นซิลิคอนที่แตกระหว่างขัด ทำให้ผิวหน้าแผ่นซิลิคอนมีรอยที่ไม่ได้เกิดจากการขัดครีမ်เพชรขึ้นมา ซึ่งเมื่อนำไปสร้างเพชรแล้ว บางครั้งจะเกิดผลึกเกาะตัวตามรอยเสียหายนี้ และไม่สามารถลอกออกได้ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างลวดลาย ดังนั้นจึงควรระมัดระวังอย่าให้มีรอยนี้เกิดขึ้น กระบวนการขั้นตอนการเกิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ คือหากใช้ระยะเวลาในการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มากเกินไป ทำให้เกิดการเซาะชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณรอบๆ พื้นที่ช่วงที่เปิด เมื่อนำชิ้นงานไปสร้างเพชร พบว่าจะมีเพชรเกิดตามอกมานอกลวดลายที่กำหนดไว้



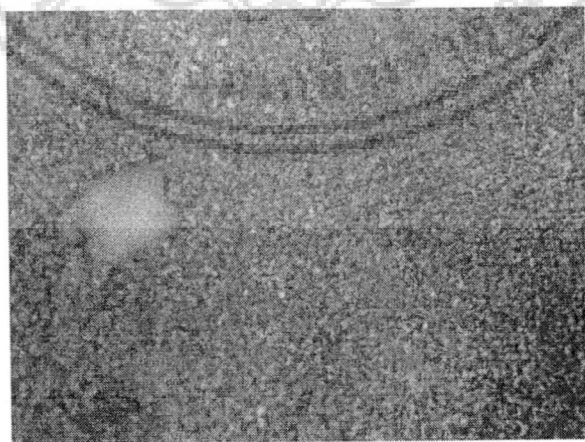
รูปที่ 4.7 แสดงมุมมองจากการเกิดพื้นที่เพชร
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเป็นเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงพื้นที่เพรชขนาดเล็ก



รูปที่ 4.9 ช่องว่างระหว่างเพรชเกิดผิดพลาดเนื่องจากเพรชเกิดล้าเข้าไปในออกไซด์



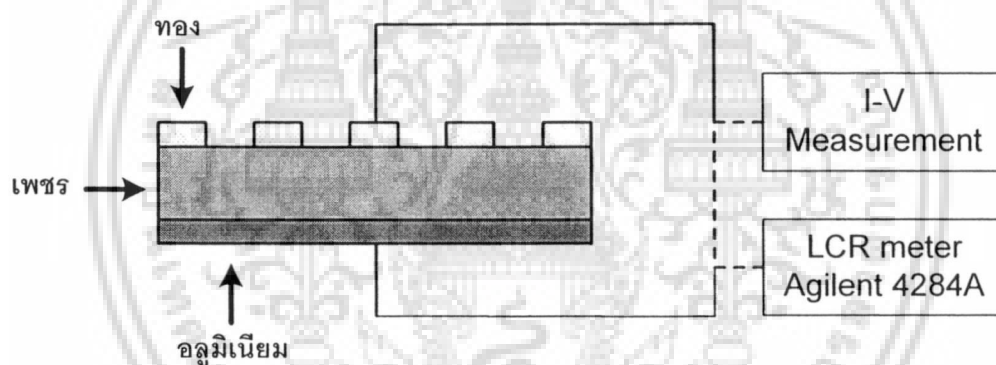
รูปที่ 4.10 ข้อผิดพลาดเกิดจากกระบวนการสกัดชั้นซิลิโคนไนไตรที่ไม่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

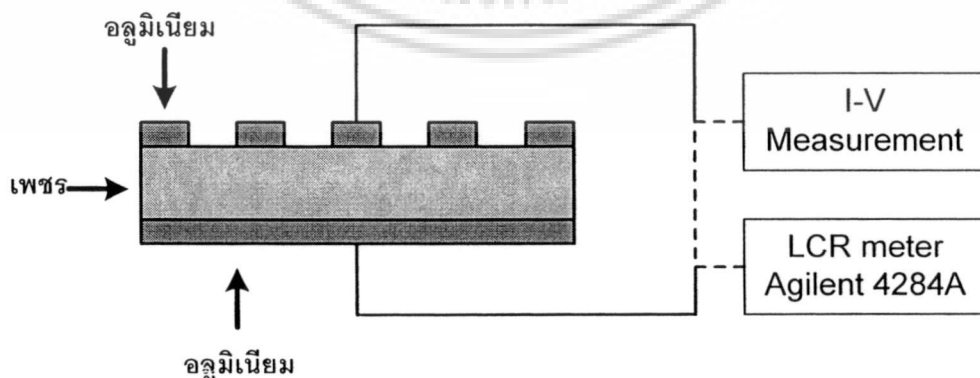
จากที่กล่าวมาทั้งหมด สรุปได้ว่าการสังเคราะห์เพชรให้เกิดเป็นลวดลายจำเป็นจะต้องพิถีพิถัน และควบคุมขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างให้ละเอียดรอบคอบ มิฉะนั้นแล้วผลที่ได้จะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นซึ่งจะไม่เป็นผลดีต่อการนำไปใช้งานต่อไป อย่างไรก็ตามหากมีการควบคุมขั้นตอนต่างๆ อย่างเหมาะสมก็จะได้เพชรเป็นลวดลายตามที่ต้องการ

4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หัวข้อที่แล้วเราได้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเพชร ส่วนหัวข้อนี้เราจะทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้ง โครงสร้างอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและ อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร การต่ออุปกรณ์เพื่อทำการวัดคุณลักษณะกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR Meter แสดงตามโครงสร้างตัวอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและ อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 การต่ออุปกรณ์เพื่อวัดคุณลักษณะกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร

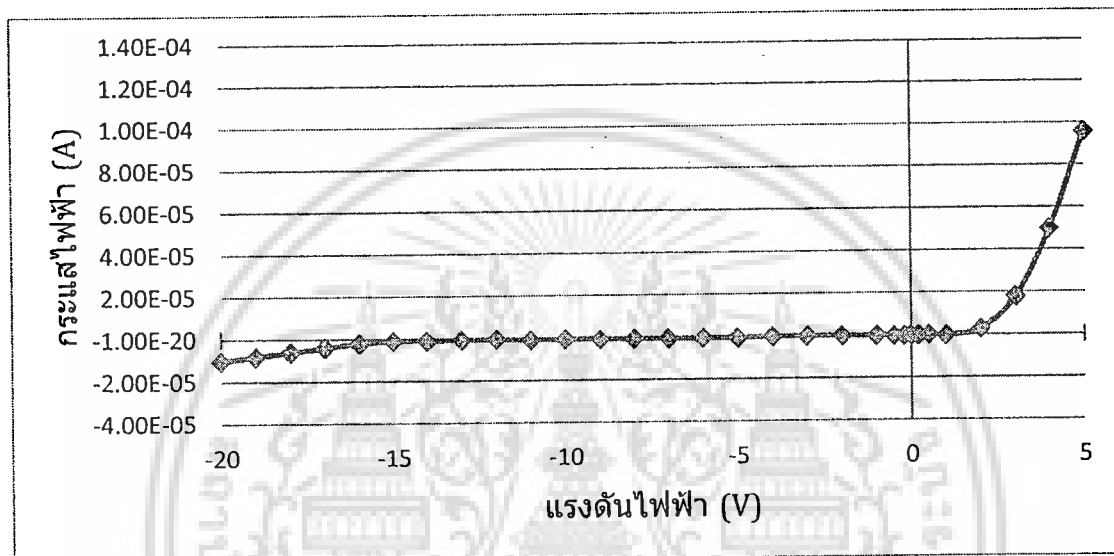


รูปที่ 4.12 การต่ออุปกรณ์เพื่อวัดคุณลักษณะกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

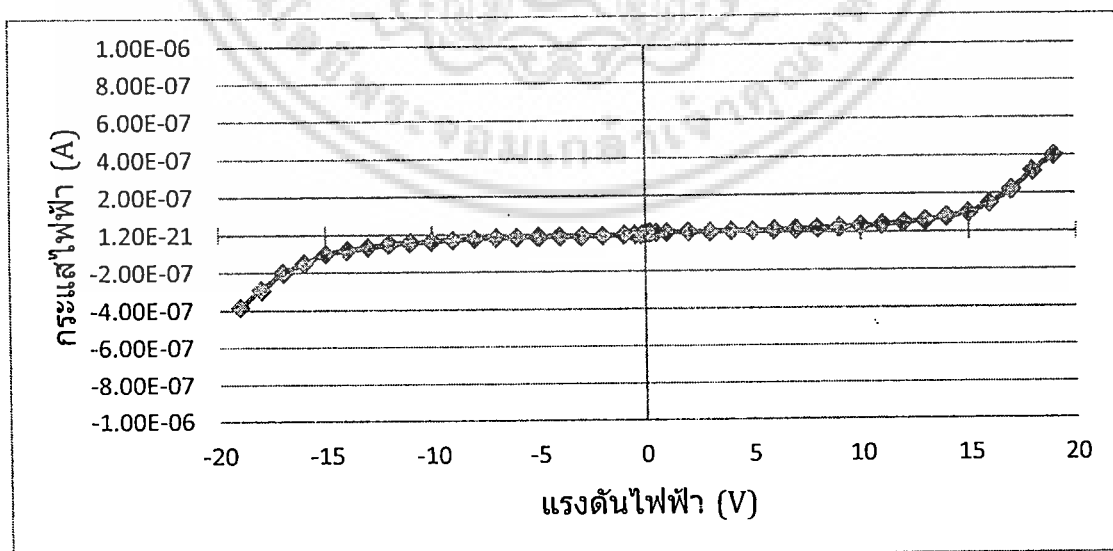
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร และอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

นำอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร มาศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 °C โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า -20 V ถึง 5 V สำหรับอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร และ -20 V ถึง 20 V สำหรับอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าวไหลย้อนกลับของอุปกรณ์ชนิดซีดีโฟโตไดโอดชนิดเพชรที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 5 V มีค่ากระแสไฟฟ้าวไหลประมาณ 11 nA และในขณะที่อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 5 V มีค่ากระแสไฟฟ้าวไหลประมาณ 13 nA ในขณะที่อุปกรณ์ MSM ชนิดเพชรผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า 5 V มีค่ากระแสไฟฟ้าวไหลประมาณ 10 nA จะเห็นว่าที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 5 V กระแสไฟฟ้าวของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร มีค่ามากกว่าอุปกรณ์ชนิดซีดีโฟโตไดโอดชนิดเพชร เนื่องจากในขณะที่ไม่มีแสงผลของพื้นที่ผิวบริเวณปลอดพาหะและสนามไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร มีสองฝั่งแต่อุปกรณ์ชนิดซีดีโฟโตไดโอดชนิดเพชรมีฝั่งเดียว จึงทำให้อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร มีกระแสไฟฟ้าวไหลมากกว่าอุปกรณ์ชนิดซีดีโฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีบริเวณปลอดพาหะฝั่งเดียว

4.2.2 ผลการตอบสนองต่อแสง UV ของอุปกรณ์ชนิดซีดีโฟโตไดโอดชนิดเพชร และ อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะที่ต่างกัน

นำอุปกรณ์ชนิดซีดีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น ดังรูปที่ 4.15 มาศึกษาการตอบสนองทางแสง UV โดยนำมาฉายแสง UV ความยาวคลื่น 210 nm ที่ความเข้ม $32 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ และจ่ายไบแอสย้อนกลับแรงดัน 3 V ให้แก่อุปกรณ์ ที่อุณหภูมิ 25°C ผลการทดลองดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ตามลำดับ

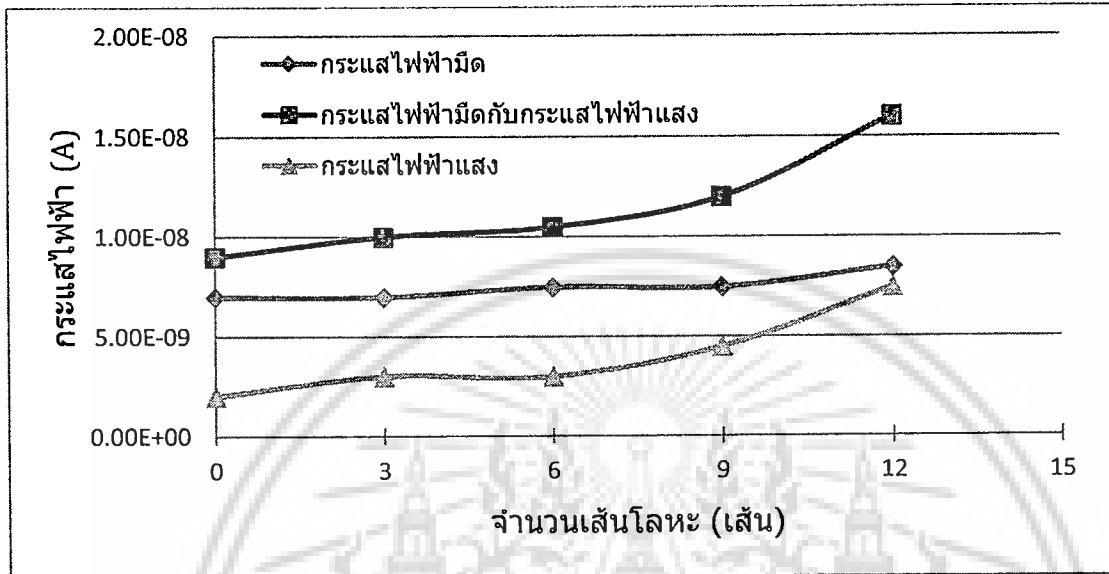


รูปที่ 4.15 แบบจำลองโครงสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบนตามจำนวนเส้นโลหะ

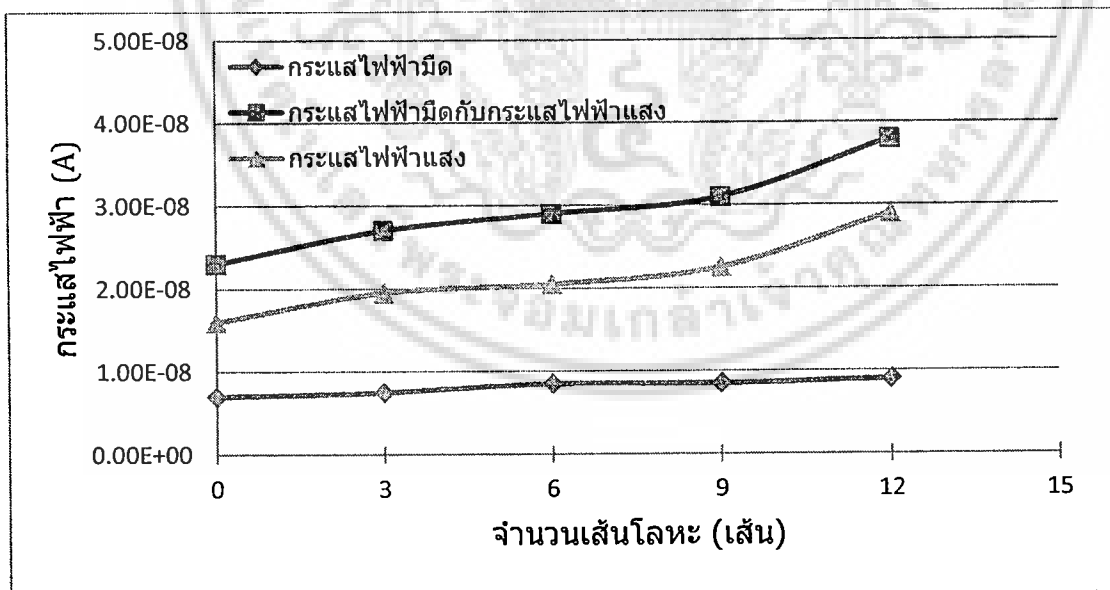
จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างจากเพชรที่มีเงื่อนไขเส้นโลหะคือ 12 เส้น มีการตอบสนองทางแสง UV ดีที่สุด ทั้งที่เป็นอุปกรณ์ชนิดซีดีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร โดยอุปกรณ์ชนิดซีดีโฟโตไดโอดชนิดเพชรให้กระแสไฟฟ้าแสง 7 nA และอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรให้กระแสไฟฟ้าแสง 28 nA เนื่องจากโครงสร้างที่มีเงื่อนไขเส้นโลหะ 12 เส้น เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างลดทอนของโลหะมากที่สุด ทำให้มีพื้นที่บริเวณปลอดพาหะมากที่สุด จึงมีโอกาสจะเกิดพาหะอิสระมากกว่าอุปกรณ์ที่มีบริเวณปลอดพาหะน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลอดภัยน้อย จากรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อลดค่าของขั้วลดลงส่งผลให้มีบริเวณปลอดภัยน้อยลง โอกาสที่อิเล็กทรอนิกส์ถึงขั้วก็มีปริมาณน้อยลง ทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแสงน้อยลง ดังนั้นควรเลือกใช้อุปกรณ์ ที่มีเงื่อนไขเส้นโลหะ 12 เส้น เนื่องจากให้กระแสไฟฟ้าแสงมากที่สุด



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์และจำนวนเส้นโลหะของอุปกรณ์ชนิดพีไอทีไอไอโอดชนิดเพชรเมื่อทำการฉายแสง UV

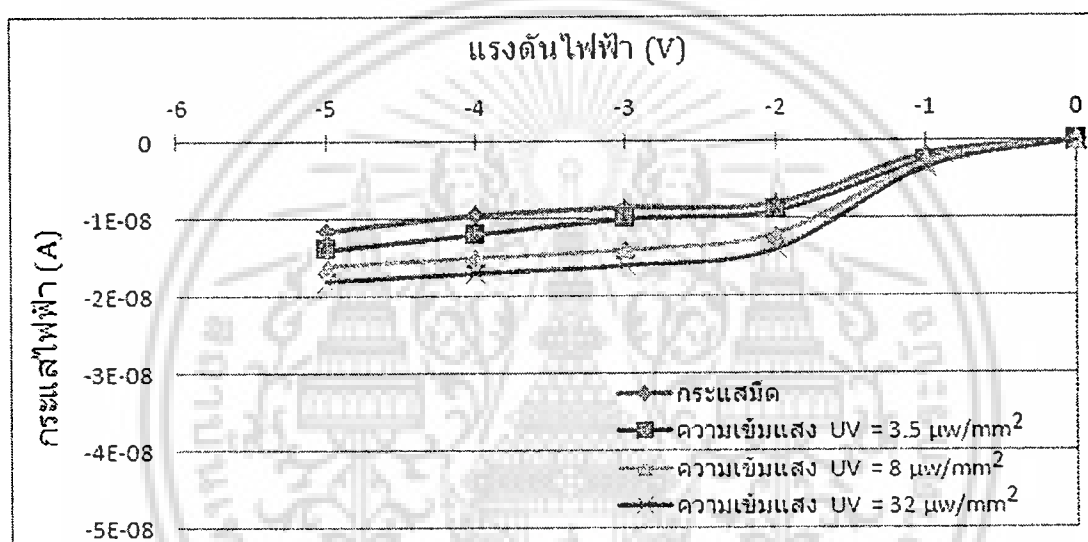


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์และจำนวนเส้นโลหะของอุปกรณ์ MSM พีไอทีไอไอโอดชนิดเพชรเมื่อทำการฉายแสง UV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการตอบสนองต่อรังสี UV ของอุปกรณ์ขอตติ์โฟโตไดโอดชนิดเพชรและ อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่ความเข้มของรังสี UV ที่ต่างกัน

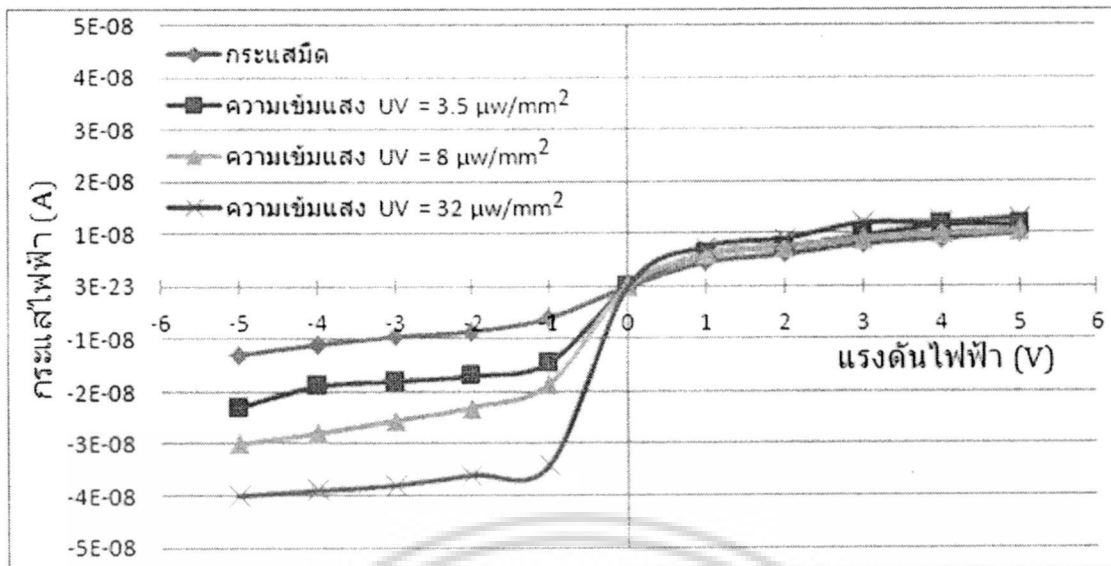
นำอุปกรณ์ขอตติ์โฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มาศึกษาการตอบสนองทางแสง UV โดยนำมาฉายแสง UV ความยาวคลื่น 210 nm ที่ความเข้มแสง $3.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ และ $32 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ จ่ายแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 0 V ถึง 5 V ให้แก่อุปกรณ์ขอตติ์โฟโตไดโอดชนิดเพชร และจ่ายแรงดันไฟฟ้า 5 V ถึง -5 V ให้แก่อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ที่อุณหภูมิ 25°C ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 ตามลำดับ



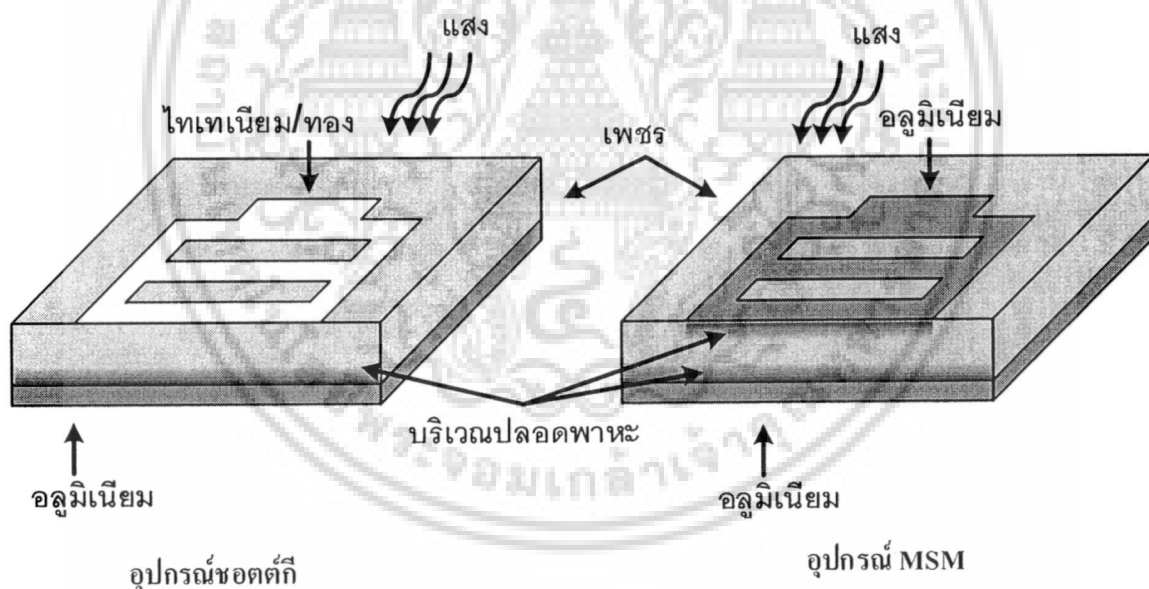
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง UV ของตัวอุปกรณ์ขอตติ์โฟโตไดโอดชนิดเพชร

จากภาพ 4.18 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มความเข้มของแสง UV จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแสงจากอุปกรณ์ขอตติ์โฟโตไดโอดชนิดเพชรเพิ่มขึ้นที่แรงดันไบแอสกลับ 5V ได้กระแสไฟฟ้าแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง $3.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ และ $32 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ เป็น 14 nA, 16 nA และ 18 nA ตามลำดับ

และจากรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มความเข้มของแสง UV จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแสงจากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเพิ่มขึ้นที่แรงดันไบแอส 5V ซึ่งเป็นการไบแอสกลับให้กับฝั่งด้านต่างตัวอุปกรณ์ กระแสไฟฟ้าแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง $3.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ และ $32 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ เป็น 24 nA, 30 nA และ 40 nA ตามลำดับ สำหรับการไบแอสกลับด้านบนให้กับตัวอุปกรณ์เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะให้กระแสไฟฟ้าแสงน้อยกว่าการไบแอสกลับด้านล่าง



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง UV ของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร



รูปที่ 4.20 แบบจำลองโครงสร้างอุปกรณ์ชนิดที่มีบริเวณปลอดพาหะ และอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีบริเวณปลอดพาหะ

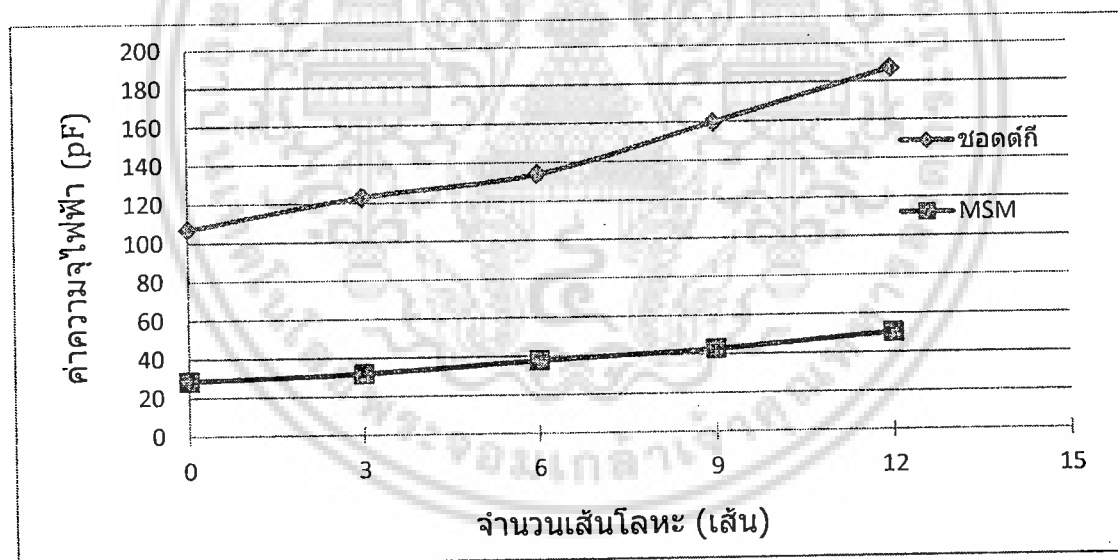
ดังนั้นการตอบสนองทางแสง UV ของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรจะให้กระแสไฟฟ้าแสงมากกว่าอุปกรณ์ชนิดที่มีบริเวณปลอดพาหะเนื่องจากโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ชนิดที่มีบริเวณปลอดพาหะเพียงที่เดียว แต่อุปกรณ์ MSM มีบริเวณปลอดพาหะสองที่ ดังรูปที่ 4.20 ดังนั้นเมื่อทำการไบแอสให้กับตัวอุปกรณ์และแสง UV มาตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทบบริเวณปลอดพาหะด้วยกับพลังงาน $h\nu \geq E_g$ ก็จะทำให้เกิดพาหะอิสระในตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรมากกว่าตัวอุปกรณ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดเพชร อีกทั้งตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรสามารถจ่ายไบแอสได้สองทิศทาง หากทำการจ่ายไบแอสให้กับตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเราจะให้ไบแอสกลับด้านล่างและไบแอสตรงด้านบนและแสงจะเข้ามาทางด้านบนทะลุถึงด้านล่างโดยบริเวณปลอดพาหะด้านล่างจะมีพื้นที่มากกว่าด้านบนและแสงก็ไม่ถูกบังด้วยขั้วโลหะไฟฟ้าด้านบนซึ่งจะส่องไปที่บริเวณปลอดพาหะด้านล่างโดยตรงดังนั้นจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแสงมากกว่าไบแอสกลับด้านบนและไบแอสตรงด้านล่าง เนื่องจากบริเวณปลอดพาหะด้านบนมีน้อยและขั้วไฟฟ้าด้านบนก็ยังบังแสงอีกด้วย จึงทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแสงน้อยกว่า

4.2.4 ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

นำอุปกรณ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น ดังรูปที่ 4.15 มาศึกษาค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25°C ผลการทดลองดังรูปที่ 4.21



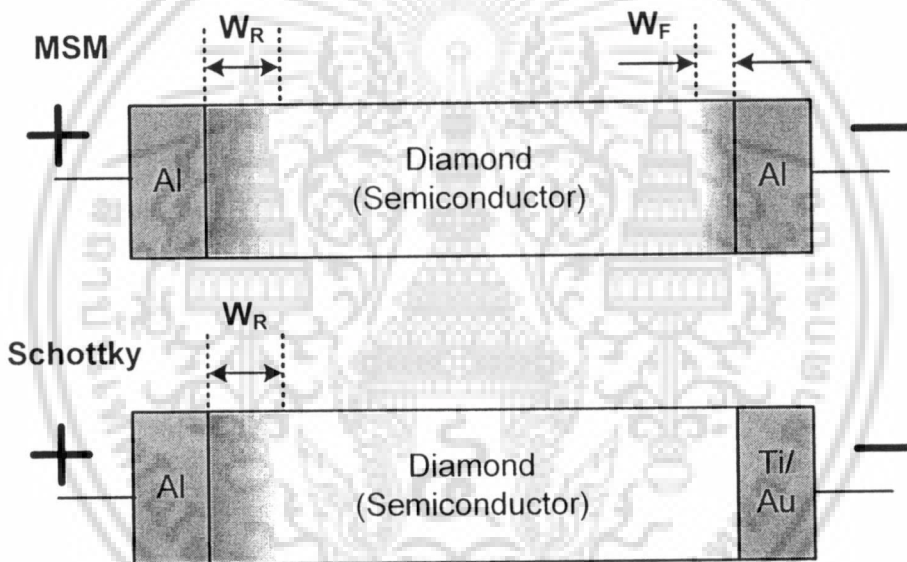
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและจำนวนเส้นโลหะของตัวอุปกรณ์ชนิดซิลิคอนและตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดเพชรและตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรมีค่าลดลงเมื่อพื้นที่ขั้วด้านบนลดลง หรือลดลงตามจำนวนเส้นโลหะที่ลดลง นั่นก็คือ ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามสมการ $C = \frac{\epsilon_s A}{W}$ พบว่าเงื่อนไข

จำนวนเส้นโลหะ 12 เส้นอุปกรณ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดเพชรมีค่าความจุไฟฟ้า 187 pF และ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรมีค่าความจุไฟฟ้า 50 pF ดังนั้นจะพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรมีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ MSM เนื่องจากตัวอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรมีบริเวณปลอดพาหะบริเวณเดียวก็คือ W_R ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ชอตต์กีคือ $C_{\text{schottky}} = \frac{\epsilon_S A}{W_R}$ ส่วนค่าความจุไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ MSM มีบริเวณปลอดพาหะสองที่ก็คือ W_R และ W_F ดังรูปที่ 4.22 ทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าสองค่า นั่นก็คือ $C_R = \frac{\epsilon_S A}{W_R}$ และ $C_F = \frac{\epsilon_S A}{W_F}$ โดยผลรวมค่าความจุไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ MSM คือ $C_{\text{MSM}} = \frac{C_R C_F}{C_R + C_F}$ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้า C_{schottky} ของตัวอุปกรณ์ชอตต์กีมีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้า C_{MSM} ของตัวอุปกรณ์ MSM นั้นเอง



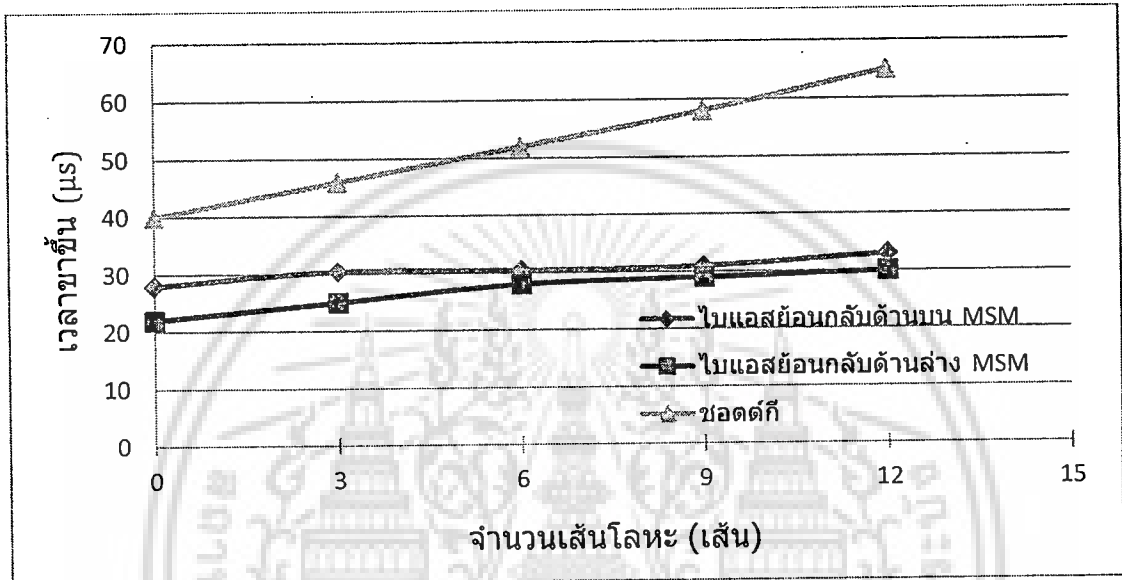
รูปที่ 4.22 ลักษณะพื้นที่บริเวณปลอดพาหะของตัวอุปกรณ์ชอตต์กีและตัวอุปกรณ์ MSM

4.2.5 ผลการตอบสนองทางเวลาของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร และ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

นำอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น ดังรูปที่ 4.15 มาศึกษาการตอบสนองทางเวลาของอุปกรณ์ โดยนำมาฉายด้วยแสงแบบพัลส์ และจ่ายแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 3 V ให้แก่อุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและจ่ายแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 3 V ให้ทั้งด้านบนและล่างแก่อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่อุณหภูมิ 25 °C สำหรับเวลาขาขึ้นผลการทดลองดังรูปที่ 4.23 และสำหรับเวลาขาลงดังรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

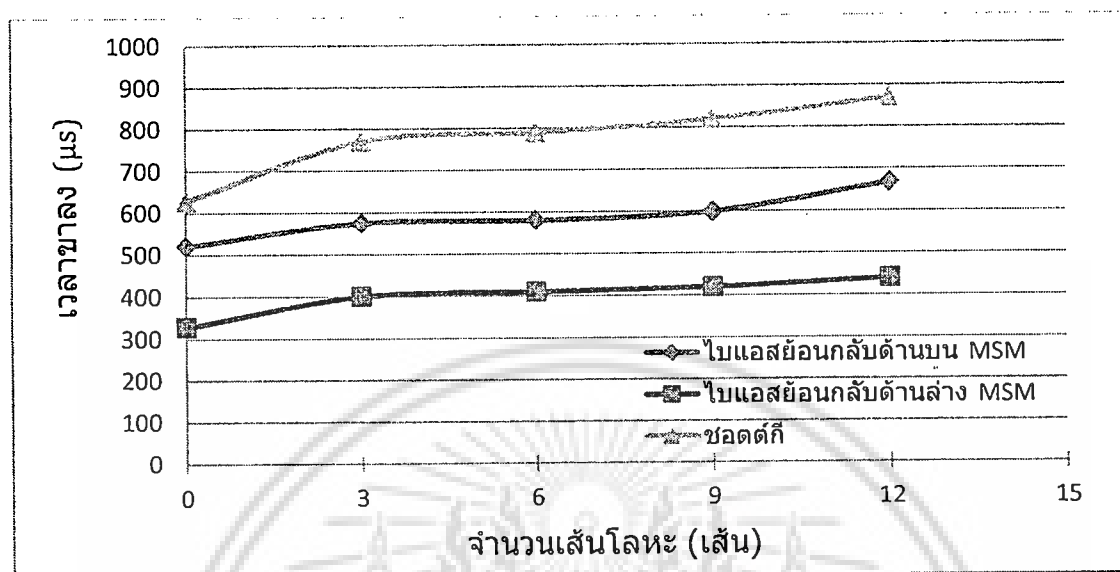
โดยปรกติเวลาตอบสนองของอุปกรณ์ จะขึ้นอยู่กับเวลาพักพา T_{diff} คือ $T_{diff} = \frac{W^2}{\mu V_R}$, เวลาแพร่ซึม T_{diff} คือ $T_{diff} = \frac{d^2}{2D_C}$ และค่าคงที่เวลา T_{RC} คือ $T_{RC} = R_L C_j$ ดังนั้นเวลาตอบสนองขาขึ้นของอุปกรณ์ส่วนใหญ่ก็จะขึ้นอยู่กับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ W , ระยะทางการแพร่ d , และความจุรอยต่อ C_j



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นกับจำนวนเส้น โลหะของตัวอุปกรณ์ชอตต์กี โฟโตไดโอดชนิดเพชรและตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

จากรูปที่ 4.23 พบว่าเวลาตอบสนองขาขึ้นของอุปกรณ์ชอตต์กี โฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเส้นโลหะมากขึ้น เนื่องจากที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีพื้นที่ A ขั้วไฟฟ้าด้านบนมาก จึงส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่ามากขึ้นคือ $T_{RC} = R_L C_j$ และยังพบอีกว่าเวลาตอบสนองขาขึ้นของตัวอุปกรณ์ชอตต์กี โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีค่า $65 \mu s$ ซึ่งมากกว่าเวลาตอบสนองขาขึ้นของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรคือ $30 \mu s$ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้า $C_{schottky}$ ของตัวอุปกรณ์ชอตต์กี โฟโตไดโอดชนิดเพชรมีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้า C_{MSM} ของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร และยังพบอีกว่าการไบแอสกลับด้านล่างของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรจะให้ค่าเวลาตอบสนองขาขึ้นน้อยกว่าการไบแอสกลับด้านบนของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเนื่องจากโครงสร้างด้านบนของเพชรจะมีเกรนขนาดใหญ่ ส่วนด้านล่างซึ่งเชื่อมติดกับฐานรองในขณะสังเคราะห์เพชรจะมีขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรก็จะมีขั้วโลหะอยู่ด้านบนและด้านล่างของเพชร เมื่อด้านล่างได้รับไบแอสย้อนกลับ เกรนขนาดเล็กที่

ด้านบนได้รับไบแอสย้อนกลับ เกรนขนาดเล็กที่อยู่ด้านล่างจะอยู่ภายนอกบริเวณปลอดภัยมี ประจุผ่านเคลื่อนที่ผ่านทำให้การเคลื่อนที่ผ่านประจุช้าลง



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาลงกับจำนวนเส้นโลหะ ของตัวอุปกรณ์ชดดtk โฟโตไดโอดชนิดเพชรและตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

จากรูปที่ 4.24 พบว่าเวลาตอบสนองขาลงของอุปกรณ์ชดดtk โฟโตไดโอดชนิดเพชรและ อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรสอดคล้องกันกับเวลาขาขึ้นคือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเส้น โลหะเพิ่มขึ้น และเวลาขาลงของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรก็มีค่าน้อยกว่าอุปกรณ์ ชดดtk โฟโตไดโอดชนิดเพชร

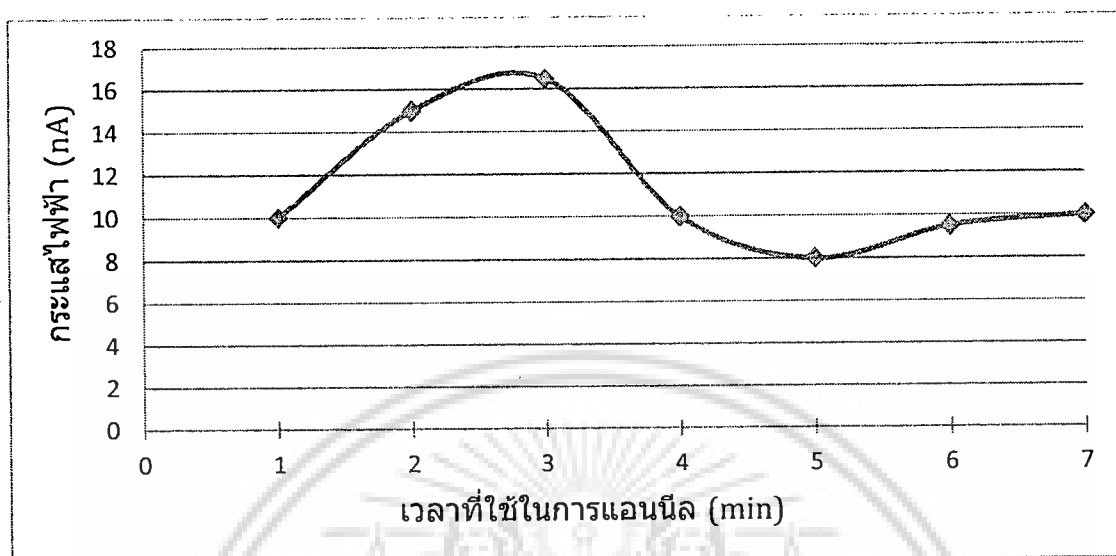
4.2.6 กระแสไฟฟ้ารั่วไหลกับเวลาที่ใช้ในการแอนนัลของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอด ชนิดเพชร

นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่สร้างขั้วไฟฟ้าอูมิเนียมด้านบนและด้านล่าง เรียบร้อยแล้วที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น นำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 450 °C ในบรรยากาศ ไนโตรเจน โดยใช้เวลาดั้งแต่ 1 min ถึง 7 min จากนั้นศึกษาผลของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลกับเวลาที่ใช้ ในการแอนนัลของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่อุณหภูมิ 25 °C โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า ย้อนกลับ 3 V ผลการทดลองดังรูปที่ 4.25

พบว่าเมื่ออุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรได้แอนนัลเป็นเวลา 3 min ปริมาณ กระแสไฟฟ้ารั่วไหลย้อนกลับของอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของ รอยต่อ เมื่อมีการเพิ่มเวลาในการแอนนัล 5 min ความสมบูรณ์ของรอยต่อดีขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้า รั่วไหลลดลง และเมื่อมีการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการแอนนัลขึ้นอีกกระแสไฟฟ้ารั่วไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจาก

อกล... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแอนนัลจะทำให้โลหะแทรกซึมลึกกลงทำให้โลหะไปพบกับขอบเขตเกรนถัดไป ดังนั้นการใช้เวลาในการแอนนัล 5 min เหมาะสมที่สุดโดยมีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลต่ำประมาณ 8 nA



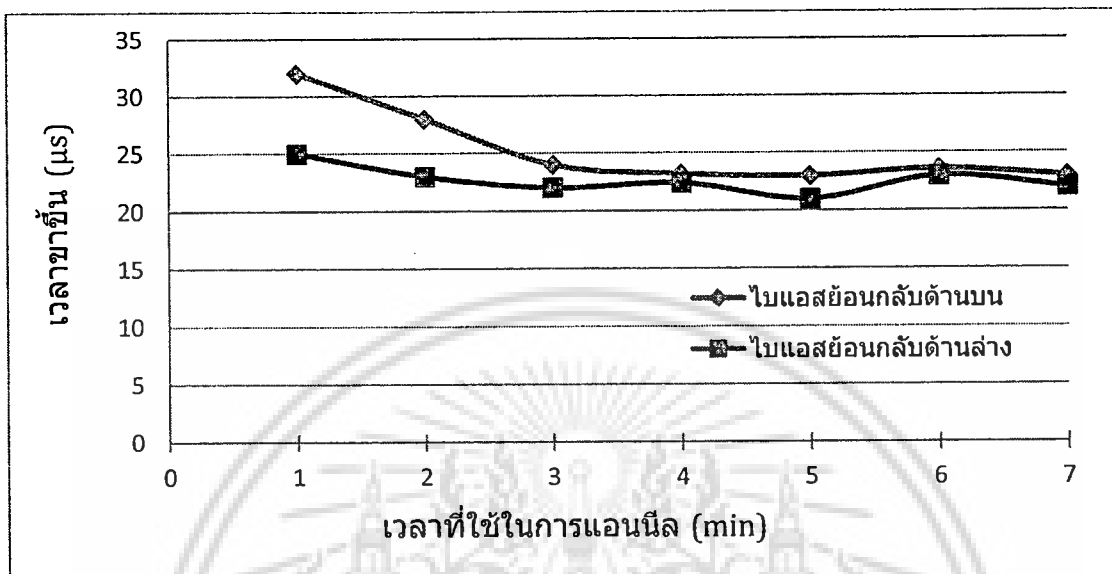
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ารั่วไหลกับเวลาที่ใช้ในการแอนนัลของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

4.2.7 ผลการตอบสนองทางเวลาของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการแอนนัล

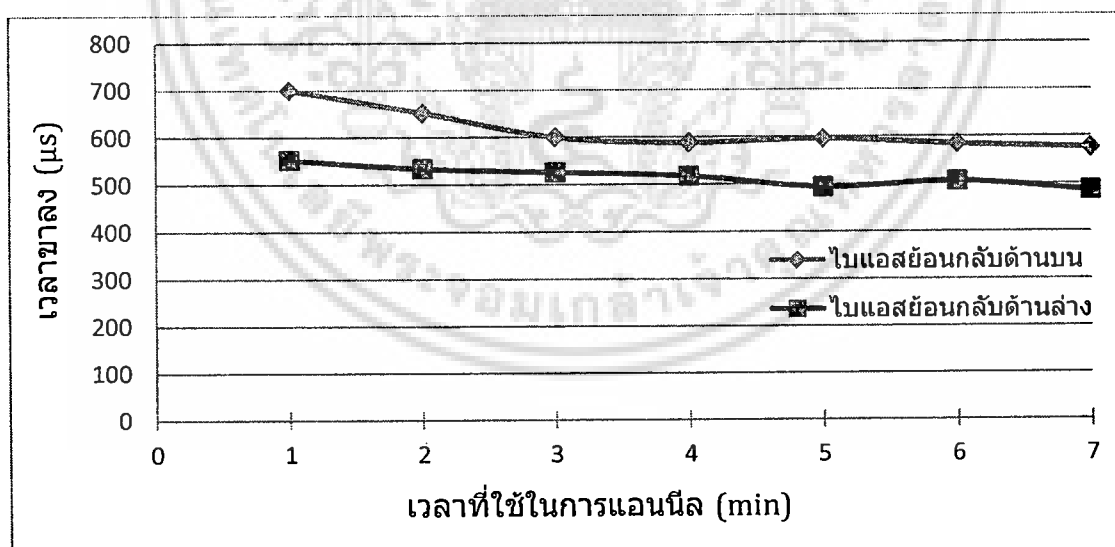
นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรหลังจากทำการแอนนัล ตั้งแต่ 1 min ถึง 7 min แล้วมาฉายแสงแบบพัลส์ โดยไบแอสย้อนกลับแรงดัน 3 V ทั้งด้านบนและด้านล่างให้แก่อุปกรณ์ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อศึกษาเวลาในการตอบสนองของตัวอุปกรณ์ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27

พบว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรมีช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาที่ลดลงตามเวลาที่มีการแอนนัลเพิ่มขึ้น การแอนนัลจะทำให้โลหะแทรกซึมลึกลงในเนื้อเพชรทำให้รอยต่อมีความสมบูรณ์มีผลให้เวลาพัดพาประจุพาหะลดลง โดยประจุพาหะที่เคลื่อนที่ภายในบริเวณปลอดพาหะจะเคลื่อนที่ถึงขั้วได้เร็วขึ้น พบว่าระยะเวลาขาขึ้นและขาลงเริ่มจะคงที่เวลาแอนนัล 3 min และเมื่อทำการแอนนัลจนถึงเวลา 5 min จะมีช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงจากการไบแอสกลับด้านบนคือ 23 μ s และ 596 μ s และช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงการไบแอสกลับด้านล่างคือ 21 μ s และ 494 μ s และการให้ไบแอสย้อนกลับด้านบนจะมีช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงมากกว่าการให้ไบแอสย้อนกลับด้านล่าง เนื่องจากโครงสร้างด้านบนของเพชรจะมีเกรนขนาดใหญ่ ส่วนด้านล่างซึ่งเชื่อมติดกับฐานรองในขณะสังเคราะห์เพชรจะมีขนาดเกรนขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีขั้วโลหะอยู่ด้านบนและด้านล่างของเพชร เมื่อด้านล่างได้รับไบแอสย้อนกลับ

เกรนขนาดเล็กที่อยู่ด้านล่างจะอยู่ในบริเวณปลอดภัย ทำให้ประจุพาหะเคลื่อนที่ถึงขั้วไฟฟ้าได้เร็ว และเมื่อด้านบนได้รับไบแอสย้อนกลับเกรนขนาดเล็กจะอยู่นอกบริเวณปลอดภัย เมื่อมีประจุผ่านเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตเกรนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากทำให้การเคลื่อนที่ผ่านประจุช้าลง



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการแอนนัลของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

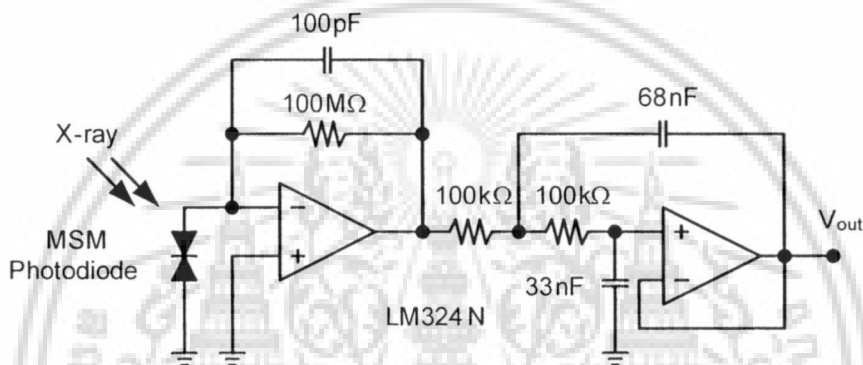


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาลงกับเวลาที่ใช้ในการแอนนัลของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

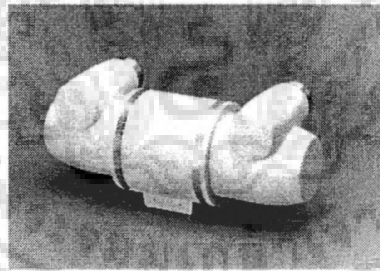
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 ผลการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะที่ต่างกัน

ในการทดสอบการตรวจจับรังสีเอกซ์ของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ตัวอุปกรณ์จะถูกนำไปต่อกับวงจรขยายในลักษณะแบบโฟโตโวลตาอิกโหมดดังรูปที่ 4.28 โดยวงจรแรกจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าแสงเป็นแรงดันไฟฟ้า มีอัตราขยาย 100 mV/nA วงจรภาคที่สองจะทำหน้าที่กรองความถี่รบกวน จากผลการตอบสนองทางแสง UV ของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร คิดว่าอุปกรณ์ชนิดนี้คือโฟโตไดโอดชนิดเพชร ดังนั้นจึงเลือกอุปกรณ์ดังกล่าวมาทำการทดสอบการตอบสนองทางรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.28 การต่ออุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรกับวงจรขยายและกรองสัญญาณ



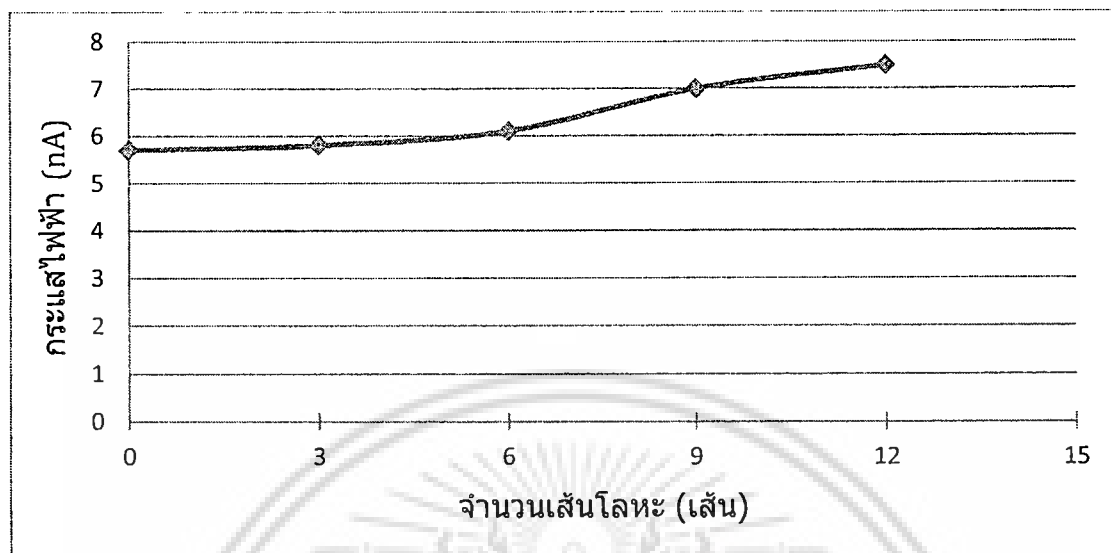
รูปที่ 4.29 อุปกรณ์ฉายรังสีเอกซ์ยี่ห้อ Varian รุ่น S-780

ค่าความเข้มรังสีจากตัวเครื่องฉายรังสี Varian รุ่น S-780						
แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องฉายรังสีเอกซ์						
แรงดัน 100 kV	6 mA	8 mA	10 mA	12 mA	15 mA	50 mA
ความเข้มรังสีเอกซ์	41 μSv	45 μSv	49 μSv	45 μSv	59 μSv	150 μSv
แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เครื่องฉายรังสีเอกซ์						
กระแสไฟฟ้า 6 mA	50 kV	60 kV	70 kV	80 kV	90 kV	100 kV
ความเข้มรังสีเอกซ์	41 μSv	45 μSv	49 μSv	45 μSv	59 μSv	41 μSv

นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น ดังรูปที่ 4.15 มาฉายรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่อง X-Ray ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มรังสี $150 \mu\text{Sv}$ ที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อศึกษาการตอบสนองทางรังสีเอกซ์ของตัวอุปกรณ์ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้น โลหะกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์

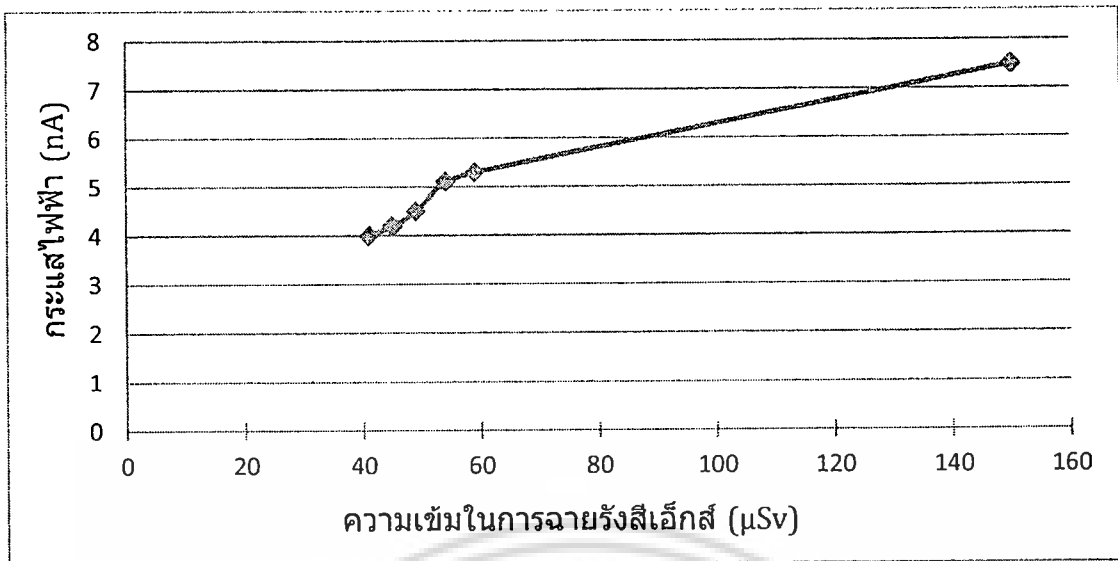
พบว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น มีการตอบสนองจากรังสีเอกซ์ดีที่สุดโดยมีกระแสไฟฟ้าแสง 7.5 nA เนื่องจากโครงสร้างที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น มีโครงสร้างลวดลายของโลหะมาก ทำให้มีพื้นที่บริเวณปลอดพาหะมาก จึงมีโอกาสจะเกิดพาหะอิสระมากกว่าอุปกรณ์ที่มีบริเวณปลอดพาหะน้อย จากรูปที่ 4.30 พบว่าเมื่อลวดลายของขั้วโลหะน้อยลงทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแสงน้อยลง ดังนั้นควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีลวดลายของขั้วโลหะมากคือ 12 เส้น เนื่องจากให้กระแสไฟฟ้าแสงมากที่สุด และสอดคล้องกับผลการตอบสนองทางแสง UV อีกด้วย

4.2.9 ผลการตอบสนองของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรต่อความเข้มรังสีเอกซ์ที่ต่างกัน

นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มาฉายรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่อง X-Ray ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785 ที่ความเข้มรังสี $41 \mu\text{Sv}$, $45 \mu\text{Sv}$, $49 \mu\text{Sv}$, $55 \mu\text{Sv}$, $59 \mu\text{Sv}$ และ $150 \mu\text{Sv}$ ที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อศึกษาการตอบสนองทางรังสีเอกซ์ของตัวอุปกรณ์ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.31

จากรูปที่ 4.31 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มของรังสีเอกซ์ จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอุปกรณ์ได้มากขึ้นตามความเข้มรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้นที่ความเข้มรังสี $150 \mu\text{Sv}$ จะได้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 7.5 nA

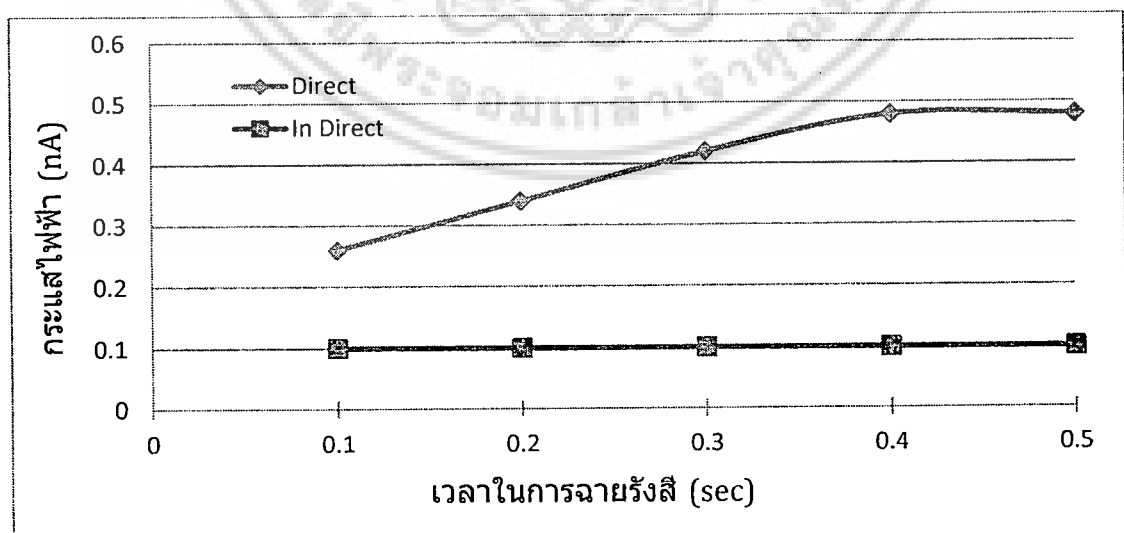
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอ็กซ์กับสัญญาณกระแสไฟฟ้า
ของตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

4.2.10 ผลการตอบสนองต่อเวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์กับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น ซึ่งมีผลการตอบสนองทางรังสีเอ็กซ์ดีที่สุดมาฉายรังสีเอ็กซ์ โดยใช้เครื่อง X-Ray ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785 ที่ค่าความเข้มของรังสี $26 \mu\text{Sv}$ โดยฉายที่ตั้งแต่เวลา 0.1 s ถึง 0.5 s ที่อุณหภูมิ 25°C เพื่อศึกษาผลของเวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์กับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์โดยทำการฉายรังสีเอ็กซ์โดยตรงและทางอ้อมโดยฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 ผลการทดลองดังรูปที่ 4.32



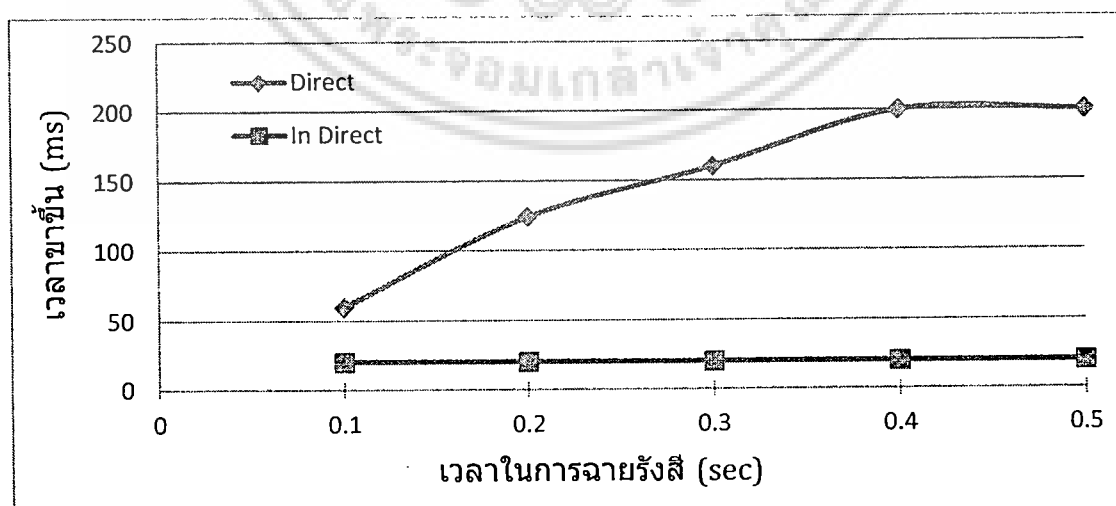
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร วัตถุประสงค์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีการตอบสนองจากรังสีเอกซ์โดยให้กระแสไฟฟ้าแสงเพิ่มขึ้นจากเวลา 0.1 s ถึง 0.3 s และมีกระแสไฟฟ้าแสงคงที่จากเวลา 0.4 s ถึง 0.5 s เนื่องจากในช่วงเวลา 0.1 s ถึง 0.3s เมื่อรังสีเอกซ์ถูกฉายเป็นเวลาที่ยาวขึ้นทำให้ปริมาณพาหะได้รับพลังงานมากขึ้นเกิดเป็นพาหะอิสระมากขึ้น จึงเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าแสงที่เพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าการฉายรังสีเอกซ์ด้วยเข็มคงที่จากเครื่อง X-Ray ก็ตาม และที่เวลา 0.4 s ถึง 0.5 s มีความคงที่ของกระแสไฟฟ้าแสงเนื่องจากเกิดการอิ่มตัวของพาหะคือไม่เกิดพาหะอิสระเพิ่มขึ้นอีกจึงทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแสงคงที่ แต่สำหรับการฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 จะได้กระแสไฟฟ้าแสงคงที่ประมาณ 0.1 nA เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่ฉายผ่านสารเรืองแสง BaF_2 จะให้แสง UV ออกมาทันทีที่ทำการฉายรังสีเอกซ์ และด้วยกับอุปกรณ์เพชรเป็นวัสดุที่ตอบสนองได้ดีที่แสง UV อยู่แล้ว ดังนั้นทำให้อุปกรณ์สามารถตอบสนองได้ทันทีที่แสง UV ตกกระทบอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร และให้กระแสไฟฟ้าแสงคงที่ตั้งแต่เวลา 0.1 s ถึง 0.5 s แต่พบว่าการฉายผ่านสารเรืองแสง BaF_2 ให้การตอบสนองทางแสงได้น้อยกว่าการฉายโดยตรงเนื่องจากความหนาของสารเรืองแสงไปทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง

4.2.11 ผลการตอบสนองทางเวลาของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อฉายรังสีเอกซ์ในเวลาต่างกัน

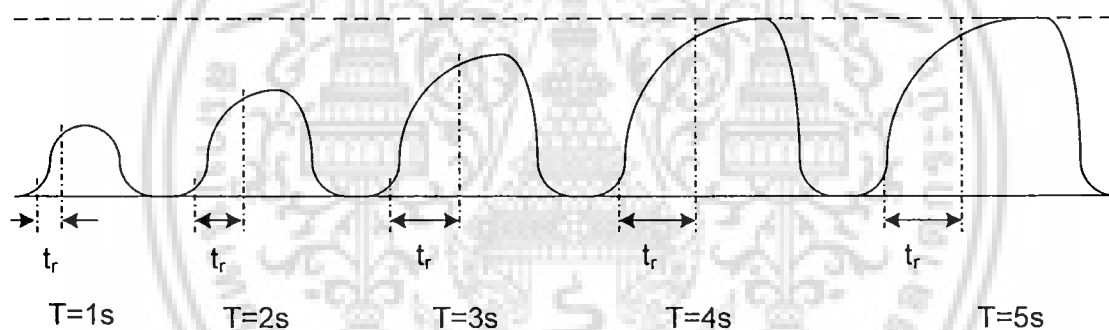
นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มาฉายรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่อง X-Ray ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785 ที่ความเข้มของรังสี 26 μSv ฉายที่ตั้งแต่เวลา 0.1s ถึง 0.5 s ที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}C$ เพื่อศึกษาการตอบสนองทางเวลาของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร โดยทำการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงและโดยอ้อมโดยฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 ผลการทดลองดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสีเอกซ์กับเวลาขาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร วัตถุประสงค์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.33 พบว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีการตอบสนองจากรังสีเอกซ์โดยมีเวลาขาขึ้นเพิ่มขึ้นจากเวลา 0.1 s ถึง 0.3 s และมีเวลาขาขึ้นคงที่จากเวลา 0.4 s ถึง 0.5 s ประมาณ 200 ms ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.34 เนื่องจากเมื่อรังสีถูกฉายเป็นเวลานานขึ้นทำให้ปริมาณพาหะได้รับพลังงานมากขึ้นเกิดเป็นพาหะอิสระมากขึ้น จึงเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าแสงที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 0.1 s ถึง 0.3 s ทำให้มีเวลาขาขึ้นเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ และช่วงเวลา 0.4 s ถึง 0.5 s มีความคงที่ของกระแสไฟฟ้าแสง เนื่องจากเกิดการอิ่มตัวของพาหะคือไม่เกิดพาหะอิสระเพิ่มขึ้นอีกจึงทำให้ได้กระแสไฟฟ้าแสงคงที่ จึงทำให้เวลาขาขึ้นคงที่ในช่วงนี้ แต่สำหรับการฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF₂ มีเวลาขาขึ้นคงที่ประมาณ 20 ms เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่ฉายผ่านสารเรืองแสง BaF₂ จะให้แสง UV ออกมา ถึงแม้ว่ามีการฉายรังสีเอกซ์ด้วยเวลานานขึ้นแต่ความเข้มของการฉายรังสีเอกซ์คงที่ จากผลของการตอบสนองทางไฟฟ้าคงที่ทำให้ได้เวลาขาขึ้นคงที่ ดังนั้นจึงควรใช้เวลาอย่างน้อยในการฉายรังสีเอกซ์เป็นเวลา 5 s สำหรับเวลาขาลงแบบ Direct มีค่า 40 ms และ In Direct มีค่า 10 ms คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง



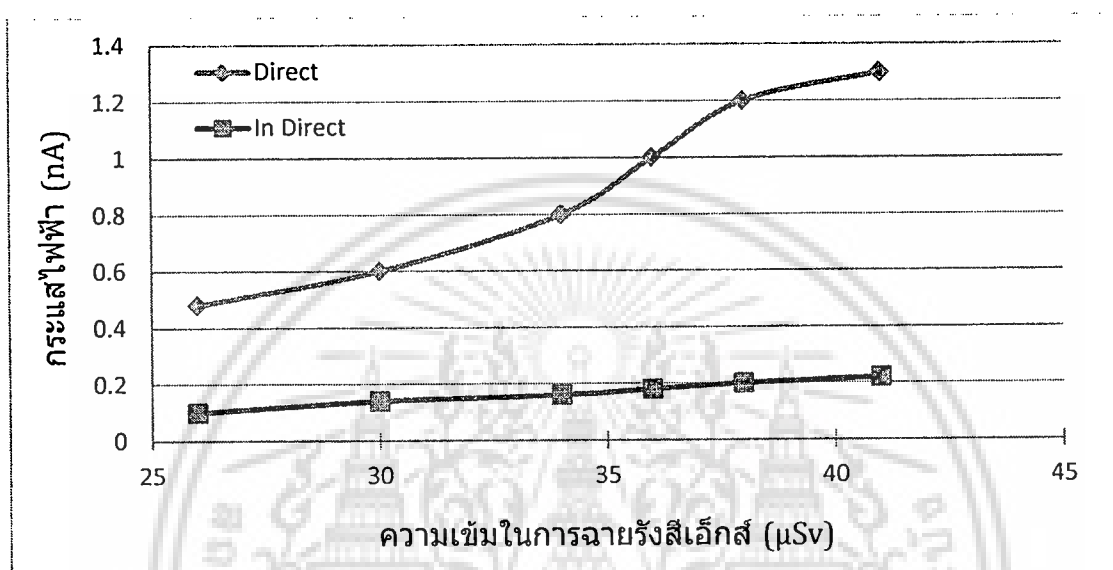
รูปที่ 4.34 ภาพจำลองลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่ได้เมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์ของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรแบบโดยตรง

4.2.12 ผลการตอบสนองต่ออุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มที่ใช้ในการฉายรังสีเอกซ์

นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น โดยใช้เครื่อง X-Ray ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785 ที่ความเข้มของรังสีเอกซ์ 26 μSv , 30 μSv , 34 μSv , 36 μSv , 38 μSv และ 41 μSv โดยฉายที่เวลา 0.5 s ที่อุณหภูมิ 25°C เพื่อศึกษาการตอบสนองของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร โดยฉายรังสีเอกซ์โดยตรงและโดยอ้อมโดยฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF₂ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.35

พบว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น ให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้นหรือตามการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องฉายรังสีเอกซ์ เนื่องจากความเข้มของรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เป็นการเพิ่มปริมาณพาหะอิสระมากขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าจึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากขึ้น ที่ความเข้มของรังสีเอกซ์ $41 \mu\text{Sv}$ ได้กระแสไฟฟ้าแสง 1.3 nA สำหรับการฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 จะได้กระแสไฟฟ้าแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มของรังสี UV ที่ให้ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มของการฉายรังสีเอกซ์ ที่ความเข้มของรังสีเอกซ์ $41 \mu\text{Sv}$ ได้กระแสไฟฟ้าแสง 0.22 nA



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร

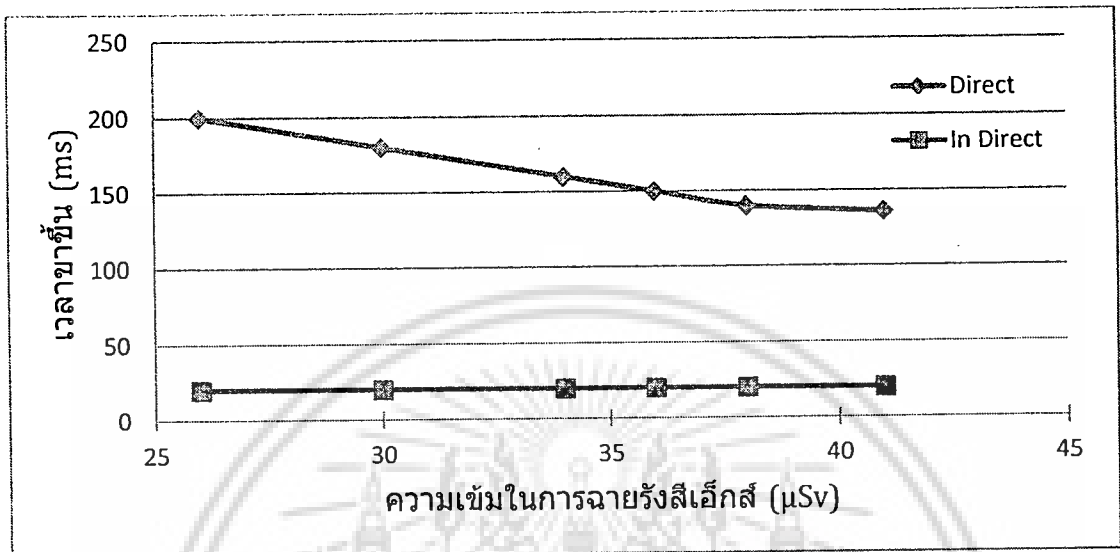
4.2.13 ผลการตอบสนองต่อเวลาขาขึ้นของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร เมื่อเปลี่ยนแปลงเข้มในการฉายรังสีเอกซ์

นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มาฉายรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่อง X-Ray ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785 ที่ความเข้มของรังสี $26 \mu\text{Sv}$, $30 \mu\text{Sv}$, $34 \mu\text{Sv}$, $36 \mu\text{Sv}$, $38 \mu\text{Sv}$ และ $41 \mu\text{Sv}$ โดยฉายที่เวลา 0.5 s ที่อุณหภูมิ 25°C เพื่อศึกษาการตอบสนองทางเวลาของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร โดยทำการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงและโดยอ้อมโดยฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 ผลการทดลองดังรูปที่ 4.36

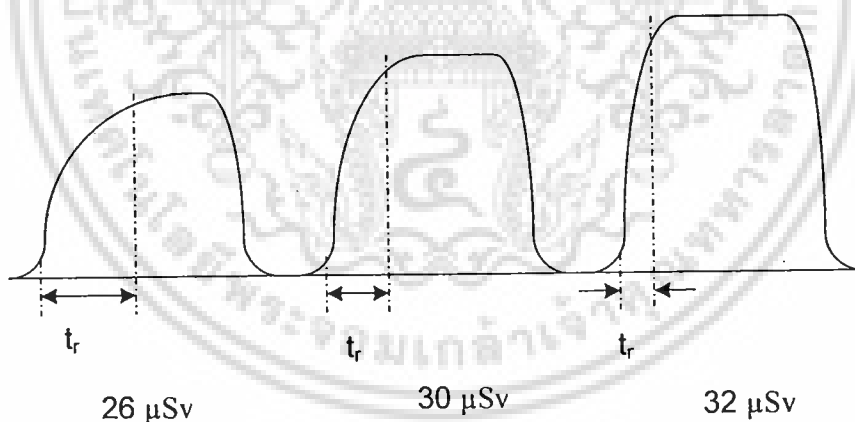
พบว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีการตอบสนองจากรังสีเอกซ์โดยมีเวลาขาขึ้นลดลงตามความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้นที่ความเข้มของรังสี $41 \mu\text{Sv}$ มีช่วงเวลาขาขึ้นประมาณ 140 ms เนื่องจากเมื่อฉายรังสีเอกซ์ด้วยความเข้มที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณพาหะได้รับพลังงานมากขึ้นเกิดเป็นพาหะอิสระเร็วขึ้นทำให้เวลาขาขึ้นลดลงตามความเข้มของรังสีที่เพิ่มขึ้นแสดงภาพจำลองการเกิดสัญญาณไฟฟ้างดังรูปที่ 4.37 สำหรับการฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 มีเวลาขาขึ้นคงที่ประมาณ 20 ms เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่ฉายผ่านสารเรืองแสง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BaF₂ จะให้แสง UV ออกมาทันทีที่มีการฉายรังสีเอกซ์ ถึงแม้ว่ามีการฉายรังสีด้วยความเข้มที่เพิ่มขึ้นก็ตาม จึงทำให้เวลาขาขึ้นก็ยังคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และเช่นเดียวกันเวลาขาลงคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง คือแบบ Direct มีค่า 40 ms และ In Direct มีค่า 10 ms



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับเวลาขาขึ้นที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร



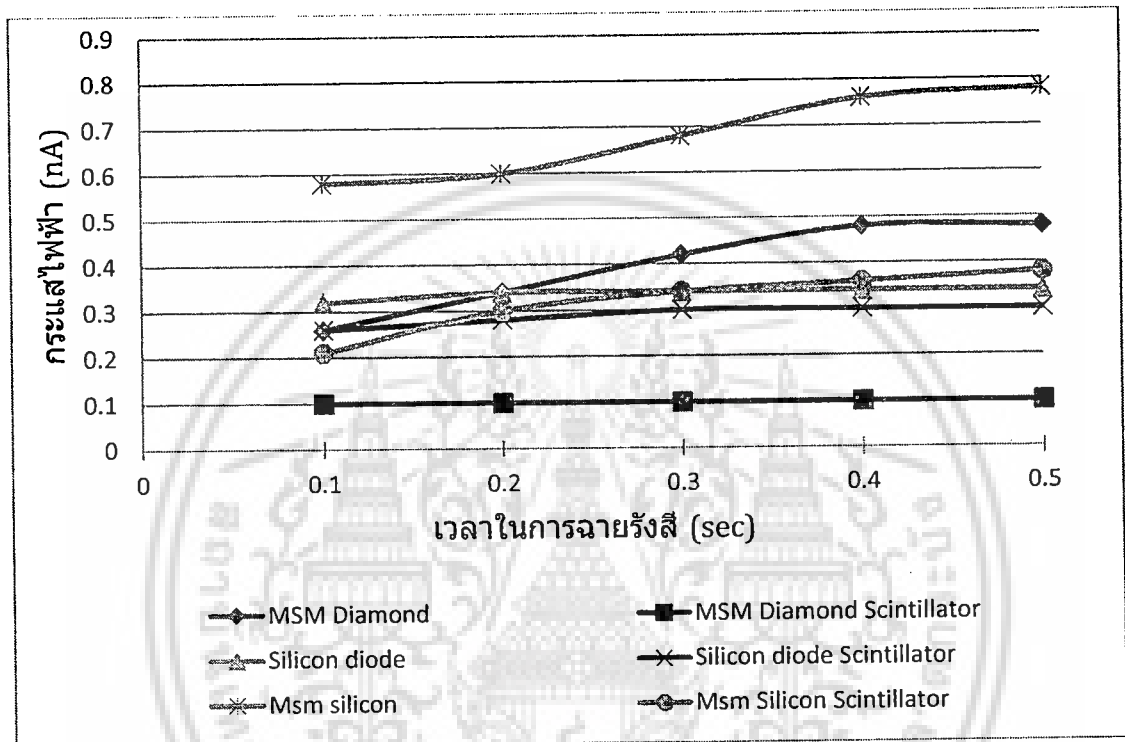
รูปที่ 4.37 ภาพจำลองลักษณะสัญญาณไฟฟ้าเมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์ของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรแบบโดยตรง

4.2.14 เปรียบเทียบผลของเวลาการฉายรังสีเอกซ์ที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร กับ Silicon photo diode และ MSM Silicon

นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเส้นใยจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น, Silicon photo diode และ MSM Silicon มาฉายรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่อง X-Ray ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785 ที่

ความเข้มของรังสี 26 μSv โดยฉายที่ตั้งแต่เวลา 0.1 s ถึง 0.5 s ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อเปรียบเทียบการ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบการตอบสนองทางสัญญาณกับเวลาตอบสนองของอุปกรณ์ โดยทำการฉายรังสีเอกซ์ โดยตรงและโดยอ้อมโดยฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 สำหรับอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรและ Silicon photo diode และ MSM Silicon มาฉายรังสีเอกซ์โดยตรงและฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสงสีเขียว ผลการทดลองการตอบสนองทางสัญญาณไฟฟ้าดังรูปที่ 4.38 และผลการทดลองการตอบสนองทางเวลาดังรูปที่ 4.39

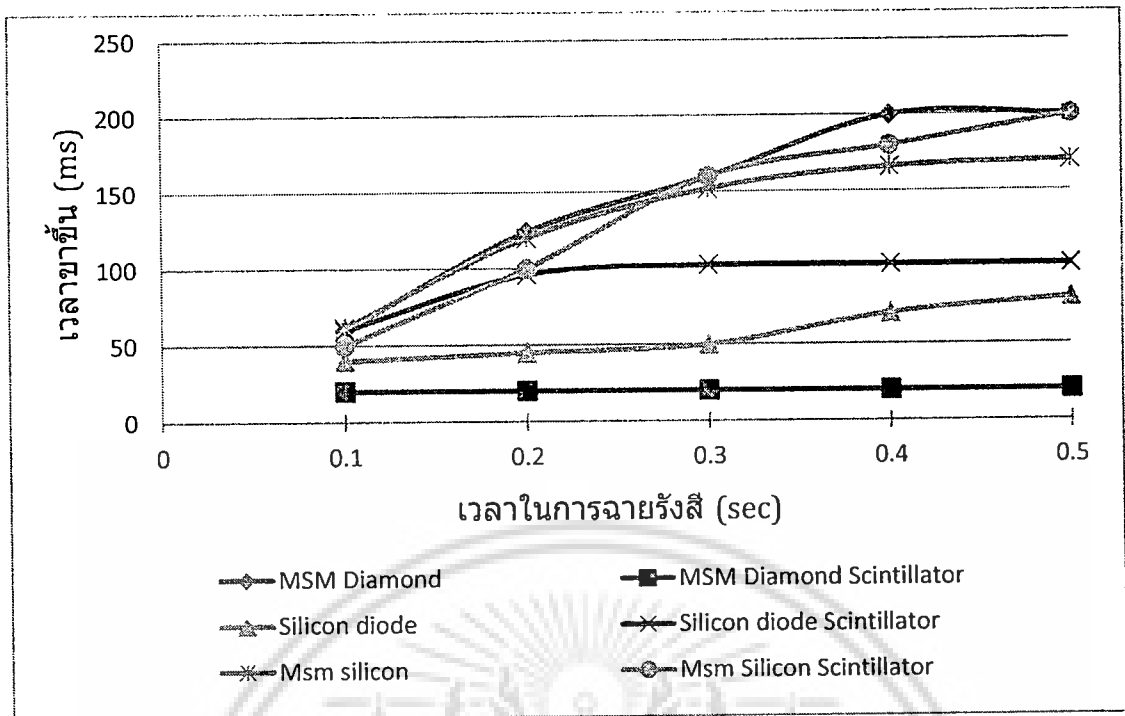


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสีเอกซ์กับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างตัวอุปกรณ์

จากรูปที่ 4.38 พบว่าอุปกรณ์ MSM Silicon ให้กระแสไฟฟ้าแสงมากกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ทั้งการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงและทางอ้อม ขณะที่ความเข้มในการฉายรังสีคงที่ทุกอุปกรณ์ให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการฉายรังสีเอกซ์นานขึ้น ยกเว้นการฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 ด้วยอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น ซึ่งให้ค่ากระแสไฟฟ้าแสงคงที่เมื่อความเข้มรังสีคงที่แม้ว่าจะมีการใช้เวลาในการฉายรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นก็ตาม

จากรูปที่ 4.39 พบว่าขณะที่ความเข้มในการฉายรังสีเอกซ์คงที่ทุกๆ อุปกรณ์จะมีช่วงเวลาขาขึ้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการฉายรังสีเอกซ์นานขึ้น ยกเว้นการฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 ด้วยอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีช่วงเวลาขาขึ้นคงที่เมื่อความเข้มรังสีคงที่แม้ว่าจะมีการใช้เวลาในการฉายรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



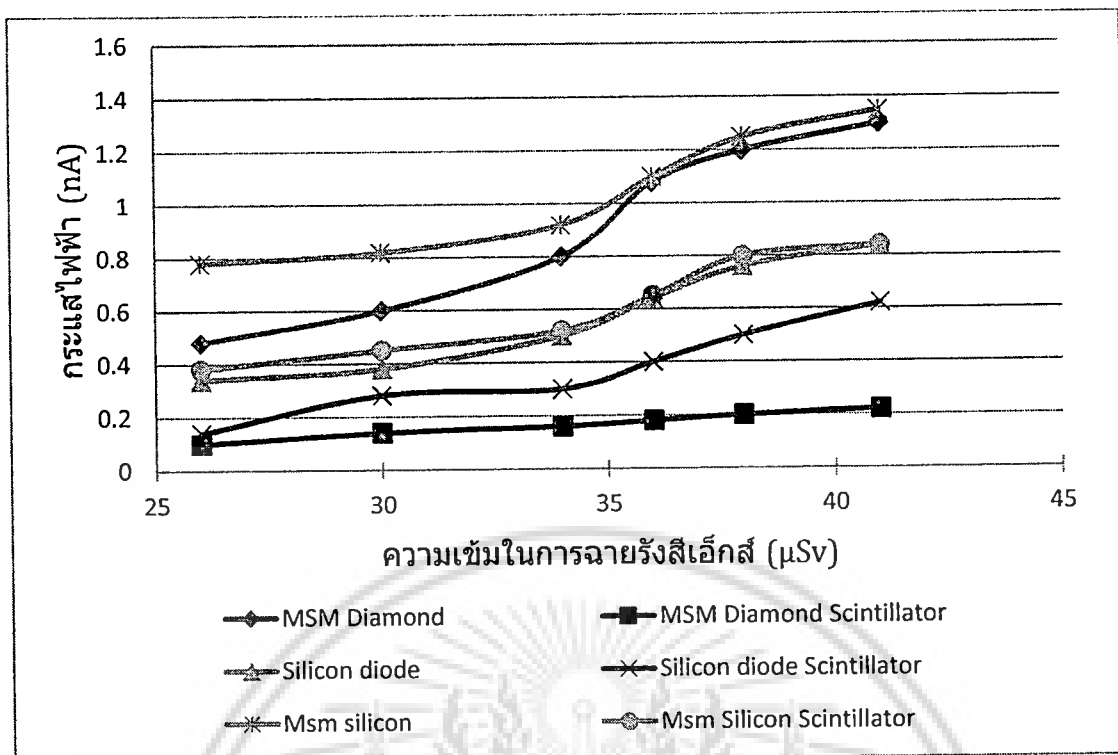
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสีเอกซ์กับเวลาขาขึ้น
ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างตัวอุปกรณ์

4.2.15 เปรียบเทียบความเข้มที่ใช้ในการฉายรังสีเอกซ์ที่ได้จากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร กับ Silicon photo diode และ MSM Silicon

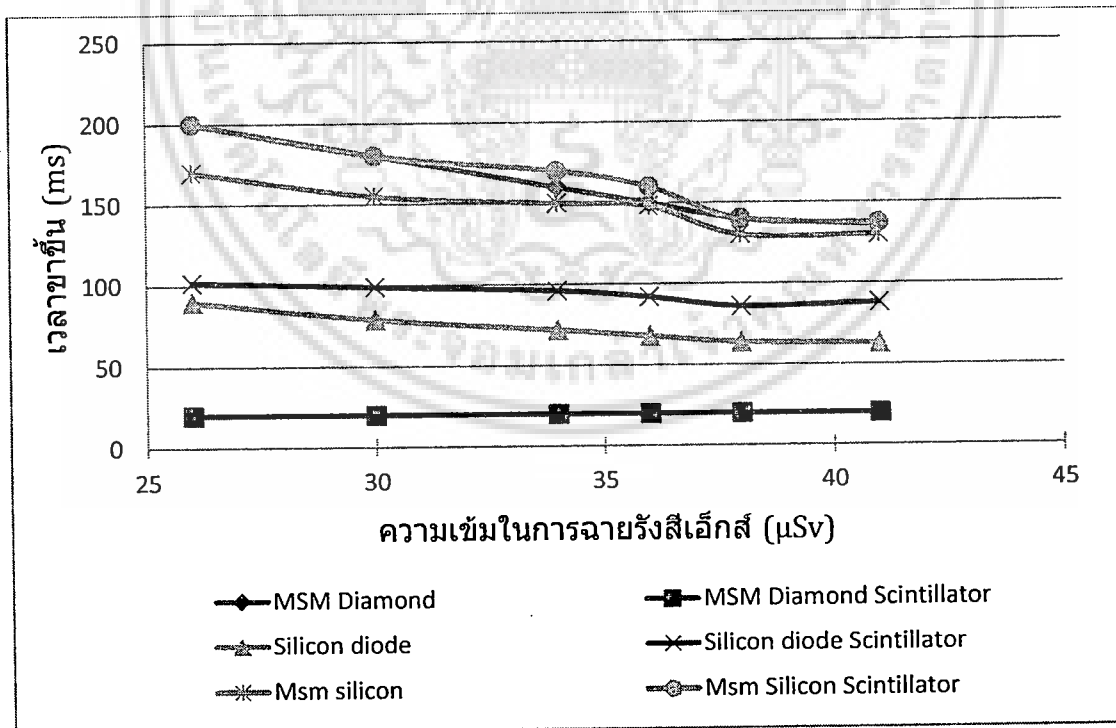
นำอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น, Silicon photo diode และ MSM Silicon มาฉายรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่อง X-Ray ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785 ที่ความเข้มของรังสี 26 μSv , 30 μSv , 34 μSv , 36 μSv , 38 μSv และ 41 μSv โดยฉายที่เวลา 0.5 s ที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}\text{C}$ เพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองทางสัญญาณกับเวลาตอบสนองของอุปกรณ์ โดยทำการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงและฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 สำหรับอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรและ Silicon photo diode และ MSM Silicon มาฉายรังสีเอกซ์โดยตรงและฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสงสีเขียว ผลการทดลองการตอบสนองทางสัญญาณไฟฟ้าดังรูปที่ 4.40 และผลการทดลองการตอบสนองทางเวลาดังรูปที่ 4.41

จากรูปที่ 4.40 พบว่าอุปกรณ์ MSM Silicon ให้กระแสไฟฟ้าแสงมากกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ทั้งการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงและโดยอ้อม เมื่อความเข้มในการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ทุกๆ อุปกรณ์ให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มในการฉายรังสีเอกซ์ และจากรูปที่ 4.41 พบว่าขณะที่ความเข้มในการฉายรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นทุกๆ อุปกรณ์จะมีช่วงเวลาขาขึ้นลดลง ยกเว้นการฉายรังสีเอกซ์ผ่านสารเรืองแสง BaF_2 ด้วยอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีช่วงเวลาขาขึ้นคงที่แม้ว่าแม้ว่าจะมีการเพิ่มความเข้มในการฉายรังสีก็ตาม

เอกสารนี้เพิ่มขึ้นมาใหม่สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับกระแสไฟฟ้า
ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างตัวอุปกรณ์



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับเวลาขาขึ้น
ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างตัวอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้แสดงผลการศึกษาสามส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษากระบวนการสังเคราะห์เพชร การแยกพื้นเพชรเพื่อให้สามารถสร้างตัวอุปกรณ์หลายตัวในเวลาเดียวกัน ส่วนที่สองคือการศึกษาการตอบสนองทางแสง และส่วนที่สามคือการศึกษาการตอบสนองทางรังสีเอกซ์

กระบวนการสังเคราะห์เพชร

การสังเคราะห์เพชรในการทดลองนี้ใช้วิธีการ Hot filament Chemical Vapor Deposition ที่ความดันต่ำ เพชรถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอน เนื่องจากเพชรที่เกิดขึ้นจะมีความสม่ำเสมอ การเกาะเกี่ยวมีประสิทธิภาพที่ดีมากและสามารถสร้างให้เกิดเป็นพื้นเพชรขนาดใหญ่ได้

การสังเคราะห์เพชรในการทดลองนี้ได้ใช้ฐานรองซิลิคอนระนาบ 100 เนื่องจากทำให้ได้เพชรที่มีความราบเรียบมากที่สุด และก่อนนำฐานรองซิลิคอนระนาบ 100 มาทำการสังเคราะห์เพชรต้องขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm เพื่อให้ง่ายต่อการเกิดผลึกเพชร

ในการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธีการ Hot filament Chemical Vapor Deposition ที่ความดันต่ำ ระยะห่างระหว่างไส้ทั้งสตนกับฐานรองซิลิคอนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยระบบนี้คือ 4 mm นอกจากนี้พบว่าความดันที่ใช้ในขณะที่ทำการสังเคราะห์เพชรเหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 50 Torr สำหรับอัตราส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่อ ไอร์อะเซียมที่เหมาะสมคือ 1 % ทั้งนี้จะได้เพชรที่มีปริมาณของคาร์บอนกราฟไฟต์และอะมอร์ฟัสคาร์บอนน้อย

ลวดลายเพชรจะขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และความสมบูรณ์ของการสร้างซิลิคอนไนไตรด์ เมื่อความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าน้อยเกินไป ลวดลายของฟิล์มจะไม่ค่อยชัดและเกิดข้อผิดพลาดสูง แต่ถ้าความหนาชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดของลวดลายก็จะมีค่าลดลง ในบางครั้งข้อผิดพลาดเกิดจากอุณหภูมิฐานรองไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดเพชรบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นมาและไม่สามารถกำจัดออกได้ หรือในระหว่างการขัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนหากมีวัสดุอื่น จะทำให้ผิวหน้าแผ่นซิลิคอนมีรอยที่ไม่ได้เกิดจากการขัดครีมเพชรขึ้นมา ส่งผลให้ลวดลายเพชรที่ได้ไม่สมบูรณ์

สรุปว่าการสังเคราะห์เพชรให้เกิดเป็นลวดลายตามต้องการ จำเป็นจะต้องควบคุมขั้นตอนการสร้างต่างๆ ให้รอบคอบ มิฉะนั้นจะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งจะไม่เป็นผลดีต่อการนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตามหากมีการควบคุมขั้นตอนต่างๆ อย่างเหมาะสมก็จะได้เพชรเป็นลวดลายตามที่ต้องการ

การตอบสนองทางแสง

สำหรับอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร ที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 5 V มีค่ากระแสไฟฟ้าวไหลประมาณ 11 nA และในขณะที่อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 5 V มีค่ากระแสไฟฟ้าวไหลประมาณ 13 nA เนื่องจากอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร มีพื้นที่ผิวบริเวณปลอดพาหะมากกว่าอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร มีกระแสรั่วไหลมากกว่าอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีบริเวณปลอดพาหะน้อยกว่า

การตอบสนองทางแสง UV ความยาวคลื่น 210 nm ที่ความเข้มแสง $32 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น พบว่าอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรและอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีกระแสไฟฟ้าแสงมากที่สุดคือ 7 nA และ 28 nA ตามลำดับ และอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรมีกระแสไฟฟ้าแสงมากกว่าอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอด

การตอบสนองทางแสง UV ความยาวคลื่น 210 nm ที่ความเข้มแสง $3.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ และ $32 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ของอุปกรณ์ที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น พบว่าอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชร มีกระแสไฟฟ้าแสงเพิ่มขึ้น 22.22 % และอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรมีกระแสไฟฟ้าแสงเพิ่มขึ้น 42.50 % (เทียบระหว่างค่าที่มากที่สุดกับค่าน้อยสุด) ดังนั้นพบว่าอุปกรณ์ทั้งสองสามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงที่มากดกระทบได้

ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น พบว่าอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น มีค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุดคือ 187 pF และอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีค่าความจุไฟฟ้าน้อยกว่าคือ 50 pF ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่น้อยลงจะส่งผลต่อความเร็วของอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้น

การตอบสนองทางเวลาของอุปกรณ์ที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น พบว่าอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีเวลาขานขึ้นคือ 65 μs ซึ่งมากกว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรคือ 33 μs เป็นผลมาจากค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีค่าน้อยกว่าอุปกรณ์ขอตต์กีโฟโตไดโอด ส่วนเวลาขาลงก็มีความสอดคล้องกัน

ผลการแอนนัลของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร พบว่ากระแสรั่วไหลลดลงต่ำสุดคือ 8 nA เมื่อทำการแอนนัลเป็นเวลา 5 min

จากผลการทดสอบตัวอุปกรณ์ต่างๆ ที่ได้ทำการสร้างที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้ทดสอบทางด้านรังสีเอกซ์ เนื่องจากให้สัญญาณไฟฟ้าแสงมากกว่า ถึงแม้ว่าจะมีการตอบสนองทางเวลาก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับโครงสร้างเดียวกันแต่ก็อยู่ในระดับไมโครวินาที และเมื่อเปรียบเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ภายนอกการดำเนินงานใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ชนิดที่โฟโตไดโอดพบว่าการตอบสนองทางสัญญาณไฟฟ้าของ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร มีค่าสูงกว่า 74.13 %

การตอบสนองทางรังสีเอกซ์

การตอบสนองทางรังสีเอกซ์ของตัวอุปกรณ์ที่มีความเข้ม 150 μSv (จากเครื่องฉายรังสี) ของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรที่มีเงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะคือ 12 เส้น, 9 เส้น, 6 เส้น, 3 เส้น และ 0 เส้น พบว่าที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น มีกระแสไฟฟ้าแสงมากที่สุดคือ 7.5 nA

ผลของเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 0.1 s ถึง 0.5 s ที่ความเข้ม 26 μSv (จากเครื่องฉายรังสี) ต่ออุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น เมื่อฉายรังสีเอกซ์โดยตรงพบว่าที่เวลา 0.5 s มีกระแสไฟฟ้าแสงมากที่สุด 0.48 nA และมีเวลาขาขึ้นคงที่ที่เวลา 200 ms ส่วนเวลาขาลงไม่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ประมาณ 40 ms และเมื่อฉายรังสีเอกซ์โดยอ้อมคือผ่านสารเรืองแสง BaF_2 พบว่าที่ 0.1 s ถึง 0.5 s มีกระแสไฟฟ้าคงที่ 0.1 nA และมีเวลาขาขึ้นคงที่ 20 ms และเวลาขาลงคงที่ประมาณ 10 ms เนื่องจากแสงที่ออกมาจากแบเรียมฟลูออไรด์ มีความยาวคลื่นประมาณ 220 nm ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติของเพชร (5.5eV) ทำให้สามารถตอบสนองได้ทันทีเพียงใช้เวลาแค่ 0.1 s เท่านั้น

ผลของความเข้มที่ใช้ในการฉายรังสีเอกซ์ 26 μSv , 30 μSv , 34 μSv , 36 μSv , 38 μSv และ 41 μSv พบว่าอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น เมื่อฉายรังสีเอกซ์โดยตรงพบว่ากระแสไฟฟ้าจากตัวอุปกรณ์เพิ่มขึ้นตามความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าความเข้มที่ใช้ในการฉายรังสีเอกซ์ 41 μSv อุปกรณ์ให้กระแสไฟฟ้า 1.3 nA และเมื่อฉายรังสีเอกซ์โดยอ้อมคือผ่านสารเรืองแสง BaF_2 ให้กระแสไฟฟ้า 0.22 nA สำหรับเวลาในการตอบสนองเมื่อฉายรังสีเอกซ์โดยตรงจะมีการตอบสนองเวลาขาขึ้นลดลง พบว่าที่ค่าความเข้มที่ใช้ในการฉายรังสีเอกซ์ 41 μSv มีเวลาขาขึ้น 136 ms ส่วนการฉายรังสีเอกซ์โดยอ้อมคือผ่านสารเรืองแสง BaF_2 มีเวลาขาขึ้นคงที่ 20 ms ส่วนเวลาขาลงไม่เปลี่ยนแปลง

ผลของการฉายรังสีเอกซ์ระหว่างอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร ที่เงื่อนไขจำนวนเส้นโลหะ 12 เส้น กับ Silicon photo diode และ MSM Silicon พบว่าการตอบสนองทางรังสีเอกซ์เมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์ให้กับอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชร โดยผ่านสารเรืองแสง BaF_2 มีเวลาขาขึ้นเร็วที่สุด และสามารถตอบสนองต่อการฉายรังสีเอกซ์ทันทีแม้จะใช้เวลาน้อยถึง 0.1 s

ดังนั้นจะพบว่าข้อดีคือ การใช้อุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดชนิดเพชรร่วมกับสารเรืองแสง BaF_2 ซึ่งก็คือการตรวจจับแบบทางอ้อมจะทำให้การตอบสนองไวโดยใช้เวลาเพียง 0.1 s สำหรับข้อบกพร่องในเรื่องของขนาดสัญญาณจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ประเภทซิลิคอนทั้งแบบการตรวจจับโดยตรงและโดยอ้อม แต่ถ้าอุปกรณ์นี้ถูกนำไปใช้งานจริงก็สามารถแก้ไขได้ด้วยวงจรมีสัญญาณที่จะทำให้สัญญาณมีขนาดเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์หรือนำไปสร้างเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพออกมา แต่สิ่งที่สำคัญก็คือหากลดเวลาการฉายรังสีเอกซ์ได้หรือลดปริมาณความเข้มของการฉายรังสีเอกซ์ได้ก็น่าจะมีประโยชน์มากกว่า นั่นก็คือจะได้รับอันตรายจากรังสีเอกซ์น้อยลงสำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องทางรังสีเอกซ์ไม่ว่าจะเป็นผู้ที่ทำการฉายรังสีเอกซ์หรือผู้ป่วยที่จะต้องถูกฉายรังสีเอกซ์เองก็ตาม

ข้อดีและข้อด้อยของการนำตัวอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดฟิล์มเพชรที่พัฒนาขึ้นไปใช้งาน

ข้อดีคือ

- ปัจจุบันวัสดุเพชรมักนิยมนำไปใช้งานในการตรวจจับรังสีที่มีค่าความเข้มสูงๆ เช่นรังสีแกมมา, รังสีเอกซ์ เพราะจะมีความคงทนต่อรังสีหรือพลังงานค่าสูงๆ ที่มาตกกระทบซึ่งจะทำให้โครงสร้างแลททิซภายในเสียหายน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นเช่นซิลิคอน ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของตัวอุปกรณ์มีระยะเวลายาวนาน

- ในการทดลองสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ขณะทำการตรวจจับรังสีเอกซ์ที่มีความเข้ม $26 \mu\text{Sv}$ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดของเครื่องฉายรังสีเอกซ์ ซึ่งก็มีขนาดสัญญาณเพียงพอที่จะนำไปวิเคราะห์ แม้ว่าจะต้องฉายรังสีเป็นเวลาถึง 0.5 s ก็ตาม

- สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์โดยการนำสารเรืองแสง BaF_2 มาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ MSM ก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองที่เร็วขึ้นโดยสามารถลดเวลาในการฉายรังสีเหลือเพียง 0.1 s

ข้อด้อยคือ

- จะพบว่าจากการฉายรังสีเอกซ์กระแสไฟฟ้าแสงของอุปกรณ์ MSM โฟโตไดโอดฟิล์มเพชรมีขนาดต่ำ ดังนั้นแนวทางในการแก้ไขมีสองทางคือ

1. ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างที่ใช้เป็นขั้วโลหะด้านบนคือที่เป็นเส้นโลหะและระยะห่างให้มีขนาดอยู่ในระดับ $1-5 \mu\text{m}$ ซึ่งในงานวิจัยนี้เส้นโลหะมีขนาด $100 \mu\text{m}$ และระยะห่าง $20 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นข้อจำกัดทางเทคโนโลยีโฟโตลิโธกราฟีในขณะที่ทำการสร้าง หากทำให้มีขนาดเล็กลงได้ก็จะทำให้มีเส้นโลหะมากขึ้นทำให้อิเล็กตรอนวิ่งสู่ขั้วโลหะได้มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าจากตัวตรวจจับรังสีเอกซ์เพิ่มปริมาณสูงขึ้น
2. ทำให้ความหนาของเพชรมีความหนาน้อยลงซึ่งส่งผลโดยตรงคืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ถึงขั้วได้เร็วขึ้นทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าจากตัวตรวจจับรังสีเอกซ์มีขนาดเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] มานัส มงคลสุข. เอกซ์เรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟี หลักการทางฟิสิกส์ เทคนิค และการควบคุมภาพ. ขอนแก่น : หจก.โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา. 2546.
- [2] NASA. "Welcome to the World of X-ray Astronomy." [Online]. Available : http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_11/history1_xray.html. 16-6-2009.
- [3] รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์. "X-ray Tube & X-ray Detector." [เอกสารประกอบการเรียนวิชา ระบบภาพทางการแพทย์]. กรุงเทพมหานคร. 2548.
- [4] Southern Universities Research Association. "The Electromagnetic Spectrum." [Online]. Available : http://www1.sura.org/2000/SURA_Electromagnetic_Spectrum_Full_Chart.jpg. 16/6/2009.
- [5] ปรีดา เต็มจิตรอารีย์ และ K. Nagaiwa. "เอกซ์เรย์เทคโนโลยี." พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: 5 โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย. 2533.
- [6] พิทยา อึ้งพินิจพงศ์. "การปรับปรุงคุณภาพของภาพตัดขวางจากภาพเอกซ์เรย์โดยใช้ อัลกอริธึมทางพีชคณิต". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [7] Albert C. Thompson, David T. Attwood, Eric M. Gullikson, Malcolm R. Howells, Jeffrey B. Kortright, Arthur L. Robinson, and James H. Underwood, "X-RAY DATA BOOKLET" University of California, California ,Second edition, January 2001
- [8] G.F. Knoll. "Radiation Detection and Measurement." USA : John Wiley & Sons Inc, 1999.
- [9] Janis Research Company Inc. "Window Transmission Curves." [Online]. Available : <http://www.janis.com/Products/AccessoriesandAncillaryEquipment/WindowTransmissionCurves.aspx> 11/1/2011
- [10] Alkor Technologies. "BARIUM FLUORIDE (BaF₂) windows." [Online]. Available : <http://www.alkor.net/BaF2.html>. 5/1/2011
- [11] The Crystal Clear Collaboration. "Crystal data." [Online]. Available : <http://crystalclear.web.cern.ch/crystalclear/CCCProgramCrystaldata.HTM> 18/1/2011
- [12] C. van Eijk, J. Andriessen, P. Dorenbos, J. Jansons, N. Khaidukov, Z. Rachko and J.

เอกสารนี้เป็น Valbis. "Experimental and theoretical studies of cross luminescence.", **Heavy Scintillators**

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- for Scientific and Industrial Applications**, Editions Frontieres (Crystal 2000), ISBN 2-86332-128-5, :161-166, 1993.
- [13] S. V. Vladimirov, V. S. Kaftanov, A. F. Nilov, Yu. A. Semenov, V. T. Smolyankin, V. I. Ushakov, O. A. Goronkov, E. N. Zvonarev, O. I. Kozlov and V. P. Mashirev, V. V. Shatalov, T. T. Basiev, V. A. Konyushkin, V. V. Osiko, A. G. Papashvili, and V. N. Skvortsov "Characteristics of BaF₂ Scintillation Crystals.", **Atomic Energy**, Vol. 90, No. 1, 2001
- [14] P. Dorenbos, J.T.M. de Haas and C.W.E. van Eijk, "Non-proportionality in the scintillation response and the energy resolution obtainable with scintillation crystals", **IEEE Trans. Nucl. Sci.** 42 (1995), pp. 2190–2202.
- [15] J.E. Field. "The Properties of Natural and Synthetic Diamonds." London Elsevier Acad. Press. 1992.
- [16] Y. H. Lee, P. D. Richard, K. J. Bachmann, and J. T. Glass, "Bias-controlled Chemical vapor Deposition of diamond thin films.", **Phys. Lett.**, vol. 56, pp. 620-622, 1990.
- [17] A. R. Badzian, T. Badzian, R. Roy, R. Messier, and K. E. Spear, "Crystallization of diamond crystals and films by microwave-plasma-assisted CVD (part II).", **Mater. Res. Bull.**, vol. 23 pp. 531-548, 1988.
- [18] Y. Liou, A. Inspektor, R. Weimer, and R. Messier, "Low-temperature diamond deposition by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition.", **Appl. Phys. Lett.**, vol. 55, pp. 631-633, 1989.
- [19] M. Kawarada, K. Mar, and A. Kiraki, "Large area chemical vapor deposition of diamond particles and films using magneto-microwave plasma.", **Jpn. J. Appl. Phys.**, vol. 26, pp. L1032-L1034, 1987.
- [20] S. Matsumoto, "Chemical vapor of diamond in rf glow discharge.", **J. Mater. Sci. Lett.**, vol. 4, pp 600-602, 1985.
- [21] S. Matsumoto, M. Hino, and T. Kobayashi, "Synthesis of diamond films in a rf induction thermal plasma.", **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 51, pp. 737-739, 1987.
- [22] A. Sawabe and T. Inuzuka, "Growth of diamond thin films by electron-assisted chemical vapor deposition and their characterization.", **Thin Solid Films**, vol. 137. pp. 89-99, 1986.
- [23] B. Singh, O. R. Mesker, and A. W. Levine, "Hollow cathode plasma assisted chemical vapor deposition of diamond.", **Appl. Phys. Lett.**, vol. 52, pp. 1658-1660, 1988.

- [24] K. Kurihara, K. Sasaki, M. Kawarada, and N. Koshino, "High rate synthesis of diamond by dc plasma jet chemical vapor deposition.", **Appl. Phys. Lett.**, vol. 52, pp. 437-438, 1988.
- [25] J.E. Field, "**The Properties of Diamond.**" Academic Press, London, 1979.
- [26] Wikipedia. "Diamond." [Online]. Available :
<http://en.wikipedia.org/wiki/Diamond> 03/02/2011
- [27] Annika Nilsson. "**Ultraviolet Reflection Life Under A Thining Ozone Layer**" John Wiley&Son Ltd. 1996. pp. 14-155
- [28] R. F. Davis, "**Diamond Films and Coatings.**" Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A. 1993.
- [29] Mitsuo Fukuda. "**Optical Semiconductor Devices.**" Kanagawa : NNT. 1992.
- [30] Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. "**Semiconductor Photoelectric Device.**" Great Britain : Iliffe Books Ltd. 1968. Pp 65-71.
- [31] Jsprit Singh, "**Optoelectronic,an Introduction to material and device.**" Singapore, McGraw-Hill Companies , Inc 1996. pp. 131-151.
- [32] Hölzl, J., and Schulte, F. K., "**Work Functions of Metals in Solid Surface Physics.**" Springer-Verlag, Berlin, 1979.
- [33] Riviere, J. C., "**Work Function: Measurements and Results in Solid State Surface Science.**" Vol.1, Green, M., Editor, Decker, New York, 1969.
- [34] S.A. Grot, G. Sh Gildenblat, C.W. Hatfield, C.R. Wronski, A.R. Badzian, T. Badzian, and R. Messier, "The effect of surface treatment on the electrical properties of metal contacts to boron-doped homoepitaxial diamond films", **IEEE Electron Device Lett.**, 11 (2), 100 (1990)
- [35] G. Sh. Gildenblat, S.A. Grot, C.R. Wronski, A.R. Badzian, and T. Badzian, "Electrical characteristics of Schottky diodes fabricated using plasma assisted chemical vapor deposited diamond films.", **Appl. Phys. Lett.**, 53 (7), 586 (1998).
- [36] K. Miyata, Y. Matsui, K. Kumagai, S. Miyauchi, K. Kobashi and A. Nakaue, "Characteristics of metal point contacts on diamond thin films", **Proceeedings of the Second International Conference New diamond Science and technology**, edited By R. Messier, J. T. Glass, J.E. Bulter, and R. Roy, Materials Research Society, Pittsburh, Pennsylvania, 1991, p. 981.

- [37] V. Venkatesan, K. Das, G.G. Fountain, R.A. Rudder, J.B. Posthill, and R.J. Markunas, "Effect of thin interfacial SiO₂ films on metal contacts to B-Doped diamond films.", **J. Electrochem. Soc.**, 139 (5), 1445 (1992).
- [38] A. Hoffman, P.J.K. Paterson, and S. Prawer, "Comparison of the effect of argon and hydrogen ion bombardment on the diamond (100) surface as studied by AES and EELS.", **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B**, 52, 63 (1990).
- [39] P.G. Lurie and J.M. Wilson, "The diamond surface II. Secondary electron emission", **Surf. Sci.**, 65, 476 (1977).
- [40] B.E. Williams and J.T. Glass, "Characterization of diamond thin films: Diamond phase identification, surface morphology, and defect structures.", **J. Mat. Res.**, 4 (2), 373 (1989).
- [41] V. Venkatesan and K. Das, "Ohmic contacts on diamond by B ion implantation and Ti-Au metallization.", **IEEE Electron Device. Lett.**, 13 (2), 126 (1992).
- [42] G.F. Knoll. "Radiation Detection and Measurement." USA : John Wiley & Sons Inc., 1999.
- [43] Werner, K. 1993. "Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology Science Technology and Applications." New Jersey: Noyes Publications.
- [44] Xiao, H. 1999. "Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology." New Jersey: Prentice Hall Inc.
- [45] wikipedia. "Thermal oxidation." [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_oxidation 26/03/2009
- [46] Xiao. "Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology." [Online]. Available : http://www.me.ntut.edu.tw/introduction/teacher/lu/IC%20fabrication_GA/IC_ch05.pdf 24/08/2009
- [47] wikipedia. "Plasma." [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma> 24/08/2009
- [48] Hugh, O. Pierson. 1992. "HANDBOOK OF CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (CVD) Principles, Technology, and Applications Second Edition." New York: Noyes Publications.
- [49] Daniel M. Dobkin "Silicon Nitride: Properties and Applications." [Online]. Available: http://www.enigmatic-consulting.com/semiconductor_processing/CVD_Fundamentals/films/SiN_properties.html 19/08/2009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [50] M. Elwenspoek and H. V. Jansen, 1998. **“SILICON MICROMACHINING.”** Cambridge: The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- [51] Paul W. May. 2000, **“Diamond thin films: a 21st-century material.”** Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 358, 473–495
- [52] Matts Ramstorp, **“Introduction to contamination control and cleanroom technology.”** Weinheim : Wiley, 2000, p.61-76.
- [53] American Cleanroom Systems. **“Cleanroom Design and Clean Room Design Services”** [Online]. Available: <http://www.americancleanrooms.com/design.html>. 20/oct/2010
- [54] Ulrich Gösele, Qin-Yi Tong, Yu-Lin Chao, Lijuan Huang **“Thinning Procedures.”** [Online]. Available : <http://www.duke.edu/web/wbl/ch7/ch7-hpge.html#7.2.2.1> 20/oct/2010
- [55] W.Sonphao, S.Chaisirikul, **“Silicon anisotropic etching of TMAH solution.” IEEE International Symposium On Industrial Electronics Proceedings, 2001, vol.3, 2049 – 2052**
- [56] ศราวุธ เจ๊ะเซิน, ชาญเดช หรูอนันต์ และ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล, **“ตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบ MSM ชนิดเพชร”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33 2010), 2553, เล่ม 2, หน้า 1481-1484.**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

อธิบายคำสำคัญ

ภาษาอังกฤษ	คำไทย	ความหมาย
phonon	โฟนอน	อนุภาคควอนตัมของการสั่นของแลตทิซ
photon	โฟตอน	อนุภาคควอนตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
Conduction band	คอนดักชัน	แถบการนำ
Valance band	เวเลนซ์	แถบต้องห้าม
Annealing	แอนนีสล	หลอมให้อ่อนตัวแล้วทำให้เย็นลง
ภาษาอังกฤษ		ความหมาย
Chamber reaction		ห้องทำปฏิกิริยา
Sputtering		การฉาบด้วยโลหะ
X-Ray		รังสีเอกซ์
Silicon dioxide native; SiO ₂		ซิลิคอน ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ
Sputtering		ฉาบโลหะ
Evaporation		เคลือบโลหะ
DI = De-ionization water; H ₂ O		น้ำ
Gold; Au		ทอง
Etchant		สารกัด
Mask aligner		ตัวปรับชั้นมาสก์
ภาษาอังกฤษ	คำไทย	
Lattice		แลตทิซ
Nucleation		นิวคลีเอชัน
Quartz		ควอทซ์
Photo mask		โฟโต้มาสก์
Slide film		ฟิล์มสไลด์
Plate		เพลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ultraviolet; UV	อัลตราไวโอเล็ต
Raman spectrum	สเปกตรัมรามัน, สเปกตรัมรามัน
Photolithography	โฟโวลิตโกราฟี
Photo etching	โฟโต้เอตซิงค์
Laser	เลเซอร์
Hydrogen fluoride; 49 %wt HF	ไฮโดรเจนฟลูออไรด์
Ammonium fluoride; NH ₄ F	แอมโมเนียฟลูออไรด์
Sulfuric; H ₂ SO ₄	ซัลฟูริก
Hydrogen peroxide; H ₂ O ₂	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
Hydrogen fluoride; HF	ไฮโดรเจนฟลูออไรด์
Chromium trioxide; CrO ₃	โครเมียมไตรออกไซด์
Ammonium; NH ₄	แอมโมเนีย
Tetra methyl ammonium hydroxide; TMAH	เตตระเมทิลแอมโมเนียไฮดรอกไซด์
Potassium Hydroxide; KOH	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
Ethylenediamine, Pyrocatechol, DI; EPD	เอธิลีนไดอะมีน, ไพโรแคทอล, น้ำ
Acetone; C ₃ H ₆ O	อะซิโตน
Phosphoric; H ₃ PO ₄	ฟอสฟอริก
Trichloroethylene; C ₂ HCl ₃	ไตรโคลอเอธิลีน
Nitric acid; HNO ₃	ไนตริก
Hydrochloric; HCl	ไฮโดรคลอริก
Nitric; HNO ₃	ไนตริก
Silicon; Si	ซิลิคอน
Silicon dioxide; SiO ₂	ซิลิคอนไดออกไซด์
Silicon nitride; Si ₃ N ₄	ซิลิคอนไนไตรด์
Oxygen; O ₂	ออกซิเจน
Selene; SiH ₄	ไซเรน
Nitrogen; N ₂	ไนโตรเจน
Methane; CH ₄	มีเทน
Hydrogen; H ₂	ไฮโดรเจน
Titanium; Ti	ไทเทเนียม
Aluminum; Al	อลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อักษรย่อ	ภาษาอังกฤษ
HEPA Filter	high efficiency particulate air
VLSI	Very-large-scale integration
MFC	mass flow controller
PVD	plasma vapor deposition
CVD	Chemical Vapor Deposition
RF-CVD	Radio frequency Chemical Vapor Deposition
MPCVD	Microwave plasma enhanced Chemical Vapor Deposition
HFCVD	Hot filament Chemical Vapor Deposition
ECR	Electron Cyclotron Resonance
ccd	Charge Coupled Devices
g	gram
m	meter
mg	mil ligram
kg	Kilo gram
cc	cubic centimeter
A	ampere
K	Kelvin
mol	mole
s	second
min	minute
kcal/mol	kilo calories per mole
$\mu\text{m}/\text{hour}$	micro meter per hour
guss	gauss
RF	Radio frequency
kW	kilo watt
MHz	Mega hertz
kV	kilo Volt
A/cm^2	Ampere per centimeter square
Torr	Torr
mA/cm^2	mili Ampere per centimeter square

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{cm}^2/\text{volt-sec}$	centimeter square per voltage-second
V/cm	voltage per centimeter
cm/s, cm/sec	centimeter per second
ohm-cm	ohm - centimetre
eV	electron voltage
J-s, J-sec	Jule-second
C	Culomb



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลเบื้องต้นทางรังสีเอกซ์

1. หน่วยที่ใช้วัดรังสีเอกซ์

หน่วยที่ใช้วัดรังสีเอกซ์ มี 2 อย่าง [6] คือ การวัดคุณภาพ และการวัดปริมาณ

1.1 การวัดคุณภาพ

การวัดคุณภาพ คือ การวัดคุณสมบัติในการฉายทะลุวัตถุต่างๆ มี 3 วิธี คือ

1. โดยการวัดความยาวคลื่น ความยาวคลื่นสั้นมีอำนาจทะลุทะลวงได้มาก
2. โดยการวัดพลังงานของรังสี มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอน โวลต์ (electron volt) พลังงานมากมี

อำนาจทะลุทะลวงมาก

1 อิเล็กตรอน โวลต์ (electron volt/second; eV/s)	= 1.60×10^{-12} เอิร์ก (erg)
1 วัตต์ (watt; W)	= 10^7 เอิร์กต่อวินาที (erg/second; erg/s)
1 แรงม้า (horse power; hp)	= 746 วัตต์ (watt; W)
	= 7.46×10^9 เอิร์กต่อวินาที (erg/second; erg/s)
	= 4.66×10^{21} อิเล็กตรอน โวลต์ต่อวินาที
	(Electron volt/second; eV/s)

3. โดยการวัดอำนาจทะลุโลหะ (half value layer; H.V.L) คือความหนาเป็นมิลลิเมตรของโลหะ เช่น ทองแดง หรือ อะลูมิเนียม ที่สามารถกรองรังสีเอกซ์แล้วลดปริมาณรังสีลงได้ครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม

1.2 การวัดปริมาณ

สามารถวัดได้ใน 2 ลักษณะ [6] คือ ปริมาณและรังสีที่มนุษย์สัมผัส (Expose radiation) และ ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนเข้าสู่ร่างกาย (Absorbed radiation) หน่วยต่างๆ ที่ใช้ในการวัด ได้แก่

1. คูรี (Curie, Ci) เป็นหน่วยวัดที่ใช้กันทั่วไป โดยตั้งชื่อขึ้นหลังจากมาตามแมรี คูรี และสามีปีแอร์ คูรี ได้ค้นพบธาตุเรเดียม คูรี เป็นหน่วยวัดความแรงของรังสี โดยกำหนดว่า สารกัมมันตรังสีที่สลายตัวในอัตรา 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที จะมีความแรงเท่ากับ 1 Ci ตัวอย่างเช่น EPA (Environmental Protection Agency ใน USA) เปรียบเทียบการหายใจเอาสารเรดอน (เป็นธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่ง) เข้าไปวันละ 10 ปีแอร์คูรีต่อลิตรของอากาศ (1Pci=1 ส่วนล้านล้านส่วน Ci)

จะเกิดอัตราเสี่ยง ต่อการเป็นโรคมะเร็งพอๆ กับการสูบบุหรี่วันละ 1 ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เรินต์เกน (Roentgen; R) ในปี พ.ศ. 2471 ที่ประชุมรังสีแพทยนานาชาติได้ตกลงกันที่กรุงสตอกโฮล์ม ประเทศสวีเดน ให้วัดปริมาณรังสีเอกซ์ด้วยหน่วยเรินต์เกน ซึ่งต่อมาในปี พ.ศ. 2480 ในการประชุมแบบเดียวกันที่นครชิคาโก สหรัฐอเมริกา ได้ตกลงให้ใช้หน่วยเรินต์เกนวัดปริมาณรังสีแกมมาด้วยเพราะรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์เหมือนกันทุกอย่าง นอกจากกำเนิดไม่เหมือนกัน คือ รังสีเอกซ์มนุษย์ทำขึ้น แต่รังสีแกมมาเกิดโดยธรรมชาติ รังสี 1 R ฉายผ่านอากาศแห้งจำนวน $0.001293 \text{ g ที่ } 0^{\circ}\text{C}$ ความกดดัน 760 mHg จะทำให้โมเลกุลของอากาศปล่อยไอออนซึ่งมีไฟฟ้าสถิต 1 หน่วยประจุไฟฟ้าสถิตหรือ 1 อีเอสยู (electrostatic unit ; e.s.u.) ถ้าคิดเป็นพลังงาน 1 R จะเท่ากับ 83 เอิร์กต่อกรัมอากาศ หรือ 93 เอิร์กต่อกรัมของเนื้อ

3. เรป (Roentgen Equivalent Physics; rep) คือ จำนวนรังสีใดๆที่ให้พลังงาน 93 เอิร์กต่อ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรของเนื้อ

4. เรม (Roentgen Equivalent Man; rem) คือ จำนวนรังสีใดๆที่ให้ผลทางชีววิทยาต่อเนื้อคนเท่ากับผลที่เกิดจากรังสีเอกซ์ 1 R

5. แรด (Radiation Absorbed Dose; rad) ในปี พ.ศ. 2496 ในการประชุมรังสีวิทยานานาชาติครั้งที่ 7 ที่นครโคเปนเฮเกน มีมติให้ใช้แรดเป็นหน่วยวัดปริมาณรังสีที่ถูกดูดโดยสิ่งมีชีวิตในรูปของพลังงานที่สะสมในช่วงเวลาหนึ่ง

6. เกรย์ (gray; Gy) เป็นหน่วยในระบบเอสไอ (SI unit) ของปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนเข้าสู่ร่างกายมีค่าเท่ากับ 2 Jkg^{-1}

7. ซีเวิร์ท (Sievert; Sv) เป็นหน่วยในระบบเอสไอของจำนวนรังสีที่มากที่สุดที่มนุษย์สามารถได้รับด้วยความปลอดภัยเป็นจำนวนที่เรียกว่า relative biological effective (RBE) ซึ่ง $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$ และ $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

100 rad	= 1.0 Gy	
1 rad	= 0.01 Gy	= 1 cGy
1 mrad	= 0.01 mGy	
10 mrad	= 0.1 mGy	

2. ผลและอันตรายของรังสีเอกซ์ต่อร่างกาย

อันตรายของรังสีเอกซ์ต่อร่างกายนั้นได้ถูกสังเกตเป็นครั้งแรก หลังจากที่มีการประกาศการค้นพบรังสีเอกซ์ การค้นพบอันตรายในระยะแรกนั้นเกี่ยวข้องกับอันตรายต่อผิวหนังและแขนขาของบุคลากรที่ทำงานเกี่ยวกับรังสีเอกซ์ ซึ่งเนื้อเยื่อต่างๆในร่างกายมีความไวต่อรังสีแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 [7]

อันตรายจากรังสีนั้นมีได้ตั้งแต่การทำให้เซลล์ต่างๆ ตายโดยทันที จนถึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านกรรมพันธุ์ โดยทั่วไปแล้วถ้ารังสีมีความแรงมากจะทำให้เกิดอันตรายรวดเร็วและถึงตายได้ โดยทำให้การเคลื่อนไหวของโปรโตพลาสซึมของเซลล์ (Cytoplasm) หดไป และโปรตีนในเซลล์มีการแข็งตัว เมื่อรังสีมีความเข้มข้นจะทำให้การแบ่งนิวเคลียสของเซลล์อย่างอ้อม (mitosis) ของเซลล์ล่าช้าไป นอกจากนี้อันตรายต่อโครโมโซม (chromosome) ที่เห็นได้ ยังมีอันตรายในทางกรรมพันธุ์อันจะนำไปสู่การผ่าเหล่าหรือการก่อมะเร็ง (carcinogenesis) ได้

ตารางที่ 1 ความต้านทาน (Resistance) ของเนื้อเยื่อในร่างกายมนุษย์ต่อรังสีเอกซ์

ความต้านทานมากที่สุด	คอลลาเจน (Collagen) กระดูก (Bone) กล้ามเนื้อ (Muscle) ระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system) หนังกำพร้า (Epidermis of skin) รูขุมขน (Hair follicle of skin)
ความต้านทานปานกลาง	เยื่อบุผิวของลำไส้ใหญ่ (Epithelium of colon) เยื่อบุผิวของกระเพาะอาหาร (Epithelium of stomach) เยื่อบุผิวของลำไส้เล็ก (Epithelium of small intestine) เนื้อเยื่อที่มีส่วนในการสร้างเม็ดเลือด (Hemopoietic tissues) เซลล์กำเนิดเม็ดเลือดแดง (Erythroblasts) เซลล์น้ำเหลือง (Lymphocytes)
ความต้านทานน้อยที่สุด	เซลล์เพศชายที่จะกลายเป็นตัวอสุจิ (Spermatogonia)

2.1 ผลของรังสีเอกซ์ต่อร่างกาย

ผลที่สำคัญของรังสีต่อร่างกายที่เกิดขึ้นโดยทันทีคือ ทำให้เซลล์ของอวัยวะที่สำคัญตายไปอย่างไรก็ดีการตอบสนองของอวัยวะต่างๆ นั้นอาจคาดการณ์ไม่ได้และมีกลไกซับซ้อน ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างเซลล์ขึ้นมาใหม่ ปัจจัยทางด้านฮอร์โมนและภูมิคุ้มกัน รวมทั้งกลไกการซ่อมแซมของเซลล์ เนื้อเยื่อที่ได้รับผลกระทบในระยะแรกๆ นั้นเป็นเนื้อเยื่อที่มีการสร้างทดแทนใหม่อยู่เรื่อยๆ เช่น เยื่อบุทางเดินอาหารและระบบการสร้างเลือด เมื่อเนื้อเยื่อเหล่านี้ถูกทำลายจะทำให้ตายได้ภายในเวลาเป็นวันหรือเป็นสัปดาห์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ได้รับ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลของการได้รับรังสีปริมาณมาก

1. อาการของโรคที่เกี่ยวกับการสร้างเม็ดเลือด (hematopoietic syndrome) เป็นผลจากการทำลายของสเต็มเซลล์หรือเซลล์น้ำเหลืองในไขกระดูกที่เป็นต้นกำเนิดของเซลล์ (stem cell) ในไขกระดูกหลังจากที่ได้รับรังสีขนาด 1.5 Sv ถึง 6 Sv 1 วัน หลังจากการรับรังสี สเต็มเซลล์ในไขกระดูกจะลดลงในอัตราที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณรังสี เช่น ลดลง 10% ถึง 20%, 25% ถึง 30% และ 50% ถึง 60% หลังจากที่ได้รับรังสี 1 Sv ถึง 2 Sv, 3 Sv ถึง 4 Sv และ 5 Sv ถึง 7 Sv ตามลำดับ แต่เม็ดเลือดต่างๆในกระแสเลือดซึ่งมีความไวต่อรังสีน้อยกว่าสเต็มเซลล์จะยังคงระดับปกติ ซึ่งแตกต่างจากเซลล์น้ำเหลืองที่มีความไวต่อรังสีมากที่สุดจำนวนเซลล์น้ำเหลืองจะลดลงกว่าครึ่งภายในเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากที่ได้รับรังสีขนาด 1 Sv ถึง 2 Sv เม็ดเลือดในกระแสเลือดได้แก่ เม็ดเลือดขาว และเกล็ดเลือด จะเริ่มลดลงในเวลา 10 วัน ถึง 15 วัน หลังจากได้รับรังสี การลดลงของเม็ดเลือดเหล่านี้เป็นผลจากการที่สเต็มเซลล์ในไขกระดูกไม่สามารถผลิตเซลล์มาทดแทนเม็ดเลือดที่เสื่อมสภาพไปตามอายุขัย ต่างจากเม็ดเลือดแดงซึ่งจะลดลงไม่มากนักเพราะมีอายุยาวนานถึง 120 วัน การลดลงของค่าฮีโมโกลบิน (hemoglobin) จะเกิดขึ้นเนื่องจากภาวะเลือดออกง่ายจากการลดลงของเกล็ดเลือดประมาณสัปดาห์ที่ 3 ผู้ป่วยจะมีอาการหนาวสั่นอ่อนเพลียเป็นแผลในปากและมีเลือดออกใต้ผิวหนังอาจมีผมร่วงถ้าได้รับรังสีมากกว่า 3 Sv ถ้าปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับมีขนาดไม่เกิน 6 Sv อาจสามารถช่วยชีวิตผู้ป่วยได้โดยการให้ดูแลอย่างดีตามด้วยการปลูกถ่ายไขกระดูก มิฉะนั้นแล้วผู้ป่วยจะเสียชีวิตภายใน 1 เดือน ถึง 2 เดือน อันมีสาเหตุเนื่องจากการติดเชื้อ

2. อาการของโรคที่เกี่ยวกับกระเพาะอาหารและลำไส้ (gastrointestinal syndrome) เป็นผลจากการได้รับรังสีขนาด 6 Sv ถึง 10 Sv ซึ่งมากพอที่จะทำลายเซลล์เยื่อบุทางเดินอาหารโดยเฉพาะอย่างยิ่งลำไส้เล็ก ซึ่งไวต่อรังสีมากกว่าส่วนอื่น ซึ่งจะเริ่มต้นในเวลา 3 วัน ถึง 7 วัน หลังจากรับรังสีในระยะนี้ผู้ป่วยจะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วงอย่างแรงเป็นช่วงรังสีขนาด 5 Sv ถึง 6 Sv อย่างไรก็ตามผลจากการทำลายในระดับนี้ ยังไม่ส่งผลร้ายแรงมากนัก แต่ถ้าปริมาณรังสีที่มีขนาดมากกว่า 6 Sv จะก่อให้เกิดการสูญเสียน้ำและเกลือแร่ และเป็นช่องทางให้เชื้อโรคเข้าสู่ร่างกายผู้ป่วยจะเสียชีวิตเนื่องจากภาวะการสูญเสียน้ำจากร่างกายอย่างมาก (dehydration) และความไม่สมดุลทางเคมีของน้ำในร่างกาย (electrolyte imbalance) ภายในเวลา 2 สัปดาห์

3. อาการของโรคที่เกี่ยวกับระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system syndrome) เป็นผลจากการได้รับรังสีที่มีขนาดมากเกิน 15 Sv เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ไม่บ่อยผู้บาดเจ็บจะมีอาการเจ็บป่วยภายในเวลาไม่กี่นาที หลังจากที่ได้รับรังสีโดยมีอาการคลื่นไส้ อาเจียนอย่างรุนแรง และมีอาการอื่นๆ ที่เข้าข่ายอาการของโรคที่เกี่ยวกับระบบประสาท (neurological syndrome) ได้แก่ ความไม่สามารถประมาณทิศทาง สถานที่ เวลา หรือบุคคล (disorientation), สูญเสียการประสานงานและการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อ (loss of coordination and muscular movement),

เอกส
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหดเกร็งของกล้ามเนื้ออย่างรุนแรงจากอาการชักของ โรคลมบ้าหมู (convulsion seizure), หมดสติ (coma) และในที่สุดจะเสียชีวิตภายในเวลา 2 วัน สาเหตุของการเสียชีวิตยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ทั้งนี้เนื่องจากสมองเป็นอวัยวะที่มีความทนต่อรังสีมากที่สุดแต่เป็นที่เชื่อกันว่าผลของรังสีต่อหลอดเลือดที่เลี้ยงสมองน่าจะเป็นสาเหตุที่สำคัญ

2.3 ผลของการได้รับรังสีปริมาณน้อย

เมื่อได้รับรังสีจำนวนน้อยผลที่เกิดขึ้นไม่รุนแรงมากและอาจต้องใช้เวลาานทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ได้รับซึ่งจะกล่าวถึงเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของอวัยวะที่น่าสนใจ ได้แก่อาการหนังร้อนแดงเนื่องจากเลือดคั่ง (Erythema) เมื่อผิวหนังได้รับรังสีครั้งหนึ่งนั้นจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงภายใน 2 ชั่วโมง ถึง 3 ชั่วโมง แต่บางครั้งจะเริ่มภายใน 2 วัน ถึง 3 วัน คือผิวหนังจะมีลักษณะแดงแล้วจะค่อยๆ หายไปภายในเวลา 2 วัน ถึง 3 วัน อย่างไรก็ตามในวันที่ 11 หลังจากได้รับรังสีนั้นผิวหนังจะมีลักษณะแดงขึ้นมาอีก และจะอยู่จนถึงประมาณวันที่ 28 แล้วค่อยๆ เปลี่ยนเป็นผิวหนังสภาวะการเกิดต้อกระจก (Cataract genesis) เนื่องจากรังสีทำให้เซลล์ตายจึงทำให้เกิดการขุ่นมัวตามปกติภาวะนี้เกิดขึ้นได้แต่ช้ามากและขึ้นอยู่กับอายุของผู้ป่วย แต่เมื่อได้รับรังสีจะทำให้เซลล์ของเลนส์ตายมากขึ้นทำให้เกิดการขุ่นมัว ผู้ป่วยที่ได้รับรังสี 250 rad ถึง 650 rad จะมีระยะแฝงของการเกิดต้อกระจกถึง 8 ปี เมื่อได้รับรังสีเพิ่มขึ้นเป็น 1000 rad จะมีระยะแฝงสั้นลงเหลือประมาณ 4 ปี

2.4 ผลต่อการสืบพันธุ์

การเป็นหมัน ผลที่สำคัญของรังสีต่ออวัยวะสืบพันธุ์ คือจะทำให้เซลล์ของอวัยวะสืบพันธุ์ตาย จึงทำให้เป็นหมัน ในเพศชายพบว่าเมื่ออัมตะได้รับรังสีเฉพาะที่ขนาด 30 rad ทำให้ตัวอสุจิลดลงเป็นหมันชั่วคราว (Functional sterility), ขนาด 250 rad ครั้งเดียว จะทำให้ไม่มีตัวอสุจิ (Aspermia) ชั่วคราวประมาณ 1 ปี, ขนาด 400 rad ถึง 600 rad ครั้งเดียว จะทำให้เป็นหมันถาวรแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสมรรถภาพและความรู้สึกทางเพศแต่อย่างไร เพราะฮอร์โมนเพศชายยังปกติการผ่าเหล่าในมนุษย์ พบว่าผู้ที่ได้รับรังสีประมาณ 9.4 % จะเกิดโรคทางกรรมพันธุ์ได้ และรังสีสามารถทำให้เกิดความผิดปกติทางกรรมพันธุ์ได้ 4 ประการ คือ ลักษณะส่วนสำคัญที่ถ่ายทอดทางกรรมพันธุ์ (Dominant), ความอ่อนแอทางกรรมพันธุ์ (recessive), การจับ x-linked และการเปลี่ยนแปลงทางโครโมโซม (chromosome)

2.5 ผลต่อทารกในครรภ์

รังสีมีผลต่อการเจริญเติบโตของทารกในครรภ์ มีดังนี้

1. รังสีขนาดปานกลาง ประมาณ 250 R ที่ทารกได้รับในระยะ 2 เดือน ถึง 3 เดือน แรกของการตั้งครรภ์ จะไม่มีผลต่อความผิดปกติของทารกที่เกิดมา ถึงแม้ว่าทารกส่วนใหญ่จะมีการตายในครรภ์หรือแท้งขนาดของรังสีที่ใช้ในการรักษาทางการแพทย์ คือ 500 R ซึ่งได้รับในระยะ 4 สัปดาห์ถึง 11 สัปดาห์ จะทำให้เกิดความผิดปกติของทารกที่เกิดมาได้อย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกองอำนวยการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยกลาง ให้หน่วยงานต้นสังกัดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปริมาณรังสีขนาด 500 R แต่ได้รับในระหว่าง 11 สัปดาห์ ถึง 16 สัปดาห์จะไม่ค่อยมีความผิดปกติต่อตา กระดูก หรืออวัยวะสืบพันธุ์ แต่จะพบบ่อยว่ามีศีรษะเล็กผิดปกติ (microcephaly), ปัญญาอ่อน (mental retardation) และการเจริญเติบโตช้าลง (stunted growth)

3. ปริมาณรังสีขนาด 500 R แต่ได้รับในระหว่าง 16 สัปดาห์ ถึง 20 สัปดาห์ อาจทำให้เกิดความผิดปกติได้เล็กน้อย คือ มีศีรษะเล็กผิดปกติ, ปัญญาอ่อน และการเจริญเติบโตช้าลง อย่างชนิดที่เป็นน้อย

4. ปริมาณรังสีขนาด 500 R แต่ได้รับหลังสัปดาห์ที่ 20 ไปแล้ว มักไม่ทำให้เกิดผิดปกติในอวัยวะต่างๆ ที่เห็นได้ชัดเจน แต่อาจมีอาการผิวหนังร้อนแดงเนื่องจากเลือดคั่ง (skin erythema) หรือความบกพร่องของระบบการสร้างเม็ดเลือด (hematopoietic system)

จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุประดับความแรงรังสีและอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ได้ดังตารางที่ 2.2 [6]

ตารางที่ 2 ระดับความแรงรังสีเอกซ์และอันตรายที่อาจเกิดขึ้น

ความเข้มรังสีระดับ 10,000 มิลลิซีเวิร์ท ในระยะเวลาสั้นๆ	เกิดการบาดเจ็บทางรังสีทันทีและทำให้ถึงแก่ความตายใน 2-3 สัปดาห์
ความเข้มรังสีระดับ 1,000 มิลลิซีเวิร์ท ในระยะเวลาสั้นๆ	เกิดการบาดเจ็บทางรังสี เช่นคลื่นไส้อาเจียน แต่ไม่ถึงตายและอาจเกิดเป็นมะเร็ง ในระยะหลัง
ความเข้มรังสีระดับ 20 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี	เกณฑ์ความปลอดภัยทางรังสีสำหรับผู้ปฏิบัติงาน ในสถานปฏิบัติงานทางรังสี
ความเข้มรังสีระดับ 2 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี	ระดับรังสีปกติในธรรมชาติ
ความเข้มรังสีระดับ 0.05 มิลลิซีเวิร์ท	ระดับรังสีสูงสุดที่ยอมให้มีอยู่ ณ รอบบริเวณสถานปฏิบัติงานนิวเคลียร์

2.6 ระดับรังสีเอกซ์ที่ปลอดภัย

ระดับรังสีที่ปลอดภัย หมายถึง การเปลี่ยนแปลงในร่างกายที่เกิดขึ้น เนื่องจากรังสีนั้นไม่ปรากฏออกมาให้เห็นและตรวจพบได้ การกำหนดค่าปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มนุษย์รับได้โดยถือว่าปลอดภัย ได้รับการพิจารณาจากนักวิทยาศาสตร์และแพทย์มานานแล้ว โดยได้มีการจัดตั้งกลุ่มหรือสถาบันขึ้นทั้งในประเทศ และระหว่างประเทศ เรียกว่า คณะกรรมการว่าด้วยการป้องกันรังสีระหว่างประเทศ (ICRP = International Commission on Radiological Protection) ได้กำหนดค่าปริมาณรังสีสูงสุดที่ยอมให้รับได้เรียกว่าค่า MPD (MPD = Maximum Permissible dose) ขึ้นมาโดยมีความหมายในแง่ที่ว่าการทำงานกับรังสี ถ้าได้รับรังสีต่ำกว่าค่า MPD ถือว่าปลอดภัย ค่า MPD ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้สำหรับอวัยวะต่างๆ ดังตารางที่ 2.3 และระดับรังสีที่ใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ที่เป็นระดับรังสีที่ปลอดภัยแสดงดังตารางที่ 2.4 [6]

ตารางที่ 3 ค่า MPD ที่กำหนดให้สำหรับอวัยวะต่างๆ

อวัยวะ	MPD rem/ปี
อวัยวะสืบพันธุ์, เกล็ดตา, ไชกระดุก	5
มือ แขน ขา	75
ผิวหนัง, ไทรอยด์	30
อวัยวะอื่น ๆ	15

ตารางที่ 4 เกณฑ์ระดับความแรงของรังสีที่ปลอดภัย

ระดับความเข้มรังสี	ระดับรังสีสำหรับผู้ปฏิบัติงาน	ระดับรังสีสำหรับบุคคลทั่วไป
ความเข้มรังสีรวม	20 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี	1 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี
เลนส์ตา	150 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี	15 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี
ผิวหนัง	500 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี	50 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี
มือเท้า	500 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี	50 มิลลิซีเวิร์ทต่อปี

3. การป้องกันอันตรายจากรังสีเอกซ์

3.1 จำกัดเวลาที่ต้องถูกรังสีเอกซ์เร็วให้สั้นที่สุด

3.2 ถ้าใช้ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีมากที่สุดจะได้รับรังสีน้อยที่สุด

3.3 ใช้วัสดุต่างๆ ที่สามารถดูดซับรังสีได้ มากั้นไว้ตรงกลางระหว่างร่างกายกับแหล่งกำเนิดของรังสี เช่น การใส่เสื้อตะกั่วกันรังสี หรือใช้ฉากป้องกันรังสีด้วย

3.4 สำหรับรังสีแพทย์และผู้มีอาชีพทางรังสีวิทยา จำเป็นต้องใช้เครื่องวัดรังสี เช่น ฟิล์มวัดรังสี (Film badge) ติดตัวไว้ตลอดเวลาทำงานเพื่อวัดจำนวนรังสีที่ร่างกายได้รับ โดยไม่รู้ตัว

ฟิล์มวัดรังสี : ที่ใช้โดยทั่วไปมีหลายชนิดแต่ลักษณะการใช้ จะคล้ายกัน โดยจะมีฟิล์มเล็กๆ

ใส่เอาไว้ในที่ที่เก็บ ซึ่งเรียกว่า Badge และจะถูกแสงไปพร้อมกับผู้แขวน ด้านหน้าของ Badge จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยตัวกรองแสง (filter) หลายชนิด รวมทั้งช่องว่างเพื่อใช้ในการจำแนกชนิดของแสงที่ได้รับ และการวัดว่าผู้ที่ใช้ฟิล์มวัดรังสีได้รับแสงหรือไม่ และได้รับเท่าไร จะทำโดยการนำฟิล์มไปทำการล้าง แล้ววัดค่าความหนาแน่นของฟิล์ม แล้วหาค่าจาก calibration curve ก็จะทราบว่า ได้รับรังสีปริมาณเท่าไร

3.5 ผู้ที่มีอาชีพทางรังสีวิทยา จำเป็นต้องเป็นผู้มีความรู้เรื่องการป้องกันอันตรายจากการแผ่รังสีด้วย จึงจะปลอดภัย

3.6 สำหรับผู้ที่มารับการตรวจทางรังสี ควรจะปฏิบัติตัวดังนี้

1. ปฏิบัติตามคำแนะนำของรังสีแพทย์และเจ้าหน้าที่รังสีอย่างเคร่งครัด เช่น การถ่ายภาพปอด (Chest X-ray) ต้องเปลี่ยนเสื้อ ถอดสร้อยหรือโลหะทุกชนิดที่อยู่ในบริเวณหน้าอก ออกให้หมดเพื่อจะได้ไม่ต้องถ่ายซ้ำใหม่ หรือการตรวจพิเศษ เช่น การตรวจไตถ้าไม่รับประทานยา ระบาย อาจมีอุจจาระบังส่วนของไต ทำให้ต้องถ่ายภาพในท่าพิเศษเพิ่มขึ้นก็จะได้รับรังสีมากขึ้น รวมถึงการจัดท่าทางและกั้นหายใจขณะถ่ายภาพรังสีเอกซ์ด้วย

2. สตรีวัยเจริญพันธุ์ ถ้าต้องการตรวจทางรังสีเอกซ์ของท้องน้อย ควรทำภายใน 10 วัน หลังจากที่มีประจำเดือน (นับจากวันที่ 1 ของรอบเดือน) ถือเป็นช่วงที่ไม่มีไข่ตก

3. ผู้ป่วยที่ตั้งครรภ์หรือสงสัยว่าจะมีการตั้งครรภ์ ควรหลีกเลี่ยงการฉายรังสีเอกซ์ช่วงท้อง ถ้าจำเป็นควรใช้อัลตราซาวด์แทนการฉายรังสีเอกซ์ส่วนอื่นๆ ของร่างกายถ้าจำเป็นต้องใช้เสื้อตะกั่วปิดบริเวณท้องเสมอ

4. กรณีที่ผู้ป่วยเป็นเด็ก หรือผู้ป่วยที่ไม่สามารถปฏิบัติตามคำสั่งได้เอง ต้องมีผู้ช่วยเป็นญาติหรือบุคลากรทางการแพทย์ฝ่ายอื่นควรปฏิบัติ ดังนี้

ก.) สวมเสื้อตะกั่ว ถู่มือตะกั่วทุกครั้งที่จะเข้าช่วย

ข.) ถ้าเป็นไปได้ให้อยู่ห่างจากแนวรังสีอย่างน้อย 2 เมตร กรณีนี้รวมถึงการฉายรังสีเอกซ์ตามหอผู้ป่วย (Portable X-ray) ด้วย

ค.) ผู้ป่วยเด็กที่ต้องฉายรังสีเอกซ์บ่อยๆ ควรจะใช้ตะกั่วปิดบริเวณอวัยวะสืบพันธุ์

ง.) ผู้ที่ไม่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการตรวจรังสีเอกซ์ไม่ควรเข้ามาในแผนกโดยไม่

จำเป็น

ภาคผนวก ค.

คุณสมบัติของเพชร

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางแสง

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

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบความแข็งของวัสดุชนิดต่างๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความนำความร้อน

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

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่า Young's Modulus

Material	Young's Modulus (x 10 ¹¹ dynes/cm ²)
Diamond	1050
Tungsten	34.0
Steel	17.2-20.5
Ferrite	15.0
Platinum	14.7
Copper	12.8
Silicon	11.3
Quartz	7.9-10.7
Gold	7.4-8.0
Silver	7.1-7.8
Aluminium	6.9
Tin	4.1-4.5
Lead	1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ค่าฟังก์ชันงานของแต่ละธาตุ

วิธีทดสอบ

TE — Thermionic emission

PE — Photoelectric effect

FE — Field emission

CPD — Contact potential difference

polycr — Polycrystalline sample

amorp — Amorphous sample

Element	Plane	Φ /eV	Method
Ag	100	4.64	PE
	110	4.52	PE
	111	4.74	PE
Al	100	4.20	PE
	110	4.06	PE
	111	4.26	PE
As	polycr	(3.75)	PE
Au	100	5.47	PE
	110	5.37	PE
	111	5.31	PE
B	polycr	(4.45)	TH
Ba	polycr	2.52	TH
Be	polycr	4.98	PE
Bi	polycr	4.34	PE
C	polycr	(5.0)	CPD
Ca	polycr	2.87	PE
Cd	polycr	4.08	CPD
Ce	polycr	2.9	PE
Co	polycr	5.0	PE
Cr	polycr	4.5	PE
Cs	polycr	1.95	PE
Cu	100	5.10	FE
	110	4.48	PE
	111	4.94	PE
	112	4.53	PE
Eu	polycr	2.5	PE
Fe	100	4.67	PE
	111	4.81	PE
Ga	polycr	4.32	PE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วยประการใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gd	polycr	2.90	CPD
Ge	polycr	5.0	CPD
Hf	polycr	3.9	PE
Hg	liquid	4.475	PE
In	polycr	4.09	PE
Ir	100	5.67	PE
	110	5.42	PE
	111	5.76	PE
	210	5.00	PE
K	polycr	2.29	PE
La	polycr	3.5	PE
Li	polycr	2.93	FE
Lu	polycr	(3.3)	CPD
Mg	polycr	3.66	PE
Mn	polycr	4.1	PE
Mo	100	4.53	PE
	110	4.95	PE
	111	4.55	PE
	112	4.36	PE
	114	4.50	PE
	332	4.55	PE
Na	polycr	2.36	PE
Nb	001	4.02	TH
	110	4.87	TH
	111	4.36	TH
	112	4.63	TH
	113	4.29	TH
	116	3.95	TH
	310	4.18	TH
Nd	polycr	3.2	PE
Ni	100	5.22	PE
	110	5.04	PE
	111	5.35	PE
Os	polycr	5.93	PE
Pb	polycr	4.25	PE
Pd	polycr	5.22	PE
	111	5.6	PE
Pt	polycr	5.64	PE
	110	5.84	FE
	111	5.93	FE
	320	5.22	FE
	331	5.12	FE
Rb	polycr	2.261	PE
Re	polycr	4.72	TE
Rh	polycr	4.98	PE
Ru	polycr	4.71	PE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sb	amorp	4.55	
	100	4.7	
Sc	polycr	3.5	PE
Se	polycr	5.9	PE
Si	n	4.85	CPD
	p 100	(4.91)	CPD
	p 111	4.60	PE
Sm	polycr	2.7	PE
Sn	polycr	4.42	CPD
Sr	polycr	(2.59)	TH
Ta	polycr	4.25	TH
	100	4.15	TH
	110	4.80	TH
	111	4.00	TH
Tb	polycr	3.0	PE
Te	polycr	4.95	PE
Th	polycr	3.4	TH
Ti	polycr	4.33	PE
Tl	polycr	(3.84)	CPD
U	polycr	3.63	PE
	100	3.73	PE
	110	3.90	PE
	113	3.67	PE
V	polycr	4.3	PE
W	polycr	4.55	CPD
	100	4.63	FE
	110	5.22	FE
	111	4.45	FE
	113	4.46	FE
	116	4.32	TH
Y	polycr	3.1	PE
Zn	polycr	3.63	PE
	polycr	(4.9)	CPD
Zr	polycr	4.05	PE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

ความหนาและสีของฟิล์มออกไซด์

Oxide Thickness	Color and Comments (Å)
500	Tan
750	Brown
1000	Dark Violet to red violet
1250	Royal blue
1500	Light blue to metallic blue
1750	Metallic to very light yellow-green
2000	Light gold or yellow slightly metallic
2250	Gold with slight yellow-orange
2500	Orange to Melon
2750	Red-Violet
3000	Blue to violet-blue
3100	Blue
3250	Blue to blue-green
3450	Light green
3500	Green to yellow-green
3650	Yellow-green
3750	Green-yellow
3900	Yellow.
4120	Light orange
4260	Carnation pink
4430	Violet-red
4650	Red-violet
4760	Violet
4800	Blue Violet
4930	Blue
5020	Blue-green
5200	Green (Broad)
5400	Yellow-green
5600	Green-yellow
5740	Yellow to Yellowish (not yellow but is in the position where yellow is to be expected. At times is appears to be light creamy gray or metallic)
5850	Light orange or yellow to pink borderline
6000	Carnation pink
6300	Violet-red
6800	Bluish (Not blue but borderline between violet and blue-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับ... กรุณา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	green. It appears more like a Mixture between violet-red and blue-green and over-all looks grayish)
7200	Blue-green to green (quite broad)
7700	Yellowish
8000	Orange (rather broad for orange)
8200	Salmon
8500	Dull, light red-violet
8600	Violet
8700	Blue-violet
8900	Blue
9200	Blue-green
9500	Dull yellow-green
9700	Yellow to Yellowish
9900	Orange
10000	Carnation Pink
10200	Violet-red
10500	Red-violet
10600	Violet
10700	Blue-violet
11000	Green
11100	Yellow-green
11200	Green
11800	Violet
11900	Red-violet
12100	Violet-red
12400	Carnation Pink-Salmon
12500	Orange
12800	Yellowish
13200	Sky blue to green-blue
14000	Orange
14500	Violet
14500	Blue-violet
15000	Blue
15100	Dull Yellow-green

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

ความหนาแน่นสีของซิลิคอนไนไตรด์

Nitride Thickness	Color and Comments (Å)
375	Tan
562.5	Brown
750	Dark Violet to red violet
937.5	Royal blue
1125	Light blue to metallic blue
1312.5	Metallic to very light yellow-green
1500	Light gold or yellow slightly metallic
1687.5	Gold with slight yellow-orange
1875	Orange to Melon
2062.5	Red-Violet
2250	Blue to violet-blue
2325	Blue
2437.5	Blue to blue-green
2587.5	Light green
2625	Green to yellow-green
2737.5	Yellow-green
2812.5	Green-yellow
2925	Yellow.
3090	Light orange
3195	Carnation pink
3322.5	Violet-red
3487.5	Red-violet
3570	Violet
3600	Blue Violet
3697.5	Blue
3765	Blue-green
3900	Green (Broad)
4050	Yellow-green
4200	Green-yellow
4305	Yellow to Yellowish (not yellow but is in the position where yellow is to be expected. At times is appears to be light creamy gray or metallic)
4357.5	Light orange or yellow to pink borderline
4500	Carnation pink
4725	Violet-red
5100	Bluish (Not blue but borderline between violet and blue-green. It appears more like a Mixture between violet-red

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	and blue-green and over-all looks grayish)
5400	Blue-green to green (quite broad)
5775	Yellowish
6000	Orange (rather broad for orange)
6150	Salmon
6375	Dull, light red-violet
6490	Violet
6525	Blue-violet
6675	Blue
6900	Blue-green
7125	Dull yellow-green
7225	Yellow to Yellowish
7425	Orange
7500	Carnation Pink
7650	Violet-red
7575	Red-violet
7950	Violet
8025	Blue-violet
8250	Green
8325	Yellow-green
8400	Green
8850	Violet
8925	Red-violet
9075	Violet-red
9300	Carnation Pink-Salmon
9375	Orange
9600	Yellowish
9900	Sky blue to green-blue
10500	Orange
10875	Violet
10950	Blue-violet
11550	Dull Yellow-green

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

คุณสมบัติของสารเรืองแสง

Modified: Thu December 9 2010, 16:37:44 PST

<http://scintillator.lbl.gov/>

Formula	Luminosity (photons/MeV)	Time (ns)	Emission Peak (nm)	Comment
Al ₂ O ₃ :Ti	2,300		290(33%); 730(67%)	<150K
Ba ₂ Ca(BO ₃) ₂ :Ce	5,100	24	400	7% Ce on Ba site + 7% Na
Ba ₃ Gd(BO ₃) ₃ :Ce	370		313; 418	4% Ce
Ba ₅ (PO ₄) ₃ F:Ce	400		358	crystalline powder, 40% Ce
BaBr ₂	19,300 (10 us)	2,200 + slow	425; 475	
BaBr ₂ :Ce	5,000 (0.5 us); 10,300 (10 us)	80 (27%); 490 (22%); 2,100 (51%)	345; 370	1% Ce; 1% K
BaBr ₂ :Eu	15,700 (10 us)	585	404	
BaBrI:Eu	81,000	297(23%); 482(77%)	413	
BaCl ₂	1,700 (10 us)	980 + slow	420; 475	
BaCl ₂	6,000	1.6 (72%); 34.8 (28%)	300-400	
BaCl ₂ :Ce	2,000 (0.5 us); 5,200 (10 us)	7 (6%); 190 (11%); 1,500 (83%)	349; 373	1% Ce; 1% K
BaCl ₂ :Eu	19,400 (10 us)	390	402	
BaF ₂	10,000	620	310	assumes 1 photoelectron per 5 photons
BaF ₂	2,000	0.6	220	assumes 1 photoelectron per 5 photons
BaF ₂	9,950			assumes 1 photoelectron per 5 photons
BaF ₂	1,300	<1 ns	220	4.4% Ce; Luminosity 3% of NaI(Tl) with Bialkali PMT
BaF ₂	3,900	340; 920	310	Luminosity 9% of NaI(Tl) with Bialkali PMT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BaF ₂	1,400	0.8	195; 220	4.4% Ce; Luminosity 3% of NaI(Tl) with Bialkali PMT
BaF ₂		0.12 (15%); 0.78 (85%)		
BaF ₂	11,000			
BaF ₂ :Ce	13,000	47; 260	320	0.2% Ce; luminosity 114% of undoped
BaF ₂ :Ce	2,200	50	360	Luminosity 5% of NaI(Tl) with Bialkali PMT
BaF ₂ :Ce		4 (12%); 28 (78%)	342-358	35% Ce
BaFl	55,000	163 (7%); 573 (81%); 905 (6%)	405	5% Eu
BaHfO ₃ :Ce	40,000	25 + slow	400	transparent ceramic
BaI ₂	2,600 (0.5 us); 4,600 (10 us)	590 (71%); 2,200 (29%)	550	
BaI ₂ :Ce	2,600 (10 us)	610 + slow	530	0.1% Ce but only slow SA emission detected
BaI ₂ :Ce	not detected			0.1% Ce
BaI ₂ :Eu	3,800 (10 us)	510 + slow	425	
BaI ₂ :Eu	>30,000	< 1,000	420	
BaI ₂ :Eu	40,000			
BaLu ₂ F ₈	400	1+slow	313	
BaLu ₂ F ₈ :Ce	870	35 + slow	330	
BaMgF ₄	1,000		190; 220	
BaY ₂ F ₈ :Ce	980	46 + slow	329	9.9% Ce concentration
BC-408 (plastic)	7,500			
BeO	6,500	18	250	15% of NaI(Tl)
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	8,200			
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)		300	480	
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	8,080			
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	8,500			
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)		300	485	
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	7,610			
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	10,600			
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)		100 (12%) 300 (79%) 1000 (4%)	460	crystalline powder
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	7,200		510	
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	7,100			luminosity = average of APD and PD values
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	8,000			
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	2,000	100	480	10,000 ph/Mev and 2,000 ns at 185K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)		105 ave 3.7 (7.5%); 28.8 (9.6%); 116.8 (87.5%)	470	
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (BSO)	1,200*	86 ave 2.8 (7.4%); 27.1 (9.2%); 99.8 (83.4%)	470	0.1% Ce; *luminosity 60% of undoped
BiBaO_2Br	2,200	100 (21%) 300 (54%) 700 (12%)	500	crystalline powder; luminosity 0.27 x BGO
BiBaO_2Cl	6,600	100 (2%) 300 (41%) 600 (23%)	491	crystalline powder; luminosity 0.81x BGO
$\text{BiF}_3:\text{Ce}$	not detected			
BiSrO_2Cl	2,000	50 (28%) 200 (35%) 300 (14%)	431	crystalline powder; luminosity 0.24 x BGO
$\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$	110		390; 420	crystalline powder
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}:\text{Ce}$	3,200		354, 412	crystalline powder, 2.5% Ce
$\text{CaBPO}_5:\text{Ce}$	1,310	19.5		0.5% Ce
$\text{CaF}_2:\text{Ce}$		4 (3%); 14 (5%); 30 (92%)	318; 332	35% Ce
$\text{CaF}_2:\text{Eu}$	24,000			
CaI_2	86,000	550	410	
$\text{CaI}_2:\text{Eu}$	86,000	790	470	
$\text{CaI}_2:\text{Eu}$	110,000			
$\text{CaI}_2:\text{Ti}$	42,000	1,100	420	
$\text{CaLaB}_7\text{O}_{13}:\text{Ce}$	220		291; 309; 330; 360	crystalline powder
$\text{CaLaB}_7\text{O}_{13}:\text{Eu}$	not significant			crystalline powder
CaWO_4	15,000-25,000	8,000	425	Luminosity 90% of CdWO_4
CaWO_4		1,400 (30%); 9,200 (70%)		
CaWO_4	15,800			
CaWO_4	14,400			77K
$\text{CaYBO}_4:\text{Eu}$	not significant			crystalline powder
CdF_2	170	7.1	520;580	
CdF_2	1100	4.8 (29%); 24 (28%); 78 (43%)	420	crystalline powder
$\text{CdS}:\text{In}$		<1	519	fast phosphor
$\text{CdS}:\text{In}$		0.2	520	fast n-type phosphor
$\text{CdS}:\text{In},\text{Te}$		3.3	630	fast n-type phosphor
$\text{CdS}:\text{Te}$	17,000	270+slow	640; 580	
CdWO_4	27,000	12,000	495	
CdWO_4	15,300			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CdWO_4	7,800	5,000; 20,000	480	Luminosity 18% of NaI(Tl) with Bialkali PMT
CdWO_4		8,900	480	
CdWO_4	12,200			
CdWO_4	15,800	13,000		300K
CdWO_4	14,340			77K
CeBr_3	68,000	17	371	
CeCl_3	46,000	25 + slow	350	
$\text{CeCl}_3(\text{CH}_3\text{OH})_4$	16,600	64.4 (3%); 1,660 (7%)	364	
CeF_3	2,400			
CeF_3	4,400	3; 26.5		
CeF_3	4,000	2; 31	310; 340	
CeF_3	4,000	27	340	
$\text{CeF}_3:\text{Lu}$	8,000		290	
$\text{CeP}_5\text{O}_{14}$	4,000			
$\text{Cs}_2\text{LiCeCl}_6$	22,000	101(42%); 557(35%); 2,900(23%)	385, 405	
$\text{Cs}_2\text{LiLuCl}_6:\text{Ce}$	7,000	29.4	370; 410	0.5% Ce
$\text{Cs}_2\text{LiYBr}_6:\text{Ce}$	24,000	85 (39%); 2,500		1% Ce; 88,000 photons/neutron
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$	6,535 (1 us); 22,420 (10 us)	6,600	305	
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$	660	2	250	
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$	7,000 (1us); 22,00 (10 us)	7,000		
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$	1,700	4		
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$	9,565 (1 us); 18,400 (10 us)	600; 6000	372; 400	
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$	21,000	35 + slow	490	0.5% Ce
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$	10,200 (1us); 21,600 (10 us)	2,800	370	0.1% Ce
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$	21,600			0.1% Ce; 70,000 photons/neutron
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}$				>1% Ce; neutron peak resolution 2.9%
$\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Pr}$	10,000		315	0.2% Pr
$\text{Cs}_2\text{NaCeBr}_6$	25,000	140 us (94%); 880 us (6%)	380-466	
$\text{Cs}_2\text{NaCeBr}_6$	25,000	140(94%); 800(6%)	377, 400	
$\text{Cs}_2\text{NaCeCl}_6$				
$\text{Cs}_2\text{NaLaBr}_6:\text{Ce}$	9,000 (0.5 us); 17,000 (10 us)	61 (32%) 450 (11%) 1,900 (57%)	382; 414	0.5% Ce
$\text{Cs}_2\text{NaLuBr}_6:\text{Ce}$	5,200 (0.5 us); 5,800 (10 us)	61 (65%) 350 (35%)	389; 422	0.5% Ce

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้อนุมัติ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{Cs}_2\text{NaYBr}_6:\text{Ce}$	5,000 (0.5 us); 9,500 (10 us)	61 (26%) 350 (23%) 2,700 (51%)	385; 420	0.3% Ce
$\text{Cs}_3\text{Gd}_2\text{I}_9:\text{Ce}$	2,200 (0.5 us); 2,600 (10 us)			1% Ce
Cs_3LaBr_6	1,600 (0.5 us); 2,100 (10 us)	250 (92%) 2,100 (8%)	394	
$\text{Cs}_3\text{LaBr}_6:\text{Ce}$	5,800 (0.5 us); 10,400 (10 us)	46 (18%) 270 (42%) 2,100 (40%)	390; 425	0.5% Ce
$\text{Cs}_3\text{Lu}_2\text{I}_9$	4,000 (0.5 us); 6,600 (10 us)	770	390; 608	
$\text{Cs}_3\text{Lu}_2\text{I}_9:\text{Ce}$	13,600 (0.5 us); 22,800 (10 us)	18 (2%); 42 (6%) 120 (40%); 510 (52%)		2% Ce
Cs_3LuI_6	1,200 (0.5 us); 1,400 (10 us)		390; 608	
$\text{Cs}_3\text{LuI}_6:\text{Ce}$	1,400 (0.5 us); 1,500 (10 us)		429; 471	0.5% Ce
$\text{CsBa}_2\text{I}_5:\text{Eu}$	97,000	48 (1%); 383 (26%); 1,500 (68%); 9,900 (25%)	435	7% Eu
CsBr	20	0.07	250	
CsCaCl_3	1,400	< 1	250; 305	
CsCl	900	0.9	240; 270	
CsF	1,900	2-4	390	
CsF	2,000	2.9	390	
$\text{CsGd}(\text{PO}_3)_4:\text{Ce}$	24,400		336, 358	crystalline powder; 1% Ce
$\text{CsGd}_2\text{F}_7:\text{Ce}$	7,300	20 + 3,000	325	20% Ce
$\text{CsGd}_2\text{F}_7:\text{Ce}$	6,000	~30 (18%) + 3,000	340	10% Ce
$\text{CsGd}_2\text{F}_7:\text{Pr}$	d-f not observed			2% Pr
CsI				
$\text{CsI}:\text{CO}_3$	39,000	1,760	410; 500	0.1% CO3
$\text{CsI}:\text{Eu}$	19,100			
$\text{CsI}:\text{Na}$	38,000			
$\text{CsI}:\text{Na}$	49,000			
$\text{CsI}:\text{Na}$	43,000			
$\text{CsI}:\text{Na}$	49,000		425	
$\text{CsI}:\text{Na}$	46,000			luminosity = average of APD and PD values
$\text{CsI}:\text{Tl}$	55,000			
$\text{CsI}:\text{Tl}$	61,000			
$\text{CsI}:\text{Tl}$		980	530	
$\text{CsI}:\text{Tl}$	56,000			
$\text{CsI}:\text{Tl}$	56,000			
$\text{CsI}:\text{Tl}$	57,000		560	
$\text{CsI}:\text{Tl}$	56,000			luminosity = average of APD and PD values

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่สามารถทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{CsLuP}_2\text{O}_7:\text{Ce}$	8,000	4.4 (14.1%); 19.8(85.9%)	393	crystalline powder; 0.5% Ce
$\text{CsY}_2\text{F}_7:\text{Ce}$	1,400	32	333	5% Ce
$\text{CsYP}_2\text{O}_7:\text{Ce}$	8,000	5.2 (16.9%); 22.2(83.1%)	393	crystalline powder; 0.5% Ce
$(\text{Gd-Y})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GYAG)	11,000	90 + >1,000	550	ceramic; 0.5% Ce
$\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Ce}$	Not detected			
$\text{Gd}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$ (GPS)	30,000-40,000	46	372; 394	luminosity 2.5 x GSO, 5 x BGO
$\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (GSO)	12,500	56; 600	430	
$\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (GSO)	2,800			
$\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (GSO)	7,400			
$\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GSAG)	7,500			ceramic, 3% Ce
$\text{Gd}_3\text{Y}_3\text{Al}_{10}\text{O}_{24}:\text{Ce}$ (GYAG)	16,500			ceramic, 3% Ce
$\text{GdAlO}_3:\text{Ce}$	9,000	30; 180	335; 358	0.75% Ce
$\text{GdB}_3\text{O}_6:\text{Ce}$	200		311	crystalline powder; Ce3+ to Gd3+ transfer
$\text{GdBO}_3:\text{Ce}$	10,000		385; 415	crystalline powder
GdBr_3	28,000 (0.5 us); 44,000 (10 us)	20 (26%) 212 (65%) 13,500 (9%)	460	2% Ce
$\text{GdCl}_3:\text{Ce}$	38,000		350; 370	1% Ce
$\text{GdI}_3:\text{Ce}$	89,000	33	563	2% Ce
$\text{GdI}_3:\text{Ce}$	44,000	45 (70%); 250 (24%); 2,000 (6%)	560	1% Ce; 42,000 ph/MeV at 600 K
$\text{GdOBr}:\text{Ce}$	89% of ZnS:Ag	60	405, 440	phosphor, 1% Ce
$\text{GdOCl}:\text{Ce}$	75% of ZnS:Ag	36	365, 410	phosphor, 1% Ce
HfF_4	300	29	350	crystalline powder
HfO_2	31,000	9.500	480	crystalline powder; 2.5% Eu, 1% Y
$\text{K}_2\text{CeBr}_5:\text{Ce}$	50,000			10% Ce
$\text{K}_2\text{CeCl}_5:\text{Ce}$	30,000		370	
$\text{K}_2\text{LaBr}_5:\text{Ce}$	40,000 (10 us)	50	359; 391	10% Ce
K_2LaCl_5	900	3,700	400	10% Ce
$\text{K}_2\text{LaCl}_5:\text{Ce}$	49,300; 22,600 (0.5 us)	80 + slow	347; 372	10% Ce
$\text{K}_2\text{LaCl}_5:\text{Ce}$	23,000 (0.5 us); 30,000 (10 us)		344; 372	10% Ce
$\text{K}_2\text{LaI}_5:\text{Ce}$	53,000 (0.5 us); 55,000 (10 us)	24	401; 439	10% Ce
$\text{K}_2\text{LaI}_5:\text{Ce}$	29,000		340; 380	10% Ce; 50% in 115 ns
K_2YF_5	300	1.3	170	
$\text{K}_2\text{YF}_5:\text{Pr}$	6.900	20 (5%); + slow	240	2% Pr
$\text{K}_3\text{Lu}(\text{PO}_4)_2$	26,500	34 (81%); 1200 (19%)	390	1% Ce

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรถูกดัดแปลงไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KCaF ₃	1,400	< 2	140-190	
KGd(PO ₃) ₄ :Ce	14,100		325, 345	crystalline powder; 1% Ce
KI:TI	9,700			
KLu ₂ F ₇	270	< 2	165	
KLuF ₄	170	1.3	170-200	
KLuP ₂ O ₇ :Ce	16,000	6.3 (14.9%); 27.2(85.1%)	394	crystalline powder; 0.5% Ce
KMgF ₃	1,400	1.3	140-190	
KYF ₄	1,000	1.9	170	
KYP ₂ O ₇ :Ce	10,000	6.7 (22.6%); 23.2(77.4%)	380	crystalline powder; 0.5% Ce
La ₂ Hf ₂ O ₇ :Ti	13,000	10,000	475	transparent ceramic; 2% Ti ⁴⁺
La ₂ O ₂ S:Ce	Not detected			
La ₂ O ₃ :Ce	Not detected			
La ₂ O ₃ :Ce	Not detected			
LaAlO ₃ :Ce	Not detected			
LaB ₃ O ₆ :Ce	7,700		300; 320	crystalline powder; 0.05% Ce
LaBO ₃ :Bi		800	365	
LaBO ₃ :Ce	600		355; 380	crystalline powder
LaBr _{(3-x)I(x)} :Ce	42,000(0.5 us); 45,000(10 us)	31(70%); 244(30%)	400; 434	all entries for x = 0.75 and 5% Ce
LaBr _{(3-x)I(x)} :Ce	55,000(0.5 us); 58,000(10 us)	28	472; 500	all entries for x = 1.5 and 5% Ce
LaBr _{(3-x)I(x)} :Ce	22,000(0.5us); 22,000(10 us)	12	460; 510	all entries for x = 2.25 and 5% Ce
LaBr ₃ :Ce	61,000	30	356; 387	0.5% Ce
LaBr ₃ :Ce	73,000			sizes 5-76 mm; 5% Ce
LaBr ₃ :Ce	74,000		375	10% Ce
LaBr ₃ :Ce	75,000			5% Ce; luminosity = average of APD and PD values
LaBr ₃ :Ce	68,600			
LaCeF ₆	4,500			
LaCl ₃	34,000	3,480	400	
LaCl ₃ :Ce	49,000	25 + slow	330; 352	10% Ce
LaCl ₃ :Ce	48,000		350	5% Ce
LaCl ₃ :Ce	50,000			10% Ce; luminosity = average of APD and PD values
LaCl ₃ :Ce	40,900			
LaF ₃ :Ce	2,200	3; 26.5	290; 340	10% Ce
LaF ₃ :Nd	2,000	6.3	173	0.03% Nd
LaF ₃ :Nd	270		173	10.6% Nd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{LaI}_3:\text{Ce}$	200-300	1-2	452; 502	luminosity 16,000 photons/MeV at 100K
$\text{LaMgB}_5\text{O}_{10}:\text{Ce}$	1,300		310; 317	crystalline powder; 0.05% Ce
$\text{LaOBr}:\text{Ce}$	38% of ZnS:Ag	38	460	phosphor, 1% Ce
$\text{LaOCl}:\text{Bi}$		1,600	345	
$\text{LaOCl}:\text{Ce}$	4.3% of ZnS:Ag	100	435	phosphor, 1% Ce
$\text{Li}_2\text{CaSiO}_4:\text{Ce}$	7,800	27.0		0.5% Ce
$\text{Li}_3\text{YCl}_6:\text{Ce}$	3305 (1 us); 6185 (10 us)	250; 2,300	360; 385	
$\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$	14,000		385; 415	crystalline powder
$\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$	1,200		388; 419	crystalline powder
LiBaF_3	1,400	0.8	190; 230	
LiBaF_3	1,600	6,000	300	
LiBaF_3	1,200	0.8	187; 225	
$\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}$		50	280	6 ns rise time
$\text{LiCaPO}_4:\text{Ce}$	5,900	25.5		0.5% Ce
$\text{LiGd}(\text{PO}_3)_4:\text{Ce}$	2,600		310, 329	crystalline powder; 1% Ce
LiGdCl_4	36,000		310; 340; 360	crystalline powder
$\text{LiGdCl}_4:\text{Ce}$	64,600	33	345; 365	crystalline powder; 20 % Ce
$\text{LiI}:\text{Eu}$	15,000		475	
$\text{LiI}:\text{Eu}$		1,200		
$\text{LiYSiO}_4:\text{Bi}$			350	
$(\text{Lu},\text{Y})_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LYSO)	27,000		425	
$\text{Lu}_{(2-2x)}\text{Gd}_{(2x)}\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LGSO)	20,000			x = 0.037 in crystal
$\text{Lu}_x\text{Gd}_{(1-x)}\text{I}_3:\text{Ce}$	78,400	29	540	x= 0.7; 2% Ce
$\text{Lu}_x\text{Y}_{(1-x)}\text{I}_3:\text{Ce}$	68,100	28	522	x= 0.7; 2% Ce
$\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LYSO)	34,000	41 + slow	397	
$\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Ce}$	Not detected			
$\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Ce}$	Not detected			
$\text{Lu}_2\text{S}_3:\text{Ce}$	28,000	32	592	
$\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$ (LPS)	23,000	30	380	
$\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$ (LPS)	26,000	38	378	
$\text{Lu}_2\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Ce}$ (LPS)	9,600			0.25% Ce
$\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$	28,000			luminosity = average of APD and PD values
$\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LSO)	33,000	40	420	
$\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LSO)	27,300			
$\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LSO)	27,000	40	420	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lu ₂ SiO ₅ :Ce (LSO)		7 (1%); 38.8 (99%)		risetime: < 50 ps (88%); 350 ps (12%)
Lu ₂ SiO ₅ :Ce (LSO)	29,000		425	
Lu ₂ SiO ₅ :Ce (LSO)	26,000			
Lu ₂ SiO ₅ :Ce (LSO)	22,200			0.02% Ce
Lu ₂ SiO ₅ :Ce/Ca (LSO)	25,400			0.1% Ce; 0.1% Ca
Lu ₂ SiO ₅ :Pr	2,200 + slow	26	247	
Lu ₂ SiO ₅ :Pr,Ca		6.9 (66%); 23.2 (34%) + slow		0.2% Pr ³⁺ , 0.1% Ca
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce (LuAG)	12,500			
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce (LuAG)	5,606		510	
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Pr	17,000	21	310	0.14 % Pr
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Pr	16,000	26	308	0.25% Pr
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Pr	20,000	20 (68%); 455 (32%)		0.25% Pr
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Pr	16,000	17.2 (30%); 53 (16%); 1,590 (54%)	310	
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Pr	12,400			1% Pr
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Pr	19,000	20	310	
LuAlO ₃ :Ce (LuAP)	11,400	16.5; 74	365	0.105% Ce
LuAlO ₃ :Ce (LuAP)	9,600	11; 28; 835	390	
LuAlO ₃ :Ce (LuAP)	11,300			
LuAlO ₃ :Ce (LuAP)	20,500	17.9	365	
LuBO ₃ :Ce (Calcite)	10,800 (0.5 us); 12,000 (10 us)			5% Ce
LuBO ₃ :Ce (vaderite)	3,000 (0.5 us); 3,900 (10 us)			5% Ce
LuBO ₃ :Pr (Calcite)	4,200 (0.5 us); 7,300 (10 us)			1% Pr
LuBO ₃ :Pr (vaderite)	4,200 (0.5 us); 7,300 (10 us)			1% Pr
LuBr ₃ :Ce	26,000	32 + slow		0.76% Ce
LuCl ₃ :Ce	6,600	46 + slow		0.45% Ce
LuI ₃ :Ce	50,000	31 (69%); 400 (15%); 3000 (16%) + slow	475; 520	
LuI ₃ :Ce	50,000	23-31	474	decay time depends on Ce ³⁺ concentration
LuI ₃ :Ce	76,000 (0.5 us); 98,000 (10 us)	complex	540	5% Ce
LuI ₃ :Ce	76,000 (0.5 us); 98,000 (10 us)	complex	540	5% Ce
LuI ₃ :Ce	115,000	28	522	2% Ce
LuOBr:Ce			403, 432	
LuOCl:Ce				weak x-ray luminescence reported

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LuPO ₄ :Ce	17,200	25	360	
NaGd(PO ₃) ₄ :Ce	21,000	12.4	313; 332	crystalline powder, 2.5% Ce
NaGd(PO ₃) ₄ :Ce	11,100		314, 333	crystalline powder; 1% Ce
NaGdCl ₄	2,400		305; 345; 365	crystalline powder
NaGdCl ₄ :Ce	39,400	26	350; 370	crystalline powder; 20% Ce
NaI:Tl	45,000		415	
NaI:Tl	43,000			
NaI:Tl			415	
NaI:Tl				
NaI:Tl	44,000		415	
NaI:Tl	45,000			luminosity = average of APD and PD values
NaI(pure)	80,000	60 ns		77K, 14% FWHM for 122 keV gammas
NaI(pure)				77K, 50,000 ns peaking time
NaLuP ₂ O ₇ :Ce	6,000	5.5 (17.7%); 20.4(82.3%)	370	crystalline powder; 0.5% Ce
PbCl ₂	230	2.9 (41%); 20 (32%); 179 (27%)	500	crystalline powder
PbCl ₂ :Gd		1,350; 6,200		0.1% Gd; 173K
PbCO ₃	760	5.6; 27; 155	475	Luminosity 16,000 photons/MeV at - 40C
PbCO ₃	680	2.0 (22%); 15 (69%); 92 (9%)	432; 465	11,900 photons/MeV at - 120C
PbFCl	1,700	4; 35	392; 420	
PbSO ₄	4,900	1.8; 19; 95; 425	335	Luminosity 68,500 photons/MeV at - 145C
PbSO ₄	10,000	1.85; 14.5; 125-150	340; 380	
PbSO ₄		7.2 (21%); 35 (32%); 104 (39%); 656 (5.5%)		
PbWO ₄	200	6	420	QRT
PbWO ₄	300	2.5 (25%); 11 (29%); 98 (46%)	490	crystalline powder
PbWO ₄ :Pr	250	2,000	480, 620, 640	1% Pr
PrBr ₃ :Ce	21,000	8 + 22	365; 395	20% Ce
PrF ₃		510	394	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rb ₂ CeBr ₅	34,000	56.1 (98.8%); 329.9 (1.2%)	390.5	
Rb ₂ LiYBr ₆ :Ce	23,000	42 (3%); 140 (23%); 1,600 (74%)	385; 420	0.5% Ce
RbCl	1		190	
RbF	1700	1.3	203; 234	
RbGd ₂ Br ₇ :Ce	56,000	45	430	
RbGd ₂ Br ₇ :Ce	56,000	43	410	9.8% Ce
RbLuP ₂ O ₇ :Ce	1,300	6.3 (23.2%); 24.0(76.8%)	393	crystalline powder; 0.5% Ce
RbYP ₂ O ₇ :Ce	7,000	8.8 (14.8%); 27.8(85.2%)	393	crystalline powder; 0.5% Ce
ScBO ₃ :Bi			300	
ScBO ₃ :Ce	6,500		385; 420	crystalline powder
Sr ₅ (PO ₄) ₃ F:Ce	340		342	crystalline powder, 25% Ce
SrBr ₂ :Eu	25,000			
SrF ₂ :Ce		4 (24%); 30 (76%)	340-350	35% Ce
SrHfO ₃ :Ce	40,000	42 + slow	410	transparent ceramic
SrI ₂	38,000		560	
SrI ₂ :Ce/Na	16,000	27 (25%); 450 (75%)	404; 435	0.5% Ce/Na
SrI ₂ :Eu	90,000	1,200	435	
SrI ₂ :Eu	40,000		430	
SrI ₂ :Eu	120,000	1,200	435	5% Eu
SrI ₂ :Eu	115,000	1,200	435	6% Eu
SrI ₂ :Eu		620 (0.5% Eu); 1650 (10% Eu)	429 (0.5% Eu); 436 (10% Eu)	crystals < 1 cm ³
Ta ₂ Zn ₃ O ₈		1,130	385	crystalline powder
ThBr ₄			405	
ThCl ₄			345	
TiCl(Be,I)	1,000	200	465	
Y ₂ O ₃	15,480	28	370	36% of NaI:Tl
Y ₂ O ₃ :Bi			410	
Y ₂ O ₃ :Ce	Not detected			
Y ₂ O ₃ :Ce	Not detected			
Y ₂ SiO ₅ :Ce (YSO)	9,200	42	420	
Y ₂ SiO ₅ :Ce (YSO)	24,000			
Y ₂ SiO ₅ :Ce (YSO)	23,400			0.10% Ce
Y ₂ SiO ₅ :Ce/Ca (YSO)	21,200			0.10% Ce; 0.10% Ca
Y ₂ WO ₆ :Bi		1,600	515	
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce (YAG)	11,610	100	260	27% of NaI:Tl
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce (YAG)	16,700			
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce (YAG)				
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce (YAG)		119 + slow	300; 550	crystal; 0.1% Ce
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce (YAG)		85 + slow	550	ceramic; 0.5% Ce
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Pr	16,000	14	320	0.25% Pr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Y_3Al_5O_{12}:Pr$	8,000	18 (80%) + slow	300-400	
$YAl_3B_4O_{12}:Bi$			290	
$YAl_3B_4O_{12}:Ce$	5,700		344; 367	crystalline powder
$YAlO_3:Ce$ (YAP)	16,200	27	347	
$YAlO_3:Ce$ (YAP)	21,600			
$YAlO_3:Ce$ (YAP)	18,000			
$YAlO_3:Ce$ (YAP)	20,100	24.2	365	
$YAlO_3:Ce$ (YAP)	15,900			
$YAlO_3:Ce$ (YAP)		26 (90%); 67 (10%)		risetime: 240 ps
$YAlO_3:Ce$ (YAP)				
$YBa_3B_9O_{18}$	1400	27	400	
$YBO_3:Bi$		1,000	328	
$YBO_3:Ce$	10,000		390; 415	crystalline powder
$YCl_3:Ce$	4,500		390; 410	1% Ce
$YI_3:Ce$	98,600	34	549	2% Ce
$YMgB_5O_{10}:Ce$	330		305	crystalline powder
$YNbO_4:Bi$			465	
$YOBr:Ce$	61% of ZnS:Ag	65	405, 440	phosphor, 1% Ce
$YOCl:Bi$		1,400	400	
$YOCl:Ce$	52% of ZnS:Ag	34	365, 405	phosphor, 1% Ce
$YOF:Bi$			330	
$YPO_4:Bi$		700	342	
$YVO_4:Bi$		4,500	559	
$ZnO:Ga$		0.36 (35%); 0.82 (65%)		fast n-type phosphor, risetime < 40 ps
$ZnO:Ga$		<1	385	fast n-type phosphor
$ZnO:Ga/H$	9,700	0.8	389	crystalline powder; luminoisity 54% of $YAlO_3:Ce$
$ZnSe:Te$	55,000	50,000	645	
$ZnSe:Te$	28,300		610	
$ZnWO_4$	9,300	20,000		
$ZnWO_4$		21,800	480	
$ZnWO_4$		700; 7,000; 25,000		
$ZnWO_4$		1,000; 4,000; 25,000		
$ZnWO_4$	7,170	24,000		300K
$ZnWO_4$	8,460			77K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ชื่อเคมี IUPAC : Sulfuric acid

ชื่อเคมีทั่วไป : Sulfuric acid

ชื่อพ้องอื่น ๆ : Oil of vitriol; BOU; Dipping Acid; Vitriol Brown Oil; Sulfuric; Acid Mist; Hydrogen sulfate; Sulfur acid; Sulfuric acid, spent;

สูตรโมเลกุล : H_2SO_4

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ของเหลว	สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ไม่มีกลิ่น	นน. โมเลกุล	: 98
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	: 276	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง ($^{\circ}C$)	: -1 – (-30)
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 1.84		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: 3.4		
ความหนืด (mPa.sec)	: 26.9		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 0.001 ที่ $20^{\circ}C$		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: ละลายน้ำได้ที่ $20^{\circ}C$		
ความเป็นกรด-ด่าง(pH) :-			
จุดวาบไฟ($^{\circ}C$) :-		จุดติดไฟได้เอง($^{\circ}C$) :-	

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

2. ชื่อเคมี IUPAC: Hydrogen dioxide

ชื่อเคมีทั่วไป : Hydrogen peroxide; Hydroperoxide

ชื่อพ้องอื่น ๆ : Peroxide; Albone; Inhibine; Perhydrol; Peroxan; Oxydol; Hioxy; Dihydrogen dioxide; T-stuff; Superoxol; H_2O_2 ; Hydrogen Peroxide, 30%สูตรโมเลกุล : H_2O_2

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ของเหลว	สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ชุน	นน. โมเลกุล	: 34.0
จุดเดือด (°C)	: 100	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง (°C)	: -11.1
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 1.00		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: 1.2		
ความหนืด (mPa.sec)	: -		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 5 ที่ 25 °C		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: ละลายน้ำได้ที่ - °C		
ความเป็นกรด-ด่าง(pH) :	-		
จุดวาบไฟ(°C) :-		จุดติดไฟได้เอง(°C) :-	

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์หากมีการใช้และการจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

3. ชื่อเคมี IUPAC: Hydrofluoric Acid

ชื่อเคมีทั่วไป : Fluorhydric acid or Fluoric acid

ชื่อพ้องอื่น ๆ : Hydrogen fluoride; Etching acid; HF A; Fluorohydric acid; Fluoric acid; Antisal 2B; Deuteriumfluoride;

สูตรโมเลกุล : HF

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ก๊าซ	สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ชุน	นน. โมเลกุล	: 20.01
จุดเดือด (°C)	: 20	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง (°C)	: -83
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 1.0		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: 0.7		
ความหนืด (mPa.sec)	: -		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 760 ที่ 20 °C		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: ได้ดีมาก		
ความเป็นกรด-ด่าง(pH) :	-		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดวาบไฟ(°C) :-

จุดตกติดไฟได้เอง(°C) :-

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

4. ชื่อเคมี IUPAC : Ammonium fluoride

ชื่อเคมีทั่วไป :-

ชื่อพ้องอื่นๆ : Neutral ammonium fluoride

สูตรโมเลกุล : NH_4F **คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)**

สถานะ	: ผลึก	สี	: ขาว
กลิ่น	: ไม่มีกลิ่น	นน. โมเลกุล	: 37.04
จุดเดือด (°C)	: -	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง (°C)	: -
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 1.015		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: -		
ความหนืด (mPa.sec)	: -		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: -		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: ละลายน้ำได้ที่	- °C	
ความเป็นกรด-ด่าง(pH) : 6 ที่ 20 °C			
จุดวาบไฟ(°C) :-		จุดตกติดไฟได้เอง(°C) :-	

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)**5. ชื่อเคมี IUPAC: Orthophosphoric acid**

ชื่อเคมีทั่วไป : Phosphoric acid

ชื่อพ้องอื่นๆ : White phosphoric acid; Orthophosphoric acid; Sonac; Phosphoric Acid

สูตรโมเลกุล : H_3PO_4 in H_2O **คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)**

สถานะ	: ของเหลว	สี	: ใส ไม่มีสี
กลิ่น	: ไม่มีกลิ่น	นน. โมเลกุล	: 98.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเดือด (°C) : 158	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง (°C) : 21
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1) : 1.69	
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1) : 3.4	
ความหนืด (mPa.sec) : -	
ความดันไอ (มม.ปรอท) : 0.0285 ที่ 20 °C	
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) : ละลายน้ำได้ดี - °C	
ความเป็นกรด-ด่าง(pH) : 1.5 ที่ - °C	
จุดวาบไฟ(°C) : -	จุดติดไฟได้เอง(°C) : -

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- สารนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ควรสนใจเกี่ยวกับน้ำและอากาศ

6. ชื่อเคมี IUPAC: -

ชื่อเคมีทั่วไป : Chromium trioxide

ชื่อพ้องอื่น ๆ : Chromium anhydride; Chromium (VI) Oxide; Chromic Anhydride; Chromic Trioxide; Monochromium Oxide; Chromium (VI) Oxide (1:3); Chromerge; Chromium (VI) trioxide; Chromium oxide; Monochromium trioxide; Chromium trioxide (CrO₃); Chromium Oxide (Chromic Anhydride);

สูตรโมเลกุล : CrO₃

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ของแข็ง	สี	: แดงเข้ม
กลิ่น	: ไม่มีกลิ่น	นน. โมเลกุล	: 99.99
จุดเดือด (°C) : 250		จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°C) : 197	
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1) : 2.7			
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1) : 3.4			
ความหนืด (mPa.sec) : -			
ความดันไอ (มม.ปรอท) : ต่ำมาก ที่ - °C			
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) : 63 ที่ - °C			
ความเป็นกรด-ด่าง(pH) : <-1 ที่ 20 °C			
จุดวาบไฟ(°C) : -		จุดติดไฟได้เอง(°C) : -	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- สิ่งแวดล้อมถูกทำลายเสียหาย เมื่อสารเคมีรั่วไหลสู่ดิน
- สารนี้จะถูกชะล้างลงสู่ลำน้ำใต้ดิน เมื่อสารเคมีรั่วไหลสู่ลำน้ำ
- สารนี้ไม่สามารถคาดได้ว่าจะระเหยได้ เมื่อสารเคมีรั่วไหลสู่อากาศ
- สารเคมีจะเคลื่อนย้ายไปสู่ชั้นบรรยากาศ

7. ชื่อเคมี IUPAC : Ammonia

ชื่อเคมีทั่วไป : Ammonia; Anhydrous

ชื่อห้องอื่นๆ : N-H; Ammonia, aqueous~Ammonia, solution; Ammonia

สูตรโมเลกุล : NH_3

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ก๊าซ	สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ฉุน	น. โมเลกุล	: 17.031
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	: -33.35	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง ($^{\circ}\text{C}$)	: -77.7
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 0.6819		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: 0.579		
ความหนืด (mPa.sec)	: -		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 5900 ที่ 20°C		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: ละลายน้ำได้ดีที่ $-^{\circ}\text{C}$		
ความเป็นกรด-ด่าง(pH)	: 11.6		
จุดวาบไฟ($^{\circ}\text{C}$)	: -	จุดลุกติดไฟได้เอง($^{\circ}\text{C}$)	: 651

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

8. ชื่อเคมี IUPAC : 1,2-Ethylenediamine

ชื่อเคมีทั่วไป : Ethylenediamine

ชื่อห้องอื่นๆ : 1,2-Ethanediamine; 1,2-Diaminoethane; Dimethylenediamine; EDA; EN; Ethane-1,2-diamine; Betaaminoethylamine; Diaminoethane; Ethanediamine; Ethylene diamine ; Ethylene Diamine

สูตรโมเลกุล : $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ของเหลว	สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: คล้ายแอมโมเนีย	นน. โมเลกุล	: 60.10
จุดเดือด (°C)	: 117	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง (°C)	: 8.5
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 0.897		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: 2.07		
ความหนืด (mPa.sec)	: -		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 10.7 ที่ 20 °C		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: ละลายน้ำได้ดี		- °C
ความเป็นกรด-ด่าง(pH)	: -		
จุดวาบไฟ(°C)	: 34	จุดลุกติดไฟได้เอง (°C)	: 385

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

9. ชื่อเคมี IUPAC: 1,2-Benzenediol; 1,2-Dihydroxybenzene

ชื่อเคมีทั่วไป : Catechol; O-Benzenediol

ชื่อพ้องอื่น ๆ : Pyrocatechin; Benzcatechin; Catechol-pyrocatechol; 1,2-Dihydroxybenzene

(Catechol) 3346 NJRTK NO

สูตรโมเลกุล : $C_6H_6O_2$

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ของแข็ง,ผลึก	สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ชุน	นน. โมเลกุล	: 110.12
จุดเดือด (°C)	: 245	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง (°C)	: 104
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 1.371		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: 3.8		
ความหนืด (mPa.sec)	: -		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 1 ที่ 75 °C		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: 45 ที่ 20 °C		
ความเป็นกรด-ด่าง(pH)	: -		
จุดวาบไฟ(°C)	: 127	จุดลุกติดไฟได้เอง(°C)	: 510

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

10. ชื่อเคมี IUPAC: Potassium hydroxide

ชื่อเคมีทั่วไป :-

ชื่อท้องถิ่นอื่น ๆ : Potassium hydrate; Caustic potash; Lye; Potassa; Caustic potash, liquid

สูตรโมเลกุล : KOH

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ผงของแข็ง	สี	: ขาว
กลิ่น	: ไม่มีกลิ่น	นน. โมเลกุล	: 56.1
จุดเดือด (°C)	: 1324	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง (°C)	: 361
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 2.044		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: -		
ความหนืด (mPa.sec)	: -		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 1 ที่ 20°C		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: 110 ละลายน้ำได้ที่ 25 °C		
ความเป็นกรด-ด่าง(pH)	: 13.5 ที่ 20°C		
จุดวาบไฟ(°C) :-		จุดลุกติดไฟได้เอง(°C) :-	

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- สารนี้อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ควรให้ความสนใจเป็นพิเศษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ DI
- สารนี้จะส่งผลที่เป็นอันตราย เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงพีเอช มีฤทธิ์กัดกร่อนแม่ในสภาพที่เจือจาง
- เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ DI LC50 : 10 mg/l/96 hr.

11. ชื่อเคมี IUPAC: TMAH

12. ชื่อเคมี IUPAC: Trichloroethene

ชื่อเคมีทั่วไป : Trichloroethylene; Ethinyl trichloride; Acetylene trichloride; Ethylene trichloride; Triclene; 1,1,2-Trichloroethylene; Tri; TCE; Tri-Clene; Trielene; Trilene; Trichloran;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Trichloren; Algylen; Trimar; Triline; Trethylene; Westrosol; Chlorylen; Gemalgene; Germalgene; 1,1,2-Trichloroethene; 1-Chloro-2,2-dichloroethylene; 1,1-Dichloro-2-chloroethylene; ชื่อพ้องอื่น ๆ : 1,2,2-Trichloroethylene; Anamenth; Benzinol; Blacosolv; Blancosolv; Cecolene; Chlorilen; Chlorylea; Chorylen; Circosolv; Crawhaspol; Densinfluat; Dow-tri; Dukeron; Fleck-flip; Flock flip; Fluate; Lanadin; Lethurin; Narcogen; Narkogen; Narkosoid; Nialk; Perm-a-chlor; Perm-a-clor; Petzinol; Philex; Threthylene; Triad; Trial; Triasol; Triklone; Triol; Tri-plus; Tri-plus m; Vestrol; Vitran; Trieline

สูตรโมเลกุล : C_2HCl_3

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ของเหลว	สี	: ใส ไม่มีสี
กลิ่น	: คล้ายอีเธอร์	นน. โมเลกุล	: 131.39
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	: 87.2	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง ($^{\circ}C$)	: 86.4
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 1.476		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: 4.54		
ความหนืด (mPa.sec)	: 0.55		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 60 ที่ $20^{\circ}C$		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: 0.1 ที่ $25^{\circ}C$		
ความเป็นกรด-ด่าง(pH) :	-		
จุดวาบไฟ($^{\circ}C$)	: -20	จุดลุกติดไฟได้เอง($^{\circ}C$)	: 410

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ DI
- อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำ

13. ชื่อเคมี IUPAC: 2-Propanone

ชื่อเคมีทั่วไป : Acetone; Dimethyl ketone

ชื่อพ้องอื่น ๆ : Methyl ketone; Ketone propane; Dimethyl formaldehyde; Beta-ketopropane; Pyroacetic ether; Propanone; Dimethylketal; Pyroacetic acid; Chevron acetone

สูตรโมเลกุล : C_3H_6O

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะ	: ของเหลว	สี	: ใส ไม่มีสี
กลิ่น	: คล้ายมินท์	นน. โมเลกุล	: 58.08
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	: 56.5	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง ($^{\circ}\text{C}$)	: -95
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 0.79		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: -		
ความหนืด (mPa.sec)	: 0.32		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 400 ที่ 39.5°C		
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)	: ละลายน้ำได้ที่ 20°C		
ความเป็นกรด-ด่าง(pH) :			
จุดวาบไฟ($^{\circ}\text{C}$) :	-20	จุดติดไฟได้เอง($^{\circ}\text{C}$) :	465

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ข้อมูลทางนิเวศวิทยา : สิ่งแวดล้อมถูกทำลายเสียหายเมื่อรั่วไหลสู่ดิน
- สารนี้คาดว่าจะสลายตัวทางชีววิทยาได้ง่ายเมื่อรั่วไหลสู่ดิน
- สารนี้คาดว่าจะถูกชะล้างลงสู่ น้ำใต้ดิน เมื่อรั่วไหลสู่ดิน
- สารนี้คาดว่าจะมีการระเหยอย่างรวดเร็ว เมื่อรั่วไหลสู่ น้ำ
- สารนี้คาดว่าจะสลายตัวทางชีววิทยาได้ง่ายเมื่อรั่วไหลสู่ น้ำ
- สารนี้คาดว่าจะมีการระเหยอย่างรวดเร็ว
- สารนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ค่า Log ของออกทานอลกับน้ำน้อยกว่า 3.0
- สารนี้ไม่สามารถคาดได้ว่า จะสะสมสิ่งมีชีวิตได้ เมื่อรั่วไหลสู่อากาศ
- สารนี้จะสลายตัวได้ปานกลางโดยทำปฏิกิริยากับสาร ไฮดรอกซิล เรดิคัล ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีกับแสง เมื่อรั่วไหลสู่อากาศ
- สารนี้จะสลายตัวโดยการสังเคราะห์แสงได้ปานกลางเมื่อรั่วไหลสู่อากาศ
- สารนี้คาดว่าจะสามารถเอาออกจากบรรยากาศได้ง่ายโดยทำให้เกิดการตกตะกอนแบบเปียก
- ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
- สารนี้ไม่สามารถคาดได้ว่า จะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ DI
- ค่าความเข้มข้นที่ทำให้ปลาตายกว่าร้อยละ 50 LC50 ภายใน 96 ชั่วโมงมีค่ามากกว่า 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร

14. ชื่อเคมี IUPAC : Nitric acid

ชื่อเคมีทั่วไป :-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อห้องอื่น ๆ : Hydrogen nitrate; Azotic acid; Rfna; Aqua fortis; Fuming nitric acid; Red fuming nitric acid; Nital; Nitryl Hydroxide; Nitric acid red fuming; Nitric acid, other than red fuming;

สูตรโมเลกุล : HNO_3

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: สารละลาย	สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ชุน	นน. โมเลกุล	: 63.01
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	: 83	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง ($^{\circ}\text{C}$)	: -42
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 1.5		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: 2.2		
ความหนืด (mPa.sec)	: -		
ความดันไอ (มม.ปรอท)	: 4.3 ที่ 20°C		
ความสามารถในการละลายน้ำที่ (กรัม/100 มล.)	: $-^{\circ}\text{C}$		
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	: $-^{\circ}\text{C}$		
จุดวาบไฟ ($^{\circ}\text{C}$)	: -	จุดลุกติดไฟได้เอง ($^{\circ}\text{C}$)	: -

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

15. ชื่อเคมี IUPAC : Hydrochloric acid

ชื่อเคมีทั่วไป : Hydrochloride

ชื่อห้องอื่น ๆ : Muriatic acid; Chlorohydric acid; Spirits of salts; Hydrogen chloride (acid); Hydrogen chloride; Hydrogen Chloride Gas only

สูตรโมเลกุล : HCl

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	: ของเหลว, ก๊าซ	สี	: ไม่มีสี
กลิ่น	: ชุน	นน. โมเลกุล	: 36.46
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	: 53	จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง ($^{\circ}\text{C}$)	: -745555
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ = 1)	: 1.18		
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	: 1.3		
ความหนืด (mPa.sec)	: 0.0148		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันไอ (มม.ปรอท) : 190 ที่ 25 °C

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) : ละลายได้ ที่ - °C

ความเป็นกรด-ด่าง(pH) : ที่ - °C

จุดวาบไฟ(°C) :-

จุดติดไฟได้เอง(°C) :-

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- เมื่อรั่วไหลลงสู่ดินคาดว่าสารนี้จะไม่เกิดการสลายตัวทางชีวภาพ และสารนี้อาจดูดซับซึมเข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้
- สารนี้จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ DI จะเกิดอันตรายจากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช
- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ (Uses), อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect), ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction), การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion), การเก็บรักษา / สถานที่เก็บ / เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling), การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill) และการปฐมพยาบาล (First Aid) สามารถหาข้อมูลได้ทางเว็บไซต์



กรมควบคุมมลพิษ

<http://www.pcd.go.th>

ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ • Chemical Data Bank

<http://msds.pcd.go.th/index.asp>

การปฏิบัติกรณีฉุกเฉิน (Emergency Response)

- กรณีฉุกเฉิน โปรดใช้บริการระบบให้บริการข้อมูลการระงับอุบัติเหตุจากสารเคมีทางโทรศัพท์หรือสายด่วน AVERS ที่หมายเลขโทรศัพท์ 1650
- ต้องการทราบรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดติดต่อ กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ โทร. 0-2298-2447 ,0-2298-2457

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

ผลงานการตีพิมพ์

The EECON-30 Conference Joins the Eightieth Birthday Anniversary
Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

30th Electrical Engineering Conference
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทความที่นำเสนอนในการประชุม เล่ม 1

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

Volume I

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
KING MONKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

โดย
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์วิว รัชสอร์ท กาญจนบุรี
25 - 26 ตุลาคม 2550

Seagate ABB NECTEC TOT

FACULTY OF ENGINEERING
KMUTT
EECON - 30

เอกสาร

การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจวัดอุลตราไวโอเล็ตด้วยขอตักไดโอดชนิดฟิล์มเพชร UV Detectors using Schottky Photodiode on Diamond Film

ศราวุธ เจ๊ะซัน ดักโทษ ไทโยคิน เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล สมศักดิ์ เขียวศิริกุล
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนลาดพร้าว เขตคลองจั่น กรุงเทพมหานคร 10520
โทรศัพท์ 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิกอนระนาบ (100) ได้ใช้กระบวนการ MPCVD โดยใส่ B_2O_3 เป็นสารสารกัมมันตรังสีไอออนของฟิล์มเพชรที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน ที่ค่าต่างๆในสารละลายเอทานอล ทำการสร้างขอตักที่โพลีไดโอดบนโพลีเอทานอลของฟิล์มเพชรชนิดที่ และชนิดอินทรินซิกโดยโครงสร้างนี้ให้พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้งเพื่อให้เกิดผลของเกรนผลึก สำหรับการทดลองการตอบสนองของขอตักโพลีไดโอดในช่วง 190-800 nm อุปกรณ์ตอบสนองได้ดีที่ความยาวคลื่นแสง UV และตอบสนองต่ำมากที่ความยาวคลื่นแสงช่วงที่ตามองเห็น ผลของความเข้มข้นของสารเจือและความหนาของชั้นฟิล์มที่มีต่อความเร็วในการตอบสนองพบว่าอุปกรณ์ขอตักโพลีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกจะมีช่วงเวลาขึ้น 14 μ s และช่วงเวลาที่ลง 250 μ s และเมื่อลดความหนาฟิล์มเพชรลงเหลือ 6 μ m ช่วงเวลาขึ้นจะลดลงประมาณ 220 เท่า และช่วงเวลาที่ลงจะลดลงประมาณ 64 เท่า และการลดความหนาขึ้นและขาลงสามารถทำการหุ้มแรงดันไบอัสหรือลดพื้นที่ระหว่างรอยต่อก็ได้เช่นกัน

คำสำคัญ: ฟิล์มเพชร, กระบวนการสร้าง, อัลตราไวโอเล็ตเซ็นเซอร์

ABSTRACT

Boron doped diamond film was synthesized on (100) silicon substrate by MPCVD (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition) process. The doped boron to carbon ratio (B/C) was varied by mixing B_2O_3 with ethanol at different quantities. The Schottky structure was fabricated on free-standing p-type diamond film and also on intrinsic one with the structure that allowed carriers to move in the vertical direction to reduce the effect of grain boundaries. The spectral response was then investigated for

the light wavelength in the range of 190 nm to 800 nm. The results showed that the device had good response to UV light and very low response to visible light. The results of dope concentration and film thickness on the time response were also investigated. It was shown that the diode with intrinsic film had 14 μ s rise time and 250 μ s fall time. When the thickness of a 10PPM B/C doped film was reduced to 6 μ m, the rise time and fall time were reduced to approximately 220 times and 64 times respectively. These responding times could also be reduced by increasing the bias voltage or by reducing the junction area.

Keywords: Diamond-film fabrication, Schottky photodiode, UV sensor

1. คำนำ

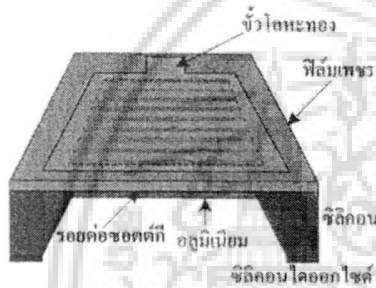
ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าฟิล์มเพชรเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติที่คล้ายปรอท เช่น คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติของไฟฟ้า [1] คุณสมบัติเช่นนี้ ทำให้นักวิจัยมีความต้องการที่จะพัฒนาฟิล์มเพชรนี้ได้จากวิธีการสังเคราะห์ด้วยเทคนิค CVD ที่มีพื้นที่ฟิล์มเพชรขนาดใหญ่ ดังนั้นการวิจัยเหล่านี้ทำให้เกิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรหลายอย่างด้วยกัน เช่น อุปกรณ์ตรวจจับรังสี และจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีช่องว่างพลังงานมาก 5.5 eV ทำให้ได้รับความสนใจพิเศษ สำหรับการพัฒนาวัสดุที่มีเป็นโพลีไดโอดที่ช่วงความยาวคลื่นแสงสั้น [2] ในเวลาต่อมาโพลีไดโอดชนิดที่ p และโพลีไดโอดได้ถูกสร้างเป็นอุปกรณ์โดยใช้ฟิล์มเพชร ซึ่งอุปกรณ์นี้ให้พาหะที่เกิดจากแสงเมื่อผ่านผลึกที่มีขอบเกรน จะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงเปลี่ยนแปลง [3,4] ดังนั้นในบทความนี้ จึงได้นำเสนอการสร้างขอตักโพลีไดโอดบนฟิล์มเพชร ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์ในแนวตั้ง และในโครงสร้างนี้แสงถูกดูดกลืนในบริเวณชั้นปลอดเขตพาหะโดยตรงซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของเกรนผลึก ซึ่งทำให้ผลของประจุพาหะโมบิลิตี้เคลื่อนที่ผ่านขอบเขตเกรนผลึก

การประชุมวิชาการทวิวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. กระบวนการสร้างและการทดลอง

ฟิล์มเพชรถูกสังเคราะห์บนฐานรองซิลิกอนด้วยวิธีการ PECVD ซึ่งใช้แหล่งจ่ายเป็นไอระเหยของเมทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก และผสมด้วยสารละลายโบรอนไดรอกไซด์ (B₂O₃) สำหรับสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็กทรีนซิกในอัตราส่วน (B/C) 10 PPM, 100 PPM, 1,000 PPM [5, 6] ก่อนที่จะมีการสร้างอุปกรณ์ คือ ทำความสะอาดผิวฟิล์มเพชรโดยการกัดด้วยสารละลายอิมิตัวของโครเมียมไดรอกไซด์ (CrO₃) ในกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ที่อุณหภูมิ 170°C เพื่อกำจัดกรากไฟที่ผิวหน้า หลังจากนั้นต้มในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH₄OH) ในอัตราส่วน 1 : 1 แล้วล้างด้วยน้ำ DI [7]

สำหรับการสร้างขอตักที่โฟโตไดโอดบนโลหะแผ่นฟิล์มเพชร โดยการกัดฐานรองซิลิกอนด้วยสารละลาย EPD [8] ความหนาของฟิล์มเพชร 9 μm มีพื้นที่ 4 mm² และใช้เทคนิคกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีในการสร้างเรอบสัมผัส โดยใช้ทองคำที่มีรอยต่อเอมิสส์ และรูโลหะอิมูเนียมเป็นรอยต่อขอตัก รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างตัวอุปกรณ์



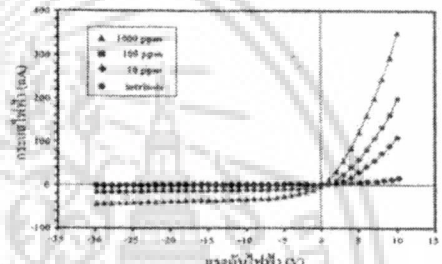
รูปที่ 1 โครงสร้างสร้างขอตักที่โฟโตไดโอดฟิล์มเพชร

ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มเพชรที่เป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ ประกอบด้วยผลึกหลายๆ ผลึกเรียงต่อกันและมีเส้นขอบเขตเกรนของผลึกจำนวนมาก ซึ่งมีต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์ โครงสร้างตัวอุปกรณ์โฟโตไดโอดรูปที่ 1 เมื่อให้ไบแอสย้อนกลับที่รอยต่อทำให้เกิดบริเวณของคพาเซ ซึ่งบริเวณนี้มีความสำคัญมากในการวัดแสงทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โดยประจุพาเซทั้งสองจะถูกปิดไปยังขั้วโลหะด้วยแสงด้วยความต่างศักย์ภายในบริเวณรอยต่อ ดังนั้นอุปกรณ์ทางแสงและแวนอนที่สร้างบนฟิล์มเพชรจะประสบกับปัญหาของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสง ต้องเดินทางผ่านขอบเขตเกรนของผลึกทำให้เกิดการลดลงของปริมาณประจุพาเซ ดังนั้นจึงออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบขอตักที่ไดโอดที่อุปกรณ์ทำงานในแนวตั้ง ซึ่งเป็นทิศทางขนานกับขอบเขตเกรนของผลึก ทำให้สามารถลดอิทธิพลของขอบเขตเกรนของผลึกที่มีต่อทิศทางกรโหลของกระแสไฟฟ้าได้

3. ผลของการทดลอง

3.1 การศึกษาคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของขอตักที่ไดโอด

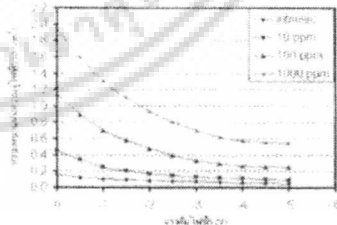
นำอุปกรณ์ขอตักที่โฟโตไดโอดที่สร้างบนฟิล์มเพชร ที่มีการเติมปริมาณอะตอมสารเจือต่างกันได้ 10 PPM, 100 PPM, 1000 PPM และอินทรีนซิก มาศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า [I] และแรงดันไฟฟ้า (V) ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ ถึง -30 โวลต์ ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 2 พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลย้อนกลับของไดโอด จะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณอะตอมสารเจือเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคิฟิฟิวชัน ผลการทดลองที่แรงดันย้อนกลับ -15 โวลต์อุปกรณ์ชนิดอินทรีนซิกมีค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับในปริมาณค่าสุด คือประมาณ 0.115 nA ในขณะที่ฟิล์มเพชรชนิด 1000 PPM มีค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับสูงสุด คือประมาณ 41 nA นอกจากนี้ผลการทดลองเมื่อทำการไบอัสอุปกรณ์ด้วยแรงดันไปหน้าพบว่าอุปกรณ์ที่มีการเติมอะตอมสารเจือในปริมาณน้อยจะมีความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของขอตักที่โฟโตไดโอดที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดต่างๆ

3.2 การศึกษาคุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อขอตักที่โฟโตไดโอด

นำอุปกรณ์ขอตักที่โฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่างๆ ที่ 10 PPM, 100 PPM, 1000 PPM และอินทรีนซิก มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อกับค่าแรงดันไบแอส โดยพื้นที่ของรอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.09 ตารางเซนติเมตร และไบแอสย้อนกลับแรงดัน 0 ถึง -5 โวลต์ ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 3



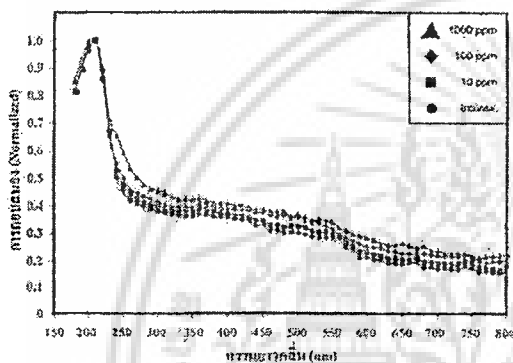
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของขอตักที่โฟโตไดโอดที่สร้างบนฟิล์มเพชรชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าปริมาณความจุไฟฟ้าที่อินทรีนซิก มีค่าต่ำสุด คือ 0.07 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ และในขณะที่ ดูปเปอร์ชนิด 10 PPM, 100 PPM และ 1000 PPM มีค่าความจุไฟฟ้า 0.1 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, 0.24 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ และ 0.54 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าในเชิงปริมาณ ปริมาณของอะตอมสารเจือ เมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือมากขึ้น จะทำให้ความกว้างบริเวณเปลวคาประจุพาหะบริเวณรอยต่อลดลงซึ่งเป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้น

3.3 การตอบสนองของสเปกตรัมแสงของซอคลิกโฟโตไดโอด

อุปกรณ์ซอคลิกโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือค่าต่างๆ ถูกนำมาฉายแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ โดยโมดของอินทรีนซิก -5 โวลต์ ให้แก่อุปกรณ์ เพื่อศึกษาการตอบสนองการตอบสนองต่อแสงของอุปกรณ์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4



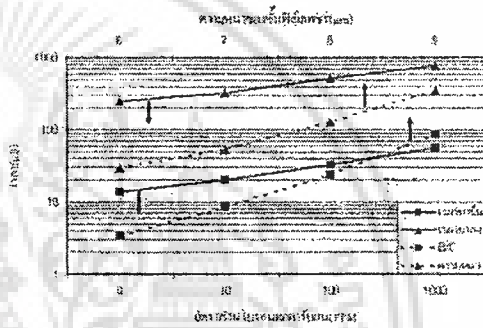
รูปที่ 4 สเปกตรัมการตอบสนองของแสงของอุปกรณ์ซอคลิกโฟโตไดโอด

จากกราฟสเปกตรัมการตอบสนองของแสงของอุปกรณ์ พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือในรอนต่างกันจะให้การตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ได้ดีเหมือนกัน คือมีการตอบสนองที่ดีในช่วงแสง UV ความยาวคลื่นสั้น และให้การตอบสนองที่ต่ำกับแสงช่วงความยาวคลื่นยาว และกราฟสเปกตรัมที่จุดที่เพิ่มขึ้นของการตอบสนองอย่างรวดเร็ว โดยสังเกตจากความหนาแน่นกราฟที่บริเวณความยาวคลื่น 230 nm ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มเพชร (225 nm) ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าแสงของซอคลิกโฟโตไดโอดส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อประจุพาหะจะขึ้นที่รอยต่อที่เกิดในเนื้อสารกึ่งตัวนำ

ดังนั้นผลของการเพิ่มปริมาณอะตอมสารเจือที่ป้อนสเปกตรัมการตอบสนองจึงมีไม่มากนัก เนื่องจากการดูปเปอร์ไปวัดแสงเฉพาะความถี่ย่าน UVC ควรเลือกใช้ดูปเปอร์แบบซอคลิกโฟโตไดโอดจะมีประสิทธิภาพดีกว่าเนื่องจากจะมีสัญญาณรบกวนจากแสงมองเห็นต่ำ

3.4 ผลของความสัมพันธ์ของอะตอมสารเจือและความหนาของชั้นฟิล์มที่มีต่อเวลาในการตอบสนอง

นำอุปกรณ์ซอคลิกโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือค่าต่างๆ และอินทรีนซิก มาฉายด้วยแสงและวัดด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงกระแสแสงที่เกิดขึ้นกับเวลา โดยโมดของอินทรีนซิก -5 โวลต์ ให้แก่อุปกรณ์ ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5 พบว่าอุปกรณ์ซอคลิกโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกจะมีช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงต่ำสุด คือ 14 μs และ 250 μs ตามลำดับ ในขณะที่ ดูปเปอร์ชนิด 1000 PPM จะมีช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงมากกว่า 56 μs และ 780 μs ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นอะตอมสารเจือในรอนในฟิล์มเพชรจะทำให้ซอคลิกโฟโตไดโอดความเร็วในการตอบสนองช้าลง เนื่องจากการที่ปริมาณอะตอมสารเจือจะทำให้ความกว้างของชั้นเปลวคาประจุพาหะลดลงซึ่งมีผลให้ความจุไฟฟ้ารอยต่อเพิ่มขึ้นและยังเป็นการเพิ่มชั้นฟิล์มเพชรบนบริเวณเขตเปลวคาประจุพาหะขึ้นทำให้หาหะบริเวณนี้มีเวลาเพิ่มขึ้นมากขึ้น



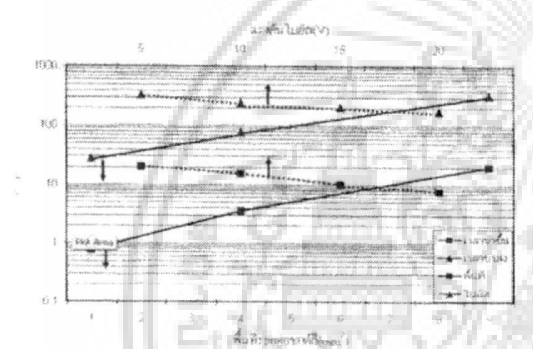
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงกับอัตราส่วนอินทรีนซิก

และในขณะที่เดียวกันเมื่อนำอุปกรณ์ซอคลิกโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ 10 PPM และได้ใช้ฟิล์มเพชรความหนาขนาด 9, 8, 7 และ 6 μm โดยการลดความหนาของชั้นฟิล์มด้านล่างด้วยวิธีการกัดในหลายสภาวะไมโครเวฟ จะเห็นชัดโดยแสงแบบฟอสส์แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของตัวสั่นตามกับเวลา โดยโมดของอินทรีนซิก -5 โวลต์ ให้แก่อุปกรณ์ ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5 พบว่าเมื่อลดความหนาของฟิล์มเพชรลงจาก 9 μm เหลือ 6 μm ช่วงเวลาขาขึ้นจาก 170 μs เป็น 0.75 μs และเวลาขาลงจะลดลงจาก 1800 μs เป็น 28 μs เนื่องจากความหนาของฟิล์มเพชรที่ลดลงจะทำให้สัญญาณรบกวนบนเขตแทรกในแนวตั้งและชั้นความหนาที่ฟิล์มเพชรนอกเขตเปลวคาประจุพาหะมีความหนาที่น้อยลงดังนั้นค่าเวลาแปรผันจึงลดลงและมีปริมาณแสงถูกดูดกลืนในบริเวณเปลวคาประจุพาหะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีแสงสามารถทะลุผ่านสู่ชั้นเปลวคาประจุพาหะได้มากขึ้นทำให้กระแสแสงเพิ่มปริมาณที่สูงขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่รอยต่อและแรงดันไบอัสย้อนกลับของอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดที่มีผลต่อความเร็วในการตอบสนอง

นำอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นที่มีพื้นที่รอยต่อขนาด 1.4 และ 9 ตารางมิลลิเมตร และฉายแสงแบบพัลส์ โดยไบอัสย้อนกลับแรงดัน -5 โวลต์ให้แก่อุปกรณ์ ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 6 พบว่าเมื่อลดขนาดพื้นที่ลงจาก 9 mm² เป็น 1 mm² จะมีช่วงเวลาขึ้นจะลดลงเป็น 3 μs และเวลาขาลงจะลดลงเป็น 120 μs และแบนวิดท์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากแพ็คเกจรีที่มีส่วนในการกำหนดความเร็วของตัวอุปกรณ์ก็ต่อเวลาซึ่งจะขึ้นอยู่กับการประจุและการคายประจุผ่านพื้นที่รอยต่อชอตต์กี ดังนั้นพื้นที่รอยต่อที่ลดลงจะทำให้เวลาในการตอบสนองเร็วขึ้น และการลดพื้นที่รอยต่อก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อลดลง ($C \propto \frac{A}{W}$) อุปกรณ์จึงมีความเร็วในการตอบสนองดีขึ้น และแบนวิดท์จะลดลงเหลือ 12.3 kHz ต่อการเพิ่มพื้นที่ 1 mm²



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขึ้น เวลาขาลง กับขนาดพื้นที่รอยต่อและแรงดันไบอัส

จากนั้นได้นำอุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดไบอัสย้อนกลับแรงดัน -5, -10, -15 และ -20 โวลต์ ให้แก่อุปกรณ์ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับจาก -5 ถึง -20 โวลต์ ช่วงเวลาขึ้นจะลดลง 12.5 μs และเวลาขาลงจะลดลงเป็น 50 μs เนื่องจากการเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับจะทำให้ทำให้เวลาการตอบสนองเร็วขึ้น คือบริเวณเขตปลอดพาหะกว้างขึ้นและมีสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้เวลาที่พาหะประจุไหลลดลง เนื่องจากประจุพาหะที่เคลื่อนที่ไปบริเวณปลอดพาหะจะเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไบอัส

4. บทสรุป

อุปกรณ์ชอตต์กีโฟโตไดโอดฟิล์มเพชรที่พัฒนาขึ้น มีความไวสูงมากกับการตรวจวัดแสง UV และมีการตอบสนองที่ช้ากว่าความยาว

คลื่นแสงที่ตามองเห็น และเมื่ออุปกรณ์นี้มีการติดอะตอมสารเจือปนอินทรีย์ตรงส่วน B : C ค่าสูง ๆ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูง แต่กระแสไฟฟ้าที่แสงมีค่าลดลง และที่อัตราส่วน B : C ค่าต่ำ ๆ จะทำให้ได้ค่าประจุไฟฟ้า (C) ที่ระหว่างรอยต่อมีค่าน้อยทำให้การตอบสนองเร็วขึ้น สำหรับการลดความหนาฟิล์มเพชร จะให้การตอบสนองเร็วขึ้น และเมื่อพื้นที่รอยต่อที่น้อยแรงดันค่าสูง ๆ ก็จะทำให้การตอบสนองเร็วขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติที่ให้การสนับสนุนเงินทุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] J.E. Field, The properties of diamonds, Academic Press, London, 1979.
 [2] D.R. Kania, M.J. Landstrass, M.A. Plano, L.S. Pan, S. Han, Diamond radiation detectors, Diamond Relat. Mater 2(1993) 1012-1019.
 [3] S.S. Chan, R.D. McKeag, M.D. Whitfield, R.B. Jackman, UV photo detectors from thin film diamond, Phys. Stat. Sol. (a) 154 (1996) 445-454, January.
 [4] R.D. McKeag, M.D. Whitfield, S.Sm Chan, L. Ys Pang, R.B. Jackman, A high performance UV Photodetector from thin film diamond, Mater. Res. Soc. 416(1996)19-424.
 [5] L. Thuyotin, F. Ratanaudompisut, T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech, UV Photodetector from Schottky diode diamond film, Diamond Relat. Mater 11(2002)442-445.
 [6] W. Ebert, A. Vescan, T.H. Borst, E. Kohn, High current p/p+ diamond schottky diode, IEEE Electron Device Lett. 15 (2) (1994) 289-291, August.
 [7] S.A. Grot, G.Sb. Gildenblat, C.W. Hatfield, C.R. Wronski, A.R. Badzian, R.Messier, The effect of surface treatment on the electrical properties of metal contacts to boron doped homoepitaxial diamond film, IEEE Electron Device Lett. 11 (2) (1990) 100-102, February.
 [8] K.E. Bean, Anisotropic etching of silicon, IEEE Trans. Electron Device 25 (1978) 100-102, February.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ศราวุธ เจ๊ะเซ็น,ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม สกล ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สกล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

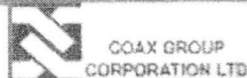
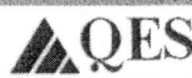
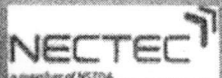
Abstract Book

International Conference on Smart Materials
Smart/Intelligent Materials and Nanotechnology
and
2nd International Workshop on
Functional Materials and Nanomaterials

Smartmat-'08
& IWOFM-2

22-25 April 2008
Chiang Mai, Thailand

Supported by



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photoconductor Diamond film Detector

S. Jesen, L. Thaiyotin, S. Cheirsirikul, T. Phetchakul

Electronics Research Center, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Rd., Ladkrabang,
Bangkok, 10520 Thailand

Abstract—Diamond film was synthesized on a silicon substrate by MPCVD (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition) process and used to fabricate a photoconductor for the detection of UV light. The photoconductor was fabricated on free standing diamond film and operation in a planar. This paper presents the spectral response of photoconductor, concentration of boron doping, times and temperature. The device shows good response to UV light and a very low response to visible light. Furthermore, the device reveals little change in spectral response with increasing temperature at all wavelengths.

Index Terms—Photoconductor, UV sensor, Diamond film fabrication

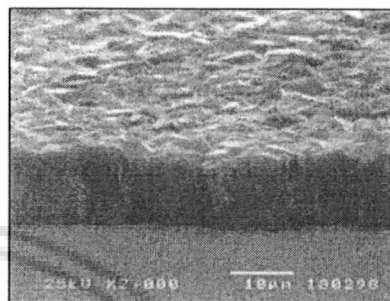


Fig. 1 SEM photograph of diamond film.

I. INTRODUCTION

Nowadays diamond film is well known as a semiconductor material having good physical, optical and electrical properties [1]. These properties have attracted researchers to develop diamond film synthesis by using CVD technologies to achieve growth of diamond films over relatively large areas. Among the electronic applications of such material is its use as a practical detector. A conspicuous property of special interest is the large band gap energy (5.5 eV, 225 nm) of diamond film, making it a suitable material for photodetection of short wavelength light [2]. This paper presents a photoconductor fabricated on free-standing diamond film, which operates in a planar direction.

II. METHOD

Diamond film was synthesized on silicon substrate by MPCVD (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition) process. C₂H₅OH mixed with B₂O₃ in a ratio B/C 10ppm, 100ppm, 1,000ppm was used as a liquid source [3, 4]. Before device fabrication, the diamond film was etched in a saturated solution of CrO₃ in H₂SO₄ at 170 °C and then rinsed with a 1:1 boiling solution of H₂O₂ and NH₄OH to eliminate surface graphitic material [5].

A SEM photograph of the diamond film is shown in Fig. 1 and a Raman analysis of the diamond film shown in Fig. 2 reveals no other structure than a sharp peak at 1332 cm⁻¹.

The thickness of the diamond film is 8 μm, device area is 3.99 mm². Photoconductor, size = 3 mm * 3 mm, w = 20 μm, l = 20 μm. Gold was used as an ohmic contact by photolithography. Fig. 3 shows the device structure.

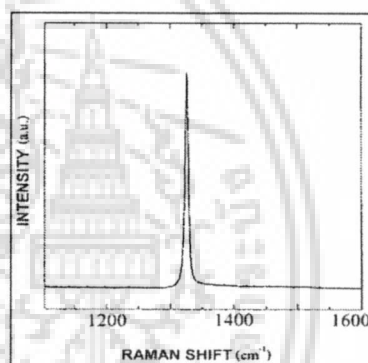


Fig. 2 Raman spectrum of diamond film.

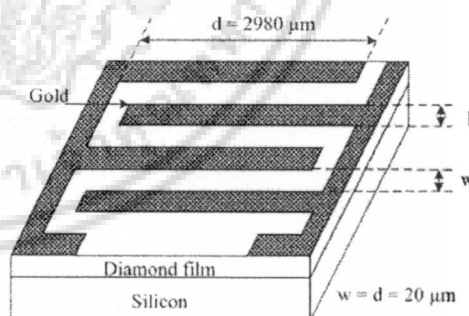


Fig. 3 photoconductor structure.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

A. Spectral response of photoconductor.

The spectral response of the photoconductor (intrinsic) was investigated for wavelengths from 180 to 800 nm using a deuterium light source. Fig. 4 shows the spectral response of a photoconductor device.

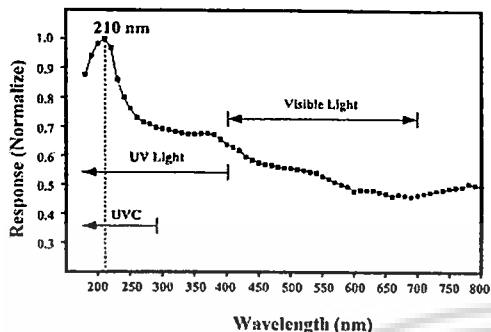


Fig. 4 Spectral response of photoconductor (intrinsic).

Fig. 4 reveals the high response of photoconductor to UV light in contrast to the low response to visible light. The sharp edge response at wavelengths more than 210 nm corresponds to the band gap energy of diamond (5.5 eV, 225 nm). Such photoconductor are suitable detectors for UVC.

B. Spectral response of photoconductor with concentration of boron doping.

The concentration of boron doping was obtained by changing the ratio B/C as show in Fig. 5.

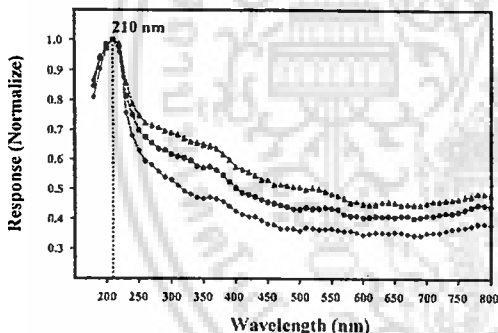


Fig. 5 Spectral response of photoconductor with boron doping concentration.

The result of increasing of boron doping concentration in diamond film, show the difference of spectral response between UV light and visible light. When the boron doping concentration is increased, the spectral response will be decreased.

The level of local state energy is near and above valance band because of boron doping. The will be able to generate the electron-hold well in short wave length. On the other hand, the photon energy will be low in long wave length and the electron-hold will be low also.

C. I-V characterization of photoconductor

I-V characterization with boron doping concentration was determined at wave length is 210 nm, light intensity is 0.8mW/cm² and voltage bias is 10 and 50 V as shown in Fig. 6. The effect of increasing voltage bias and boron doping concentration, the current is increased. Bias = 10V, photo current rise from 0.06 mA (intrinsic) to 4.6 mA (1000ppm), dark current rises from 0.01mA (intrinsic) to 0.6 mA (1000ppm) at room temperature. For Bias = 50 V are the same format and much more.

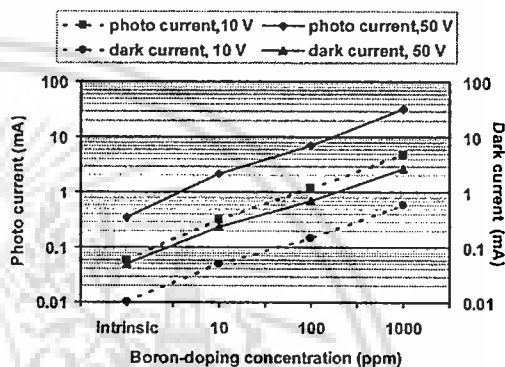


Fig. 6 I-V characterization with boron doping concentration

Since, carrier is generated from light, it is accelerated by electric field to contacts before recombination, it can increase current. For increasing of concentration dopant, the rate of carrier generation will be increased and it is also caused increase current.

D. The result of metal design

Photoconductor (Intrinsic), wave length is 210 nm, light intensity is 0.8 mW/cm² and voltage bias is 10 V and change distance between the contacts. The result shows in Fig. 7, found that the result of increasing distance between the contacts, the current is decreased. The ratio of photo current per addition of distance is 0.15µA/µm and dark current is 1µA/µm.

However, the value of current will increase or decrease by depend on amount of carrier move to the contacts. When the distance increase, amount of carrier moving to the contacts will be lower, because it has recombination before move to the contacts.

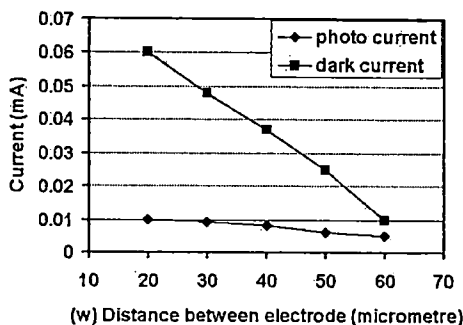


Fig. 7 Photo current and dark current of devices plotted against distance. (apply 10 V forward bias.)

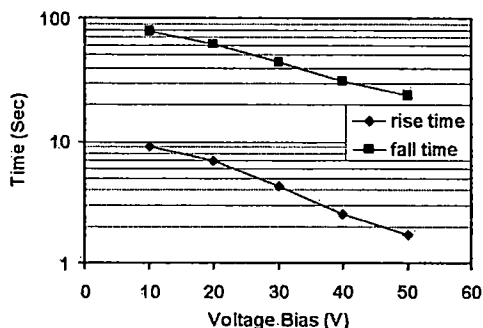


Fig. 9 The device's response time plotted against forward bias.

E. The time response of photoconductor vary by boron doping concentration

The response time of photoconductor was obtained by changing the boron doping concentration and changing the light intensity, wave length is 210 nm, light intensity is 0.8 mW/cm² and voltage bias is 20 V as shown in Fig. 8. The effect of increasing boron doping concentration, the time response is increased. The rise time is 7s (intrinsic), 30s (1000ppm), the fall time is 62s (intrinsic), 125s (1000ppm).

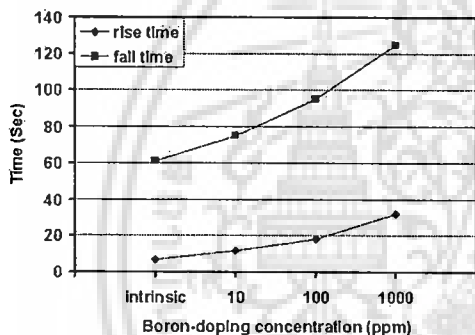


Fig. 8 The device's response time with boron doping concentration (apply 20 V forward bias.)

When the boron doping concentration is increased, carrier mobility will be decreased, the time of carrier move to contacts is long.

F. The response time of photoconductor vary by voltage bias

The response time of photoconductor (intrinsic) was obtained by changing the voltage bias, wave length is 210 nm, light intensity is 0.8 mW/cm² as shown in Fig. 9. When voltage bias is increase, the time response is decreased. The rise time is 0.18 s/V, the fall time is 1.35 s/V.

When the voltage bias is increase, the carrier is accelerated by electric field. The carrier will move to the contacts quickly and the response time will decrease.

G. The Stability of temperature

The Stability of photoconductor (intrinsic, 1000ppm) was obtained by changing the temperature and determined by platinum micro heater, wave length is 210 nm, light intensity is 0.8mW/cm² as shown in Fig. 10. When temperature is increased, the current will be decreased. The maximum change is in 100 to 200°C. The ratio of photo current per addition of temperature is 0.01 mA/°C (intrinsic), 0.8 mA/°C (1,000ppm) and dark current is 0.003 mA/°C (intrinsic), 0.24 mA/°C (1000ppm).

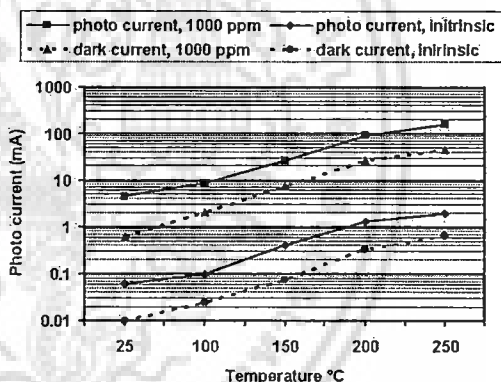


Fig. 10 Photo current and dark current of devices plotted against temperature.

For increasing of temperature, the rate of carrier generation will be increased, it cause increasing of current.

IV. CONCLUSION

The photoconductor was fabricated on free standing diamond film. Light absorption within the matter is expected to be the main mechanism for activating the devices. Therefore, the carriers generated in the matter are transported to both contacts. Measurement shows the device has good response to UV light and low response to visible light. The devices fabricated on diamond film having higher boron doping concentration show higher dark current, longer response time and increased sensitivity to temperature. For increasing of current make by reduce the distance between contacts, increase voltage bias and increase temperature. Moreover, increasing of voltage bias and reduce the distance between contacts, the time response will be decrease. We conclude that a photoconductor is suitable for the fabrication of UV light detectors. Finally, low concentration boron doping of the diamond film appropriate for the detection of low light intensities and when high temperatures occur.

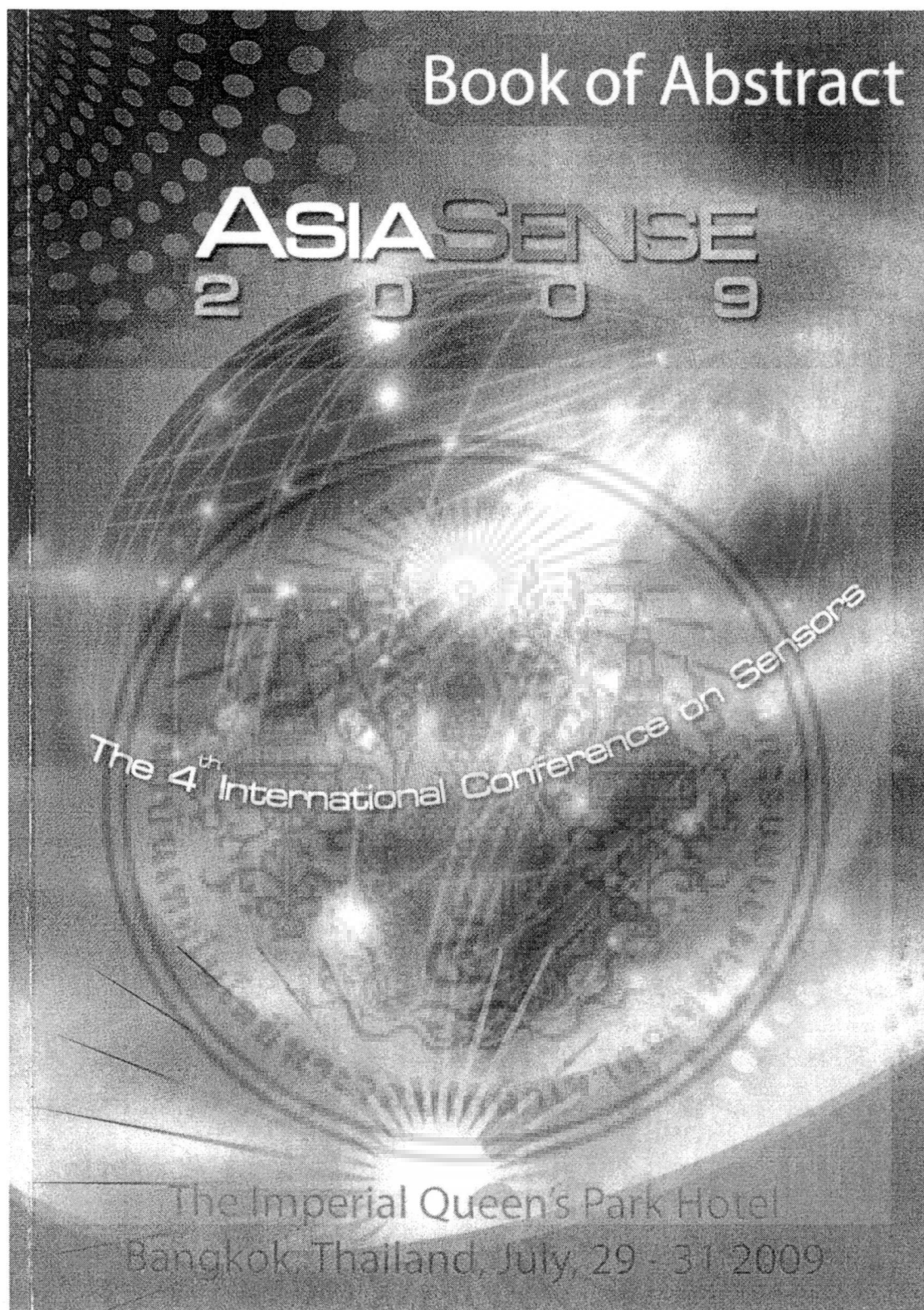
ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank Electronics Research Center, National Science and Technology Development Agency (NSTDA) and National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) support in research.

Finally, this work might not have been possible the Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST) support in Scholarship.

REFERENCES

- [1] J.E. Field, The properties of diamonds. Academic Press, London, 1979.
- [2] D.R. Kania, M.J. Landsrass, M.A. Plano, L.S. Pan, S. Han, Diamond radiation detectors, *Diamond Relat. Mater* 2 (1993) 1012-1019.
- [3] L.S. Pan. Diamond electronic properties and application, Kluwer Academic Publish, London, 1995.
- [4] W. Ebert, A. Vescan, T.H. Borsl, E. Kohn, High current p/p+ diamond schottky diode, *IEEE Electron Device Lett.* 15 (2) (1994) 289-291, August.
- [5] S.A. Grol, G.Sh. Gildenblat, C.W. Hatfield, C.R. Wronski, A.R. Badzian, T. Badzian, R. Messier, The effect of surface treatment on the electrical properties of metal contacts to boron doped homoepitaxial diamond film, *IEEE Electron Device Lett.* 11 (2) (1990) 100-102, February.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of Diamond Photodiode UV Detector

S. Jesen¹, C. huanun², S. Cheirsirikul¹

1. Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

2. Researcher of National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC),
National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Phahonyothin Rd,
Patumthanee, 12120 Thailand

Abstract

Development of diamond film semiconductor is mainly to develop the prototype of diamond film UV sensor. Boron doped diamond film was synthesized on (100) silicon substrate by MPCVD process. The doped boron to carbon ratio (B/C) was varied by mixing B₂O₃ with ethanol at different quantities. The Schottky Photodiode structure was fabricated on free-standing p-type and intrinsic diamond film diaphragm (active area 2mm²), with the structure that allowed carriers to move in the vertical direction to reduce the effect of grain boundaries. The Schottky Photodiode structure using Al as a Schottky contact and Au as an ohmic contact. The spectral response was investigated for the light wavelength, the shows good response to UV light and very low response to visible light, the best response at 210nm. For increasing of ratio of B/C, dark current increased but photo current decreased and response time decreased too. When the film thickness of intrinsic Schottky Photodiode was reduced from 9 to 6 μ m, 8.3times of photo current increased and 4.4times of dark current decreased, photo current is 350nA and dark current is 0.05nA and the rise time and fall time were reduced to approximately 168times and 50times respectively, the rise time is 0.25 μ s and the fall time is 12 μ s. These responding times could also be reduced by increasing the bias voltage or by reducing the junction area. For in the range of 25-200°C, the Schottky Photodiode diamond film intrinsic type is the minimum density current.

Keywords: Diamond-film fabrication, Schottky Photodiode, UV sensor

Introduction

Nowadays diamond film is well known as a semiconductor material which has good physical, optical and electrical properties [1]. These properties have attracted researchers to develop diamond film synthesis by using CVD technologies to achieve growth of diamond films over relatively large areas. Among the electronic applications of such material is its use as a practical detector. A conspicuous property of special interest is the large band gap energy (5.5eV, 225nm) of diamond film, making it a suitable material for photo detection of short wavelength light [2]. After that photoconductive and photodiode were fabricated by diamond film, the carrier generate from the light will change electric and light characteristic [3, 4].

This paper presents a Schottky Photodiode fabricated on free-standing diamond film, which operates in a vertical direction. For this structure, the light is absorbed in depletion region and similar to boundary grain. So, it reduces the result of carrier move pass boundary grain.

Method

Diamond film was synthesized on silicon substrate by MPCVD (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition) process. C_2H_5OH for intrinsic and C_2H_5OH mixed with B_2O_3 in a ratio B/C 10ppm, 100ppm, 1.000ppm were used as a liquid source [5, 6]. Before device fabrication, the diamond film was etched(cleaned) in a saturated solution of (by) CrO_3 in H_2SO_4 at $170^\circ C$ and then rinsed with a 1:1 boiling solution of H_2O_2 and NH_4OH to eliminate surface graphitic material, and DI water [7].

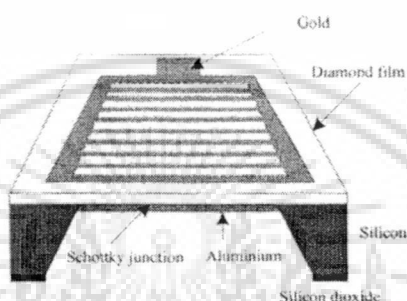


Fig. 1 Structure of Schottky Photodiode

The etching diaphragm of Schottky on diamond films by EPD solution [8]. The thickness of diamond films is $6\mu m$, area is $2mm^2$. Gold was used an ohmic contact by photolithography and aluminum was used a Schottky contact. Fig. 1 shows the device structure. The structure of diamond is polycrystalline. It has many crystals and many boundary grains. Therefore, affect to the characteristic of device. While the device is reverse bias and cause the depletion region. When the light against to the device, it's generate electron-hole pair and move to the pole by electric field in depletion region. However, the device work in horizontal on diamond film face a problem with electron-hole pair move pass boundary grain and effect to reduce the amount of carrier. So, we designed to work in verticals and parallel with the boundary grain, that it's reduce the effect of boundary grain for direction of current.

Results

A. Spectral response of the Schottky Photodiode

The Schottky Photodiode detector fabricated from diamond film and change the boron doping concentration, we investigated the spectral response between UV light and visible light at reverse biased 5volt at room temperature as show in Fig. 2

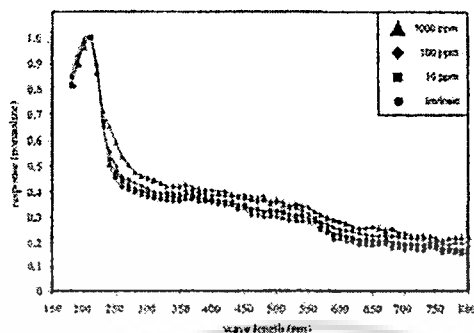


Fig. 2 Spectral response of Schottky Photodiode detector with boron doping concentration.

The result of changing of boron doping concentration 1000ppm, 100ppm, 10ppm and intrinsic, the spectral response of devices were not different. It was high response in UV light and low response in visible light. The sharp edge response at 210nm corresponds to the band gap energy of diamond (5.5eV, 225nm). Since the most of electric current generate in depletion region. So the result of boron doping concentration has no effect to so much, while we use in UVC. Such, the Schottky Photodiode are suitable detectors for UVC and low noise from visible light.

B. The electrical characteristic of the Schottky Photodiode

The film thickness of intrinsic Schottky Photodiode is $9\mu\text{m}$, the light shined to the device by wave length is 210nm, the light intensity is $0.8\text{mW}/\text{cm}^2$ and voltage bias is 5Volt. We investigated the current of Schottky Photodiode with increasing of the boron doping concentration intrinsic, 10ppm, 100ppm, and 1000ppm as show in Fig. 3.

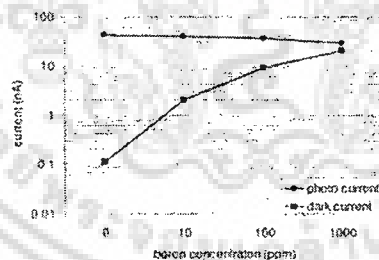


Fig. 3 The relation between photo current and dark current with boron concentration.

It was found that, photo current of intrinsic was highest and dark current was lowest. The different of photo current and dark current of intrinsic is 0.12nA . When the boron doping concentration is increased, the dark current is 20nA for 1000PPM, photo current is 42nA (intrinsic) and 29nA (1000PPM).

For no doping boron (intrinsic) is the highest current. Since the intrinsic is widest depletion region. Because of the depletion region receive the light and cause the electron-hole pairs. So the widely depletion region can detect the light and cause height photo current but for carrier are generated outside the scope of depletion region are recombination, so photo current not too high.



C. The result of film thickness

The film thickness effects to absorb the light in diamond film and depletion region, so it is caused by the changing of the photo current.

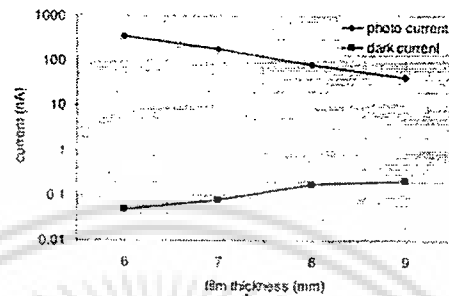


Fig. 4 The relation between photo current and dark current with the film thickness (intrinsic).

We investigated film thickness with photo current and dark current as show in Fig. 4. The photo current from 42nA to 350nA when we reduced film thickness from 9 μ m to 6 μ m, and dark current reduced from 0.22nA to 0.05nA respectively. For film reduce 3 μ m, photo current and dark current decreased 8.3time and 4time respectively.

Consider the life time of carrier, it found that when reduce film thickness, the life time of carrier will be reduce too. In other words, the device fabricate from polycrystalline and film thickness are reduced, amount of grain in vertical decrease and cause increasing of photo current.

D. The response time of Schottky Photodiode vary by boron doping concentration and film thickness

The boron doping concentration 1000ppm, 100ppm, 10ppm and intrinsic were shined by the light pulse and measured the changing of photo current with the time at reverse bias 5volt the result as shown in Fig. 5

For intrinsic, the rise time and the fall time were lowest is 5 μ s and 120 μ s respectively. For 1000ppm, the rise time and the fall time highest is 22 μ s and 420 μ s respectively. So increasing of doping boron concentration of Schottky Photodiode, the speed of response time were decreased. Since, increasing of boron doping concentration make depletion region is decreased. So, it cause the depletion region is decreased, effect to increase the capacitance of junction and increase diamond film outside of depletion region and cause the increasing of life time of carrier. At the same time for intrinsic is used by diamond film have thickness is 9, 8, 7 and 6 μ m were shined by the light pulse and reverse bias 5volt the result as show in Fig. 5

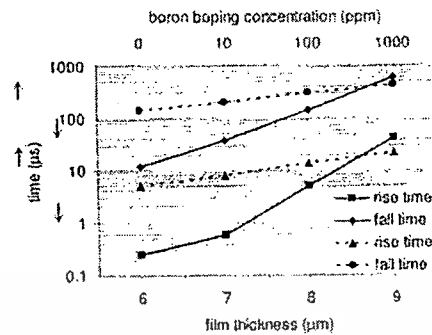


Fig. 5 The relation between the rise time and the fall time with the film thickness (intrinsic).

It was found that, when we reduced film thickness from $9\mu\text{m}$ to $6\mu\text{m}$, the rise time decreased from $42\mu\text{s}$ to $0.25\mu\text{s}$ and the fall time decreased from $600\mu\text{s}$ to $12\mu\text{s}$. Since, reducing of film thickness effect to reduce the amount of grain in vertical and diamond film out side of depletion region are decreased. So (that) the life time of carrier are decrease, and the light are absorbed more and more. Since, the light can pass to depletion region and cause increasing of the photo current.

E. The response time of Schottky Photodiode vary by junction area and reverse voltage bias

The Schottky Photodiode (intrinsic) with the junction area 0.193 , 2.07 , 3.76 and 5.95 mm^2 were shined by the light pulse and reverse bias 5 volt the result as show in Fig. 6

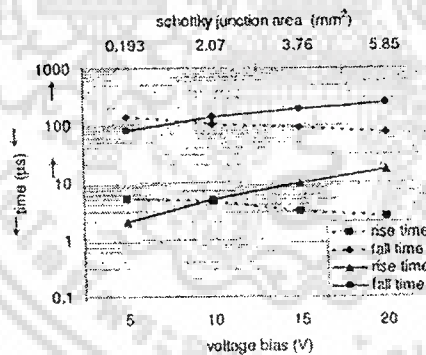


Fig. 6 The relation between the rise time and the fall time with the junction area and voltage bias.

When, the area is reduced from 5.85 to 2.07 mm^2 . The rise time decreased from $17\mu\text{s}$ to $2\mu\text{s}$ and the fall time decreased from $250\mu\text{s}$ to $80\mu\text{s}$. Since, the capacitance in junction area is specified the speed of device. So the reducing of junction area make to decrease response time and capacitance of junction area ($C \propto A/W$). So the devices are good time response. After that, reverse bias gave to the devices and the result as show in Fig. 6. For increasing of reverse bias voltage from 5 to 20 volt . The rise time decreased to $2.5\mu\text{s}$ and the fall time decreased to $65\mu\text{s}$. Since increasing of reverse bias voltage effected to decrease the time response. So, depletion region are widely and high electric field, effect to decrease life time of carrier. When increasing of voltage bias, the carriers move in depletion region are suddenly.

F. The Stability of temperature

We investigated the device from 25 to 200°C with the light at 210nm and reverse bias 5volt. The result as showed in Fig. 7. When the temperature was increased, the photo current and the dark current increased too. Which the dark current increased more the photo current at high temperature. For the devices were fabricated from diamond film intrinsic, the density of photo current increased from 1 to 1.250 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, and the density of dark current increased from 0.6 to 1nA/cm².

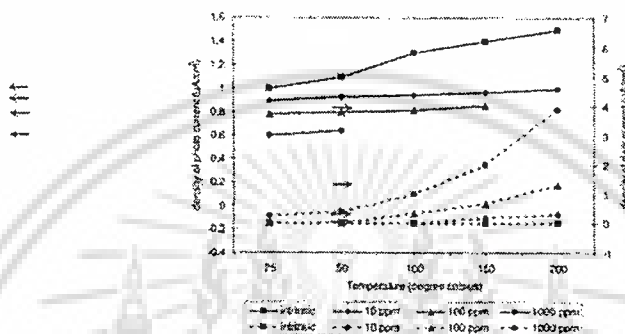


Fig. 7 The relation between the temperature with photo current density and dark current density.

The result of changing of temperature effected to the density of dark current and the device were fabricated from diamond film with boron doping concentration 100ppm and 1000ppm. the dark current increased suddenly until the photo current and the dark current were comparable at 170°C and 70°C respectively. Since, current from carriers were ionized from heat more than the current from the light. So if Schottky Photodiode use for detect in the low energy light, must to consider the temperature. So the devices were fabricated from low boron doping or no boron doping can work normally at high temperature.

Conclusion

The Schottky Photodiode was developed, it is high sensitivity for detect UV and low response in visible light. When, the devices were doped boron at high concentration, it caused to increase the dark current, decrease the photo current and decrease response time. For reducing of film thickness, it effected to increase the photo current, decrease the dark current and decrease response time. In the other word, reducing of time response could make by decreasing reverse voltage bias and decrease Schottky junction area. So, the Schottky photo diode diamond film for detect UV should fabricate by intrinsic with thickness less than 9 μm and high temperature operation at 200°C.

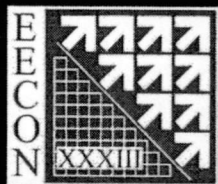
Acknowledgment

The author would like to thank National Science and Technology Development Agency (NSTDA) and National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) support in research.

Finally, this work might not have been possible the Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST) support in Scholarship.

References

1. J.E. Field. The properties of diamonds, Academic Press, London, 1979.
2. D.R. Kania, M.I. Landstrass, M.A. Plano, L.S. Pan, S. Han. Diamond radiation detectors, *Diamond Relat. Mater* 2 (1993) 1012-1019.
3. S.S., Chan, R.D. McKeag, M.D. Whitfield, R.B. Jackman. UV Photo detectors from thin film diamond. *Phys. Stat. Sol. (a)* 154 (1996) 445-454, January.
4. R.D. McKeag, M.D. Whitfield, S.Sim Chan, L. Ys Pang, R.B. Jackman. A high performance UV Photodetector from thin film diamond, *Mater. Res. Soc.* 416(1996)419-424.
5. L. Thaiyotin, E. Ratanadompisut, T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech, UV Photodetector from Schottky diode diamond film, *Diamond Relat. Mater* 11(2002)442-445.
6. W. Ebert, A. Vescan, T.H. Borst, E. Kohn. High current p/p+ diamond Schottky diode. *IEEE Electron Device Lett.* 15 (2) (1994) 289-291, August.
7. S.A. Grot, G.Sh. Gildenblat, C.W. Hatfield, C.R. Wronski, A.R. Badzian, R. Messier, The effect of surface treatment on the electrical properties of metal contacts to boron doped homoepitaxial diamond film, *IEEE Electron Device Lett.* 11 (2) (1990) 100-102, February
8. K.E. Bean. Anisotropic etching of silicon, *IEEE Trans. Electron Device* 25 (1978) 100-102, February



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33)

คำนำ

Keynote Speakers

บทความรับเชิญ

บทความดีเด่น

ดัชนีผู้เขียนบทความ Vol.1 (Author Index Vol.1)

ดัชนีผู้เขียนบทความ Vol.2 (Author Index Vol.2)

ดัชนีคำสำคัญ Vol.1 (Keyword Index Vol.1)

ดัชนีคำสำคัญ Vol.2 (Keyword Index Vol.2)

กำหนดการ

Sponsor

หน้าปก Proceedings

Proceeding Vol.1

Proceeding Vol.2

Abstract Program

บทความทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ไฟฟ้ากำลัง (PW)

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

อิเล็กทรอนิกส์ (EL)

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)

ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ไฟโตนิคส์ (PH)

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)

ร่วมจัดโดย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



ABB CSG
SOLUTION



*111 Years Engineering
Innovation*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์เรย์แบบ MSM ชนิดเพชร

MSM Diamond X-Ray detector

กรรณัฐ เอ๊ะเซิน¹ ชาญเดช หรือหันต์¹ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล¹

¹ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถนนคลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384

¹ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

5/4 หมู่ที่ 1 ถนนสุวินทวงศ์ ตำบลวังละเคียน อำเภอเมือง จังหวัดระยอง 24000 โทรศัพท์: +66 (0)38-857-100,9 โทรสาร: +66 (0)38-857-175

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) โดยใช้กระบวนการ HFCVD (Hot Filament Chemical Vapor Deposition) โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ได้ฟิล์มเพชรชนิดอินทริบซิคและทำการสร้างอุปกรณ์แบบ MSM บนโลหะแพร่ของฟิล์มเพชร โดยใช้โลหะอะลูมิเนียมในการสร้างรอยต่อขดลวดที่ทั้งด้านบนและด้านล่างโลหะแพร่ ทำให้พหุระเหตที่อินทริบซิคเพื่อให้เกิดผลของกรรณิกจากนั้นทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $450^\circ C$ ที่เวลาต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้กระแสไฟที่เร็วไวและย้อนกลับค่าและเวลาการตอบสนองของแสงของ MSM ชนิดเพชรนั้นเร็วขึ้น ทำการทำการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์เรย์ของ MSM (Metal-Semiconductor-Metal) ชนิดเพชร สามารถตอบสนองได้ถึงความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น และพบว่าตัวอุปกรณ์สามารถตอบสนองเวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์ที่เวลา 0.1s ได้ดี

คำสำคัญ: กระบวนการสร้าง MSM ชนิดเพชร, ตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์เรย์

ABSTRACT

Synthesizing Diamond film on (100) silicon substrate was processed by HFCVD (Hot Filament Chemical Vapor Deposition). The processes consisted of using methane (CH_4) to produce intrinsic diamond and then constructing MSM device on the diaphragm of diamond film. Schottky junctions on the top and the lower of the diaphragm were produced by aluminum which caused the carriers were able to move in the vertical direction to reduce the effect of grain boundaries. Then, the device was sintered at $450^\circ C$ in different times in order to find the decreased leakage current and proper response time. After that, the result of detecting an X-Ray of MSM diamond was satisfactory because it could respond along with increasing of intensity of an X-Ray. At last, we found that the device responded the exposed time of X-Ray at 0.1s properly.

Keywords: MSM Diamond fabrication, X-Ray detector

1. คำนำ

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าฟิล์มเพชรเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายประการ เช่น คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้า [1] คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้นักวิจัยมีความต้องการที่จะพัฒนาฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยี CVD ที่มีพื้นที่ฟิล์มเพชรขนาดใหญ่ ดังนั้นการวิจัยเหล่านี้ทำให้เกิดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มเพชรหลายอย่างด้วยกัน เช่น อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก และจากคุณสมบัติของวัสดุนี้ที่มีช่องว่างพลังงานมาก 5.5eV ทำให้ได้รับความสนใจพิเศษ สำหรับการพัฒนาวัสดุนี้ให้เป็นโฟโตดีเทกเตอร์ ในช่วงเวลาที่ยากเกินแสน [2] ในเวลาต่อมาโฟโตคอนดักทีฟ และ โฟโตไดโอดได้ถูกสร้างเป็นอุปกรณ์โดยใช้ฟิล์มเพชร ซึ่งอุปกรณ์นี้มีพหุระเหตที่เกิดจากแสงเมื่อผ่านฟิล์มที่มีขอบเกรน จะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงเปลี่ยนแปลง [3,4] ดังนั้นในบทความนี้ จึงได้นำเสนอการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงและรังสีเอ็กซ์เรย์แบบ MSM ชนิดเพชร ซึ่งมีการทำงานของอุปกรณ์ในแนวตั้ง และในโครงสร้างนี้แสงถูกดูดกลืนในบริเวณชั้นเขตปลอดพาหะโดยตรง

2. กระบวนการสร้าง

ฟิล์มเพชรถูกสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนด้วยวิธีการ HFCVD ซึ่งใช้แหล่งจ่ายเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอินทริบซิค ก่อนที่จะทำการสร้างอุปกรณ์ ต้องทำความสะอาดผิวฟิล์มเพชร โดยการกัดด้วยสารละลายของโครเมียมไดออกไซด์ (CrO_3) ในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่อุณหภูมิ $170^\circ C$ เพื่อกำจัดคราไปท์ที่ผิวด้านบนและด้านล่าง จากนั้นทำความสะอาดโดยการต้มในสารละลายโซโครเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ในอัตราส่วน 1:1 แล้วล้างด้วยน้ำ DI [5]

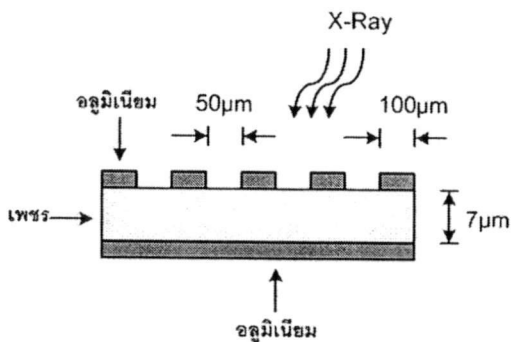
สำหรับอุปกรณ์ MSM ชนิดเพชร ได้ทำการสร้างบนโลหะแพร่ฟิล์มเพชร โดยการกัดฐานรองซิลิคอนด้วยสารละลาย EPD [6] ความหนาของฟิล์มเพชร 7 μm มีพื้นที่ 9 mm^2 และใช้เทคนิคกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีในการสร้างลวดลายโลหะ โดยใช้โลหะอะลูมิเนียมเป็นรอยต่อขดลวดที่ด้านบน และใช้โลหะอะลูมิเนียมเป็นรอยต่อขดลวดที่ด้านล่าง ดังรูปที่ 1 โครงสร้างตัวอุปกรณ์



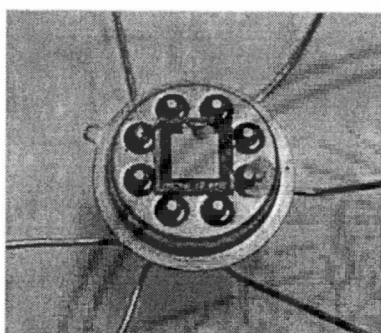
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สอ. มข. มทน.

The 33rd Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT

1481



รูปที่ 1 โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีเอกซ์แบบ MSM ชนิดเพชร

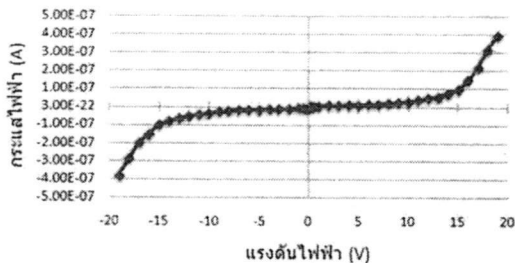


รูปที่ 2 ลักษณะอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต่อใช้งาน

รูปที่ 2 เป็นลักษณะอุปกรณ์ตรวจวัดที่ต่อใช้งาน ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มเพชรที่เป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์ ประกอบด้วยผลึกหลายๆ ผลึกเรียงต่อกันและมีเส้นขอบเขตเกรนของผลึกจำนวนมาก ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์ โครงสร้างตัวอุปกรณ์ แบบ MSM ชนิดเพชรรูปที่ 1 เมื่อให้ไบอัสที่รอยต่อจะทำให้เกิดบริเวณปลดพาหะ ซึ่งบริเวณนี้มีความสำคัญมากในการรับแสงทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โดยประจุพาหะทั้งสองจะถูกปัดไปยังขั้วโลหะทั้งสองด้วยความต่างศักย์ภายในบริเวณรอยต่อ ดังนั้นอุปกรณ์ทางแสงแบบแนวอนที่สร้างบนฟิล์มเพชรจะประสบกับปัญหาของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสง ต้องเดินทางผ่านขอบเขตเกรนของผลึกทำให้เกิดการลดลงของปริมาณประจุพาหะ ดังนั้นจึงออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบ MSM ให้อุปกรณ์ทำงานในแนวตั้ง ซึ่งเป็นทิศทางขนานกับขอบเขตเกรนของผลึก ทำให้สามารถลดอิทธิพลของขอบเขตเกรนของผลึกที่มีต่อทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้

3. ผลของการทดลอง

3.1 การศึกษาคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชร

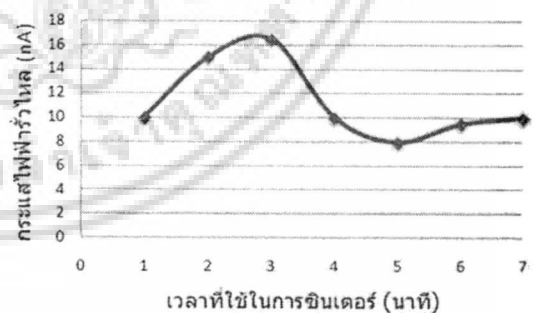


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชร

นำอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรมาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า -20 โวลต์ ถึง 20 โวลต์ ผลการทดลองดังรูปที่ 3 พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่รั่วไหลขึ้นกับค่าของอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้า -10 โวลต์ มีค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลประมาณ 35nA ในขณะที่ผลการทดลองที่แรงดันไฟฟ้าที่ 10 โวลต์ที่มีค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหลประมาณ 33nA

3.2 การศึกษาผลของกระแสรั่วไหลกลับกับเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ของอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชร

อุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรที่สร้างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้านบนและด้านล่างเรียบร้อยแล้วนำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 450°C ในบรรยากาศไนโตรเจน (N₂) โดยใช้เวลาตั้งแต่ 1-7 นาที จากนั้นศึกษาผลของกระแสรั่วไหลกลับกับเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ของอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรที่อุณหภูมิห้อง (25°C) โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 3 โวลต์ ผลการทดลองดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ารั่วไหลเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ของอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชร

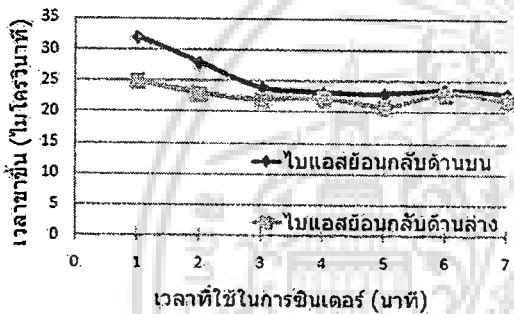


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

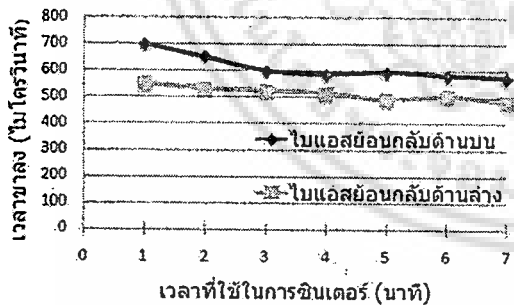
พบเมื่ออุปกรณ์ได้ซินเตอร์เป็นเวลา 3 นาที ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่รั่วไหลย้อนกลับของอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ และเมื่อมีการเพิ่มเวลาในการซินเตอร์ 5 นาที ความสมบูรณ์ของรอยต่อ ดีขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้ารั่วไหลลดลง และเมื่อมีการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ขึ้นอีกกระแสไฟฟ้ารั่วไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการซินเตอร์จะทำให้โลหะแทรกซึมลึกลงทำให้โลหะไปพบกับขอบเขตเกรนถัดไป ดังนั้นการใช้เวลาในการซินเตอร์ 5 นาที ทำให้มีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลต่ำประมาณ 8nA

3.3 ผลของเวลาในการคอมมอนกับเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ของอุปกรณ์ MSM ชนิดเพชร

อุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรหลังจากการทำกรซินเตอร์ตั้งแต่ 1 ถึง 7 นาที แล้วมาฉายแสงแบบพัลส์ โดยไบเอสชันกลับแรงดัน 3 โวลต์ทั้งด้านบนและด้านล่างให้แก่อุปกรณ์ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เพื่อศึกษาเวลาในการคอมมอนของตัวอุปกรณ์ ผลการทดลองดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ของอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชร

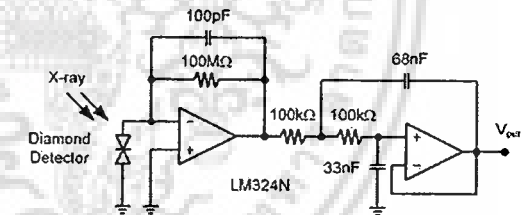


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาลงกับเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ของอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชร

พบว่าอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรในช่วงเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงลดลงตามเวลาที่มีการซินเตอร์เพิ่มขึ้น การซินเตอร์จะทำให้โลหะแทรกซึมลึกลงไปในเนื้อเพชรทำให้รอยต่อมีความสมบูรณ์มีผลให้เวลาพักหาประจุหาคะดลง โดยประจุหาคะที่เคลื่อนที่ภายในบริเวณปกคลุมหาคะจะเคลื่อนที่ถึงขั้วได้เร็วขึ้น พบว่าระยะเวลาขาขึ้นและขาลงเริ่มจะคงที่เวลาซินเตอร์ 3 นาทีและที่เวลาซินเตอร์ 5 นาที มีช่วงเวลาที่ขาขึ้นและขาลงจากการไบเอสชันกลับด้านบนคือ 23µs และ 596µs และช่วงเวลาที่ขาขึ้นและขาลงจากการไบเอสชันกลับด้านล่างคือ 21µs และ 494µs และการไบเอสชันกลับด้านบนจะมีช่วงเวลาที่ขาขึ้นและขาลงมากกว่าการไบเอสชันกลับด้านล่าง เนื่องจากโครงสร้างด้านบนของฟิล์มเพชรจะมีเกรนขนาดใหญ่ ส่วนด้านล่างซึ่งเชื่อมติดกับฐานรองในขณะที่สักระยะเพชรจะมีขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ MSM ที่มีขั้วโลหะอยู่ด้านบนและด้านล่างของฟิล์มเพชรเมื่อด้านล่างได้รับไบเอสชันกลับ เกรนขนาดเล็กที่อยู่ด้านล่างจะอยู่ภายในบริเวณปกคลุมหาคะ ทำให้ประจุหาคะเคลื่อนที่ถึงขั้วไฟฟ้าได้เร็ว และเมื่อด้านบนได้รับไบเอสชันกลับเกรนขนาดใหญ่จะอยู่ภายนอกบริเวณปกคลุมหาคะ เมื่อที่ประจุผ่านเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตเกรนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากทำให้การเคลื่อนที่ผ่านประจุช้าลง

3.4 ผลการตรวจวัดต่อรังสีเอ็กซ์

ในการทดสอบการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ของอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชร ตัวอุปกรณ์จะถูกนำไปต่อกับวงจรขยายในลักษณะแบบโฟโตไดโอดจิก โหมดดังรูปที่ 7 โดยวงจรภาคแรกจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าแสงเป็นแรงดันไฟฟ้า มีอัตราขยาย 100mV/nA วงจรภาคที่สองจะทำหน้าที่กรองความถี่รบกวน

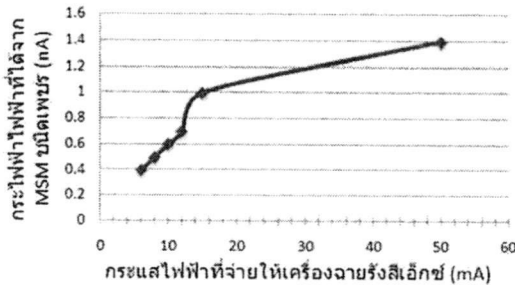


รูปที่ 7 การต่ออุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรกับวงจรขยายและกรองสัญญาณ

นำอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรมาวัดรังสีเอ็กซ์ด้วยความเข้มที่แตกต่างกันโดยใช้เครื่อง X-Ray ยี่ห้อ Varian รุ่น S-785 ที่ตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า 100kV และเปลี่ยนแหล่งกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ตั้งแต่ 6-50mA ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ผลการทดลองดังรูปที่ 8 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มของรังสีเอ็กซ์จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอุปกรณ์ได้มากขึ้น โดยจะได้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.4nA เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องวางรังสีเอ็กซ์ 50mA

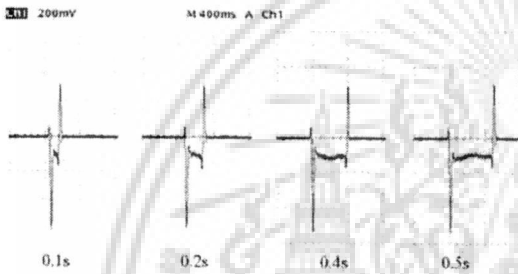


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์กับกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก MSM ชนิดเพชร

จากนั้นนำอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรมาฉายรังสีเอ็กซ์ที่ต่างค่าแรงดันไฟฟ้า 100kV และกระแสไฟฟ้า 50mA โดยเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาทำการฉายรังสีเป็น 0.1, 0.2, 0.4, 0.5s ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ผลการทดลองดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการฉายรังสีเอ็กซ์

พบว่าตัวอุปกรณ์สามารถตอบสนองสัญญาณที่ใช้เวลาสั้นต่างๆได้ดี แม้ว่าจะใช้เวลานานการฉายรังสีน้อยก็ตาม ดังนั้นอุปกรณ์ MSM ชนิดเพชรจึงมีความเหมาะสมในการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์และประยุกต์เป็นมิเตอร์วัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ได้ในอนาคต

4. บทสรุป

การสร้างอุปกรณ์แบบ MSM ชนิดเพชรกรีนเซอร์คิวไรซ์เวลา 5 นาฬิกาจะมีกระแสไฟฟ้าที่เร็ว โหลดน้อยและมีช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงต่ำสุด และสำหรับการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ของอุปกรณ์ตอบสนองได้ดีตามความเข้มของรังสีที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น และพบว่าตัวอุปกรณ์สามารถตอบสนองของช่วงเวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์ค่าต่างๆได้ดีถึงช่วงเวลา 0.1s ซึ่งการใช้เวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์น้อยจะ ทำให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) และ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนการวิจัย และขอขอบคุณ รศ.ดร.มนัส สวรรตศิลป์ และ รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑเจริญน์ ที่กรุณาที่ได้ใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.E. Field, The properties of diamonds, Academic Press, London, 1979.
- [2] D.R. Kania, M.I. Landstrass, M.A. Plano, L.S. Pañ, S. Han, Diamond radiation detectors, Diamond Relat. Mater 2(1993) 1012-1019.
- [3] S.S. Chan, R.D. McKeag, M.D. Whitfield, R.B. Jackman, UV photo detectors from thin film diamond, Phys. Stat. Sol. (a) 154 (1996) 445-454, January.
- [4] R.D. McKeag, M.D. Whitfield, S.Sm Chan, L. Ys Pang, R.B.Jackman, A high performance UV Photodetector from thin film diamond, Mater. Res. Soc. 416(1996)419-424.
- [5] S.A. Grot, G.Sh. Gildenblat, C.W. Hatfield, C.R. Wronski, A.R. Badzian, R.Messier, The effect of surface treatment on the electrical properties of metal contacts to boron doped homoepitaxial diamond film, IEEE Electron Device Lett. 11 (2) (1990) 100-102, February
- [6] K.E. Bean, Anisotropic etching of silicon, IEEE Trans. Electron Device 25 (1978) 100-102, February

ประวัติผู้เขียนบทความ



ตราวุช เจ๊ะเจิ้น, ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



รองศาสตราจารย์ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล สาขาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



ชาญเดช หรอนันต์ งานวิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ TMEC-R&D โครงการศูนย์วิจัยและพัฒนาไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ TMEC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้