# การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่แพร่ด้วยแพลตทินัม โดยการฉายรังสีเอกซ์

# ELECTRICAL CHARACTERISTICS IMPROVEMENT OF Pt-DOPED SCHOTTKY DIODE BY X-RAY IRRADIATION

ศุภกร  จันทร์ประภา
SUPAKORN  JANPRAPHA

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**
**สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์**
**คณะวิศวกรรมศาสตร์**
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**
**พ.ศ.2557**

KMITL-2014-EN-M-043-028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ELECTRICAL CHARACTERISTICS IMPROVEMENT OF Pt-DOPED SCHOTTKY DIODE BY X-RAY IRRADIATION

SUPAKORN JANPRAPHA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014
KMITL-2014-EN-M-043-028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2014
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่แพร่ด้วยแพลตทินัม โดยการฉายรังสีเอกซ์

**Thesis Title** Electrical Characteristics Improvement of Pt-Doped Schottky Diode by X-ray Irradiation

**นักศึกษา** นายศุภกร จันทร์ประภา

**รหัสประจำตัว** 55612501

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

**หมายเลขวิทยานิพนธ์** KMITL-2014-EN-M-043-028

| **คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์** | | **ลายมือชื่อ** |
|---|---|---|
| รศ.ดร.วิสุทธิ์ | ฐิติรุ่งเรือง | |
| ดร.โยธิน | วงศ์ประเสริฐ | |
| ดร.อัมพร | โพธิ์ใย | |
| ดร.นรินทร์ | อติวงศ์แสงทอง | |
| ผศ.ดร.สุรศักดิ์ | เนียมเจริญ | |

**วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ** วันพฤหัสบดีที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2557 เวลา 15.00-17.00 น.
**สถานที่สอบ** ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-305

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

**คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว**

**(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)**

**คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**วันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2557**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **หัวข้อวิทยานิพนธ์** | การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่แพร่ด้วยแพลตทินัมโดยการฉายรังสีเอกซ์ |
| **นักศึกษา** | นายศุภกร จันทร์ประภา |
| **รหัสนักศึกษา** | 55612501 |
| **ปริญญา** | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| **สาขาวิชา** | วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ |
| **พ.ศ.** | 2557 |
| **อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** | ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ |

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอเทคนิควิธีการฉายรังสีเอกซ์บนช็อตต์กีย์ไดโอดที่แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยมุ่งหวังว่าพลังงานและเวลาการฉายรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดค่าความต้านทานอนุกรมทำให้กระแสทางด้านไบอัสตรงเพิ่มขึ้น รวมไปถึงสามารถลดกระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมลดลงอีก ในการทดลองเริ่มจากการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมโครงสร้าง Cr/n-Si เสร็จแล้วนำมาทำการฉายรังสีเอกซ์โดยหาค่าพลังงานและเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสม ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที ส่งผลให้ช็อตต์กีย์ไดโอดที่แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังการฉายรังสีเอกซ์มีค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงเพิ่มขึ้นกลับมาใกล้เคียงกับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม ส่วนทางด้านกระแสรั่วไหลช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมมีค่ากระแสรั่วลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับช็อตต์กีย์โอดที่ไม่ถูกแพร่แพลตทินัม และหลังจากการฉายรังสีเอกซ์พบว่าสามารถลดกระแสรั่วไหลลงได้อีก โดยที่แรงดันไบอัส 1 V ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมแพลตทินัมก่อนและหลังฉายมีค่ากระแสทางด้านไบอัสตรง เท่ากับ 11.12, 8.11 และ 10.27 mA ตามลำดับ และกระแสรั่วไหลที่แรงดันไบอัส -1 V มีค่าเท่ากับ 5.21, 1.41 และ 0.82 µA ตามลำดับนอกจากนั้นการฉายรังสีเอกซ์ยังสามารถช่วยลดค่าความต้านทานอนุกรมของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมลงได้อีก ซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายที่ตั้งไว้โดยช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมก่อนและหลังฉายมีค่าความต้านทานอนุกรม คือ 100 และ 65.5 $\Omega$ ด้วยเหตุนี้จึงถือได้ว่าเทคนิคการฉายรังสีเอกซ์เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมให้มีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น ซึ่งอาจนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นเพื่อช่วยในการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้นได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **Thesis Title** | Electrical Characteristics Improvement of Pt-Doped Schottky Diode By X-ray Irradiation |
| **Student** | Mr. Supakorn Janprapha |
| **Student ID** | 55612501 |
| **Degree** | Master of Engineering |
| **Program** | Microelectronics Engineering |
| **Year** | 2014 |
| **Thesis Advisor** | Asst. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen |


## ABSTRACT

This research presents the techniques X-ray irradiation to Pt-doped Schottky diodes. Which this thesis purposes. The expectation is the radiation of suitable energy and time will improve the performance of Pt-doped Schottky diodes. By increasing forward currents, reducing the series resistances and leakage currents at the same time. The experiments start with of Cr/n-Si Pt-doped Schottky diodes fabrication. Then, diodes were irradiated by X-ray with appropriate energy and time, which are 85 keV for 5 seconds. From the results, the forward currents of Pt-doped Schottky diodes after irradiation are increased close to forward currents of un-doped Schottky diodes. The leakage current of Pt-doped Schottky diode compare with un-doped diodes are obviously decreased. Moreover, after X-ray irradiation, it can be seen that leakage currents of Pt-doped diodes are less than before irradiation. The forward currents of un-doped, Pt-doped diode before irradiation and Pt-doped diode after irradiation at bias voltage 1 V are 11.12, 8.11 and 10.27 mA respectively. The leakage currents at -1 V bias voltage are 5.21, 1.41 and 0.82 μA respectively. Furthermore, the series resistance of Pt-doped diodes are decreased after X-ray irradiation. The series resistance of Pt-doped diode before and after irradiation are 100 and 65.5 Ω, respectively. It is clearly seen that X-ray irradiation is another technique that improves the performance of the Pt-doped Schottky diode including other kinds of semiconductor devices as well.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ


วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง ในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ อบรมสั่งสอน ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียนและการดำเนินชีวิต จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, ดร. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, ดร. โยธิน วงศ์ประเสริฐ, ดร. รังสรรค์ เมืองเหลือ และ คณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร. นิภาพรรณ กลั่นเงิน, คุณวิทวัส แย้มวงษ์, นักวิจัย และ เจ้าหน้านักวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองบางส่วน เครื่องมือในการวัดวิเคราะห์ชิ้นงาน การให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสงค์ ธูสรานนท์ อาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับการสนับสนุนช่วยเหลืออุปกรณ์เครื่องมือการฉายรังสีเอกซ์

ขอขอบคุณ คุณสุรดา เอื้อมานะพงษ์, คุณอิสระ ศรีธนชัย, คุณจิรวัฒน์ ปราบเขต และคุณธนวัฒน์ ทองหนัก, ที่ได้ช่วยถ่ายทอดความรู้ เทคนิคในการค้นคว้าข้อมูลและเทคนิควิธีการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ในกระบวนการสร้างและการวัดชิ้นงาน รวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับมุมมองทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ อีกทั้งยังช่วยแนะนำประสบการณ์แนวทางในการดำเนินชีวิต และขอขอบคุณ คุณบุศรา นรารักษ์, คุณศนิ กลิ่นสนิท, คุณไอลดา สุวรรณชาตรี ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติ พี่ น้อง ที่ให้ความรักความเมตตาอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ และสนับสนุนทางด้านการเรียนแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

ศุภกร จันทร์ประภา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... II
กิตติกรรมประกาศ ..... III
สารบัญ ..... IV
สารบัญตาราง ..... VIII
สารบัญรูป ..... IX
รายการคำย่อ ..... XIV
รายการสัญลักษณ์ ..... XV
รายการคำศัพท์เทคนิค ..... XVII
บทที่ 1 บทนำ ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา ..... 5
1.3 หลักการทางทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยและสมมติฐานของการศึกษา ..... 6
1.4 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา ..... 7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย ..... 7
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ ..... 8

บทที่ 2 ทฤษฎี ..... 9
2.1 รังสีเอกซ์ ..... 9
2.1.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอกซ์ ..... 9
2.1.2 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ ..... 10
2.1.3 ลักษณะคุณสมบัติของรังสีเอกซ์ ..... 12
2.2 หน่วยการวัดปริมาณรังสี ..... 13
2.2.1 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี ..... 14
2.2.2 ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน ..... 14
2.2.3 ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว ..... 15
2.2.4 ปริมาณรังสีสมมูล ..... 15
2.2.5 พลังงานของรังสี ..... 16
2.3 รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ..... 17
2.3.1 แถบพลังงานก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ..... 17
2.3.2 แถบพลังงานหลังเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่ภาวะสมดุล ..... 19
2.3.2.1 รอยสัมผัสช็อตต์กีย์กรณีได้รับแรงดันไบอัสตรง ..... 20
2.3.2.2 รอยสัมผัสช็อตต์กีย์กรณีไบอัสย้อนกลับ ..... 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)


| | |
|---|---|
| | หน้า |
| 2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ | 23 |
| 2.3.4 การหาค่าตัวแปรของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ด้วยเทคนิคการประมาณค่าของ Cheung | 24 |
| 2.3.5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ | 26 |
| 2.4 จุดบกพร่องในผลึก | 27 |
| 2.4.1 จุดบกพร่องแบบจุด | 28 |
| 2.4.2 จุดบกพร่องแบบแนวเส้น | 28 |
| 2.4.3 จุดบกพร่องแบบพลาน่าร์ | 29 |
| 2.5 คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม | 30 |
| 2.5.1 คุณสมบัติของแพลตทินัม | 30 |
| 2.5.2 สภาพต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม | 33 |
| 2.5.3 กระบวนการจับยึด | 36 |
| 2.5.4 การควบคุมช่วงอายุของพาหะด้วยอะตอมแพลตทินัม | 38 |
| บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง | 39 |
| 3.1 เทคโนโลยีการสร้าง | 39 |
| 3.1.1 กระบวนการแพร่สารเจือโดยเทคนิคไอออนอิมแพลนเทชัน | 39 |
| 3.1.2 กระบวนการเมทัลไลเซชัน | 40 |
| 3.1.2.1 Sputtering | 41 |
| 3.1.2.2 Electron-beam evaporation | 41 |
| 3.1.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี | 42 |
| 3.2 การออกแบบลวดลายบนกระจกต้นแบบ | 43 |
| 3.2.1 ลวดลายกระจกต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ ของช็อตต์กีย์ไดโอด | 43 |
| 3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอด | 44 |
| บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง | 51 |
| 4.1 การทดลอง | 51 |
| 4.1.1 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า | 51 |
| 4.1.2 การฉายรังสีเอกซ์ | 52 |
| 4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือ แพลตทินัม และไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม | 53 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ โครงสร้าง Cr/n-Si ที่ถูกแพร่อะตอมแพลตทินัมและไม่ถูกแพร่อะตอมแพลตทินัม.......... 53
4.2.2 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ โครงสร้าง Cr/n-Si ที่ถูกแพร่อะตอมแพลตทินัมและไม่ถูกแพร่อะตอมแพลตทินัม.......... 55
4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์.......... 57
4.3.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส–แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมที่พลังงานการฉายรังสีที่แตกต่างกัน .... 57
4.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส–แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมที่เวลาการฉายรังสีที่แตกต่างกัน.......... 59
4.4 การศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆ ของช็อตต์กีย์ไดโอด ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที กับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม.......... 62
4.4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเปรียบเทียบกันระหว่าง ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและ หลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที กับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม.......... 62
4.4.1.1 ความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ .......... 62
4.4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอด ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที เปรียบเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอด ที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม.......... 68
4.4.3 การศึกษาความหนาแน่นพาหะเปรียบเทียบระหว่างช็อตต์กีย์ไดโอด ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉาย รังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที และช็อตต์กีย์ไดโอด ที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม.......... 70
4.4.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอด ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉาย รังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keVเป็นเวลา 5 วินาที และช็อตต์กีย์ไดโอด ที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม.......... 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.5 การศึกษาระดับพลังงานกระตุ้นของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม ..... 73
4.4.6 สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม ..... 74
4.4.7 การศึกษาแรงดันพังทลายของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม ..... 76

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ..... 78

เอกสารอ้างอิง ..... 82

ภาคผนวก ก. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ ..... 88
ภาคผนวก ข. ผลงานทางวิชิการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์ ..... 89
ประวัติผู้เขียน ..... 104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

2.1 หน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสี ........ 13

2.2 ค่า radiation weighting factor ($W_R$) ........ 16

2.3 สรุปคุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำในทางอุดมคติที่ทำให้ เกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์หรือรอยสัมผัสเรคทิไฟร์และรอยสัมผัสโอห์มิค ........ 23

2.4 ตารางแสดงคุณสมบัติทั่วไปของแพลตทินัม ........ 31

4.1 ความเข้มของรังสีที่พลังงานต่างๆ ........ 57

4.2 ความเข้มของรังสีที่พลังงาน 85 keV ด้วยเวลาการฉายต่างๆ ........ 59

4.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากเทคนิคของ Cheung ........ 67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1.1 | ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเกิดพาหะกับบริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์รอยต่อพีเอ็นก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงานและเวลาต่างๆ | 3 |
| 1.2 | ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดกำลังรอยต่อพีเอ็นก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV ที่เวลา 5, 55 และ 205 วินาที | 4 |
| 1.3 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของพีเอ็นไดโอดก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 40, 55 และ 70 keV | 4 |
| 1.4 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของพีเอ็นไดโอดก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 55 และ 70 keV ที่เวลา 55 และ 205 วินาที | 5 |
| 2.1 | วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น ผู้ค้นพบรังสีเอกซ์เป็นคนแรกและภาพถ่ายมือภรรยาเขาซึ่งเป็นภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ภาพแรก | 10 |
| 2.2 | กลไกการเกิดรังสีเอกซ์ | 11 |
| 2.3 | แผนภูมิคุณสมบัติโดยทั่วไปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า | 13 |
| 2.4 | ภาคตัดขวางโครงสร้างอย่างง่ายของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์และรอยสัมผัสโอห์มิค | 17 |
| 2.5 | แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ | 18 |
| 2.6 | แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ | 19 |
| 2.7 | (ก) การให้แรงดันไบอัสตรงและสัญลักษณ์ของช็อตต์กีย์ไดโอด<br>(ข) แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง | 20 |
| 2.8 | (ก) การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับและสัญลักษณ์ของช็อตต์กีย์ไดโอด<br>(ข) แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ | 21 |
| 2.9 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์และรอยต่อพี-เอ็น | 23 |
| 2.10 | รอยสัมผัสช็อตต์กีย์ของ W/GaAs<br>(ก) กราฟในเทอม $\frac{d(V)}{d(lnJ)}$ กับ $J$ และ $H(J)$ กับ $J$<br>(ข) ผลจากการทดลอง เปรียบเทียบกับการคำนวณในเทอมของ $\ln J$ กับ $V$ | 25 |
| 2.11 | ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ | 26 |
| 2.12 | ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ในเทอมของ $1/C^2$ | 27 |
| 2.13 | จุดบกพร่องผลึกชนิดต่างๆ | 28 |
| 2.14 | จุดบกพร่องแบบ Edge dislocation | 29 |
| 2.15 | จุดบกพร่องแบบ Screw dislocation | 29 |
| 2.16 | ลักษณะการแพร่ของอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอน | 32 |
| 2.17 | กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแพลตทินัมในซิลิคอน | 32 |
| 2.18 | ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอนบริสุทธิ์ | 33 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.19 | ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมแพลตทินัม | 34 |
| 2.20 | ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอนชนิดพี ซึ่งอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมแพลตทินัม | 34 |
| 2.21 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือแพลตทินัม ของซิลิคอนฐานรองชนิดเอ็นที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันโดยตัวเลขในกราฟแสดงค่าของสภาพต้านทานเริ่มแรกของซิลิคอน | 35 |
| 2.22 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดสภาพต้านทานของซิลิคอนกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือแพลตทินัม ของซิลิคอนฐานรองชนิดพีที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันโดยตัวเลขในกราฟแสดงค่าของสภาพต้านทานเริ่มแรกของซิลิคอน | 35 |
| 2.23 | แสดงกระบวนการจับยึดและกำเนิดอิเล็กตรอน-โฮลที่ตำแหน่ง $E_t$<br>ก. กระบวนการจับอิเล็กตรอน<br>ข. กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน<br>ค. กระบวนการจับโฮล<br>ง. กระบวนการปลดปล่อยโฮล | 36 |
| 3.1 | เครื่องไอออนอิมแพลนเทชัน | 40 |
| 3.2 | กระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) | 41 |
| 3.3 | Electron-beam evaporator | 42 |
| 3.4 | กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี | 43 |
| 3.5 | ลักษณะโครงสร้างของช็อตต์กีย์ไดโอด | 44 |
| 3.6 | ลักษณะลวดลายกระจกต้นแบบ | 44 |
| 3.7 | แผนผังกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si (Pt doped) | 44 |
| 3.8 | ภาพตัดขวางแสดงกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอด | 47 |
| 3.9 | ภาพถ่ายชิ้นงานจริงที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ของช็อตต์กีย์ไดโอด | 50 |
| 4.1 | (ก) เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A<br>(ข) เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station มี ERS Aircool SP72-300 thermo chuck | 52 |
| 4.2 | เครื่อง C-ARM SIEMENS SIREMOBIL COMPACT 650 135 | 52 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 4.3 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม.................... | 53 |
| 4.4 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม.................... | 54 |
| 4.5 | ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม ......... | 55 |
| 4.6 | ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอด ที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม ........................................ | 56 |
| 4.7 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 40, 55, 70 และ 85 keV ........................................ | 58 |
| 4.8 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 40, 55, 70 และ 85 keV ........................................ | 59 |
| 4.9 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ ที่เวลาการฉายรังสีเอกซ์ 5, 55 และ 105 วินาที.. ........................................ | 60 |
| 4.10 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ ที่เวลาการฉายรังสีเอกซ์ 5, 55 และ 105 วินาที.. ........................................ | 60 |
| 4.11 | ความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มรังสีเอกซ์กับกระแสไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม .................... | 61 |
| 4.12 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัส เพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดในเงื่อนไขต่างๆ .................................... | 63 |
| 4.13 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันจากการให้ไบอัสตรงในเทอมของ $d(V)/d(\ln J)$ กับ $J$ และ $H(J)$ กับ $J$ ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลทินัม เพื่อใช้หาค่า $n$ , $R$ และ $\phi_{bn}$ ........................................ | 65 |
| 4.14 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันจากการให้ไบอัสตรงในเทอมของ $d(V)/d(\ln J)$ กับ $J$ และ $H(J)$ กับ $J$ ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลทินัม เพื่อใช้หาค่า $n$ , $R$ และ $\phi_{bn}$ ........................................ | 66 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)


รูปที่ หน้า

4.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันจากการให้ไบอัสตรงในเทอมของ $d(V)/d(\ln J)$ กับ $J$ และ $H(J)$ กับ $J$ ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลทินัม หลังการฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 85 keV ที่เวลา 5 วินาที เพื่อใช้หาค่า $n$ , $R$ และ $\phi_{bn}$ ..... 66

4.16 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที ..... 68

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความกว้างบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที ..... 69

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที ..... 70

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพาหะกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที ..... 71

4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมภายใต้อุณหภูมิการวัด 27°C ถึง 127°C ..... 72

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนฉายรังสีเอกซ์ภายใต้อุณหภูมิการวัด 27°C ถึง 127°C ..... 72

4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังฉายรังสีเอกซ์ภายใต้อุณหภูมิการวัด 27°C ถึง 127°C ..... 73

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิ่มตัวย้อนกลับกับอุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ภายใต้อุณหภูมิการวัดตั้งแต่ 27°C ถึง 127°C ..... 74


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 4.24 | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระแสรั่วของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่แพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่แรงดันไบอัส -1 V ในช่วงอุณหภูมิ 27-127°C | 75 |
| 4.25 | แรงดันพังทลายของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่แพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที | 76 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการคำย่อ

| อักษรย่อ | คำเต็มภาษาอังกฤษ | คำแปลภาษาไทย |
|---|---|---|
| Å | Angstrom | อังสตรอม |
| Ar | Argon | อาร์กอน |
| B | Boron | โบรอน |
| cm | Centimeter | เซนติเมตร |
| Cr | Chromium | โครเมียม |
| CZ | Czochralski silicon | โชคราลสกี้ |
| DI | De-ionization water | น้ำไร้ประจุ |
| E-beam | Electron-beam evapolation | ระบบระเหยสารด้วยลำแสง |
| ERC | Electronic Research Center | ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ |
| HF | Hydrofluoric acid | กรดไฮโดรฟูออริก |
| IC | Integrated circuit | วงจรรวม |
| n-Si | N type Silicon | ซิลิคอนชนิดเอ็น |
| nm | Nanometer | นาโนเมตร |
| P | Phosphorus | ฟอสฟอรัส |
| PR | Photoresist | น้ำยาไวแสง |
| Pt | Platinum | แพลตทินัม |
| RF | Radio Frequency | คลื่นความถี่ย่านวิทยุ |
| Si | Silicon | ซิลิคอน |
| s | Second | วินาที |
| TMEC | Thai Microelectronics Center | ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ |
| μm | Micrometer | ไมโครเมตร |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการสัญลักษณ์

| | | |
|---|---|---|
| $A$ | คือ | พื้นที่รอยสัมผัส |
| $A^*$ | คือ | ค่าคงตัวริชาร์ดสัน |
| $C$ | คือ | ค่าความจุไฟฟ้า |
| $D$ | คือ | ระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดรังสีและอุปกรณ์ |
| $D_{TxR}$ | คือ | ปริมาณรังสีที่ดูดซับโดยเฉลี่ยในเนื้อเยื่อ |
| $E_0$ | คือ | ระดับสุญญากาศ |
| $E_A$ | คือ | ระดับผู้รับแบบลึก |
| $E_a$ | คือ | ระดับพลังงานกระตุ้น |
| $E_C$ | คือ | ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า |
| $E_D$ | คือ | ระดับผู้ให้แบบลึก |
| $E_F$ | คือ | ระดับเฟอร์มิ |
| $E_{FM}$ | คือ | ระดับเฟอร์มิ |
| $E_{FS}$ | คือ | ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านสารกึ่งตัวนำ |
| $E_g$ | คือ | ช่องว่างพลังงาน |
| $E_i$ | คือ | ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน |
| $E_V$ | คือ | ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ |
| $E_T$ | คือ | ระดับพลังงานของจุดบกพร่อง |
| $\varepsilon_s$ | คือ | ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ |
| $h$ | คือ | ค่าคงที่ของแพลงค์ |
| $I_0$ | คือ | ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส |
| $I_F$ | คือ | กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสตรง |
| $I_{leak}$ | คือ | กระแสรั่ว |
| $I_{MS}$ | คือ | กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ |
| $I_R$ | คือ | กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสย้อนกลับ |
| $I_S$ | คือ | ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส |
| $I_{SM}$ | คือ | กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ |
| $J$ | คือ | ความหนาแน่นกระแส |
| $k$ | คือ | ค่าคงที่โบลต์มันน์ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

| | | |
|---|---|---|
| $kV$ | คือ | พลังงานรังสีเอกซ์ |
| $mA$ | คือ | กระแสที่ถูกป้อนให้หัวจ่ายรังสีเอกซ์ |
| $n$ | คือ | แฟคเตอร์อุคมคติ |
| $N_A$ | คือ | ความหนาแน่นของพาหะผู้รับ |
| $N_A^-$ | คือ | ไอออนลบของอะตอมผู้รับ |
| $N_D$ | คือ | ความหนาแน่นของพาหะผู้ให้ |
| $N_D^+$ | คือ | ไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ |
| $N_{Pt}$ | คือ | ความหนาแน่นของอะตอมแพลตทินัม |
| $q$ | คือ | ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน |
| $R_S$ | คือ | ความต้านทานอนุกรม |
| $S$ | คือ | เวลาการฉายรังสีเอกซ์ |
| $T$ | คือ | อุณหภูมิสัมบูรณ์ |
| $V_A$ | คือ | แรงดันไบอัส |
| $V_{bi}$ | คือ | แรงดันภายใน |
| $W$ | คือ | ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ |
| $\chi$ | คือ | อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี |
| $\sigma_n$ | คือ | ภาคตัดขวางการจับยึดของอิเล็กตรอน |
| $\sigma_p$ | คือ | ภาคตัดขวางการจับยึดของโฮล |
| $\phi_{bn}$ | คือ | ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์ |
| $\phi_M$ | คือ | ฟังก์ชันงานของโลหะ |
| $\phi_S$ | คือ | ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ |
| $\tau$ | คือ | ค่าเวลาช่วงชีวิตของพาหะ |
| $\tau_n$ | คือ | ค่าเวลาช่วงชีวิตของอิเล็กตรอน |
| $\tau_p$ | คือ | ค่าเวลาช่วงชีวิตของโฮล |
| $\lambda$ | คือ | ความยาวคลื่นแสง |
| $\alpha$ | คือ | อนุภาคแอลฟา |
| $\beta$ | คือ | อนุภาคเบต้า |
| $\gamma$ | คือ | อนุภาคแกมม่า |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการคำศัพท์เทคนิค

| ภาษาไทย | ภาษาอังกฤษ |
|---|---|
| กรดปิรันยา | Piranha |
| กระบวนการดูดกลืนแสง | Absorption process |
| กระบวนการสปัตเตอริ่ง | RF sputtering |
| กระบวนการไอออนอิมแพลนเทชั่น | Ion implantation |
| กระแสมืด | Dark current |
| กระแสรั่วไหล | Leakage current |
| กัมมันตภาพรังสี | Radioactivity |
| การฉายรังสีเอกซ์ | X-ray irradiation |
| การแทรกตัวอยู่ระหว่างอะตอม | Interstitial |
| การทะลุทะลวง | Penetrarion |
| การไบอัสไปข้างหน้า | Forward bias |
| การไบอัสย้อนกลับ | Reverse bias |
| การผ่าเหล่า | Mutation |
| การพังทลายแบบอะวาลันซ์ | Avalanche breakdown |
| การแพร่เข้าไปแทนที่ | Substitutional diffusion |
| กำแพงศักย์ภายใน | Potential barrier |
| ขั้วแคโทด | Cathode |
| ขั้วแอโนด | Anode |
| ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ | Depletion width |
| ความเร็วของอิเล็กตรอน | Thermal velocity |
| ค่าสภาพต้านทาน | Resistivity |
| จุดบกพร่อง | Defect |
| จุดบกพร่องแบบจุด | Point defect |
| จุดบกพร่องแบบพลาน่าร์ | Planar defect |
| จุดบกพร่องแบบเส้น | Line defect |
| จุดบกพร่องในโครงสร้างผลึก | Structural defect |
| จุดบกพร่องแบบช่องว่าง | Vacancy defect |
| จุดบกพร่องจากการเปลี่ยนตำแหน่ง | Dislocation defect |
| ช่องว่างแถบพลังงาน | Energy gap |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

| ภาษาไทย | ภาษาอังกฤษ |
|---|---|
| ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ | Native oxide |
| ซอฟต์เอกซ์เรย์ | Soft x-ray |
| ไดโอดพี-เอ็น | P-N diode |
| ตัวตรวจวัดแสง | Photodetector |
| ไตรโคโลเอทธีลีน | Trichloroethylene |
| แถบนำไฟฟ้า | Conduction band |
| แถบวาเลนซ์ | Valence band |
| เนื้อสารกึ่งตัวนำ | Bulk |
| น้ำยาขึ้นลวดลาย | Developer |
| น้ำยาไวแสง | Photoresist |
| เบ้าหลอมสาร | Crucible |
| โปรตรอน | Proton |
| พลังงานยึดเหนี่ยว | Binding energy |
| พาหะส่วนมาก | Majority carrier |
| พาหะส่วนน้อย | Minority carrier |
| ฟังก์ชั่นงาน | Work function |
| โฟโตมาร์ก | Photo mask |
| โฟโตลิโธกราฟี | Photolithography |
| ภาคตัดขวางการจับยึด | Capture cross section |
| ระดับพลังงานระดับลึก | Deep level energy |
| ระดับพลังงานดักจับ | Energy trap |
| เรคทิไฟร์ | Rectifier |
| แรงดันพังทลาย | Breakdown voltage |
| รอยสัมผัสช็อตต์กีย์ | Schottky contact |
| รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ | Metal-semiconductor contact |
| รอยสัมผัสโอห์มิค | Ohmic contact |
| ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก | Deep accepter level |
| ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก | Deep donor level |
| ระดับพลังงานเฟอร์มิ | Fermi energy |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

| ภาษาไทย | ภาษาอังกฤษ |
|---|---|
| ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน | Electron-beam evaporation |
| รังสีเอกซ์ | X-ray |
| สิ่งปนเปื้อน | Contamination |
| สารกึ่งตัวนำชนิดพี | p-type semiconductor |
| สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | n-type semiconductor |
| สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง | Direct band gap semiconductor |
| สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง | Indirect band gap semiconductor |
| สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค | Extrinsic semiconductor |
| สารเจือระดับลึก | Deep impurity |
| สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง | Light absorption coefficient |
| สัมประสิทธิ์การแพร่ | Diffusion coefficient |
| ศูนย์กลางการดักจับ | Trap center |
| ศูนย์กลางการรวมตัว | Recombination center |
| ศูนย์กลางการเกิดพาหะ | Generation center |
| อบแผ่นครั้งแรก | Pre bake |
| อะซิโตน | Acetone |
| อายุการรวมตัวของพาหะ | Recombination lifetime |
| อายุการเกิดของพาหะ | Generation lifetime |
| อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี | Electron affinity |
| อัลตร้าโซนิค | Ultrasonic |
| ฮาร์ดเอกซ์เรย์ | Hard x-ray |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีมีมากขึ้นเรื่อยๆ มีการคิดค้นและพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้เพื่ออำนวยความสะดวกในการดำเนินชีวิตของมนุษย์อยู่ตลอดเวลา ในการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีนั้นคงหนีไม่พ้นที่จะต้องกล่าวถึงการพัฒนาในด้านอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งถือได้ว่าเป็นพื้นฐานการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆอีกมากมายหนึ่งในนั้นก็คือ “ไดโอด” ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากชิ้นหนึ่งของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไดโอดตัวแรกถูกสร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1902 โดยนาย เจ แอมโบรส เฟลมมิ่ง (J. Ambrose Fleming) มีลักษณะเป็นหลอดสุญญากาศ ต่อมาได้มีการคิดค้นพัฒนาจนพบสิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่ที่ทำด้วยสารกึ่งตัวนำเข้ามาแทนที่หลอดสุญญากาศในที่สุดและในปัจจุบันมีไดโอดมากมายหลายชนิดให้เลือกใช้ตามความเหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงช็อตต์กีย์ไดโอด (Schottky diode) ที่มีการประยุกต์ใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวตรวจวัดแสง ตัวตรวจวัดก๊าซต่างๆ เป็นต้น [1-2]

ช็อตต์กีย์ไดโอดเกิดจากการนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันเกิดเป็นรอยสัมผัสเรคทิไฟร์ (Rectify contact) กระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้ในทิศทางเดียว โดยมีเงื่อนไขคือค่าฟังก์ชันงานของโลหะต้องมากกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำในกรณีสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น และค่าฟังก์ชันงานของโลหะต้องน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี สำหรับกลไกกระแสในรอยสัมผัสช็อตต์กีย์เมื่อเทียบกับไดโอดรอยสัมผัสพี-เอ็นมีสิ่งที่แตกต่างกัน คือ กระแสช็อตต์กีย์ไดโอดเป็นกระแสการไหลของพาหะส่วนมาก (Majority carrier) ดังนั้นจะไม่เกิดปรากฏการณ์การสะสมพาหะส่วนน้อย (Minority carrier) นอกจากนี้แรงดันขีดเริ่ม (Built in voltage) ของช็อตต์กีย์ไดโอดจะน้อยกว่าไดโอดพี-เอ็นช็อตต์กีย์ไดโอดสามารถที่จะสวิตช์ได้รวดเร็วกว่าไดโอดพี-เอ็นแต่เนื่องจากช็อตต์กีย์ไดโอดนั้นมีปริมาณกระแสรั่วไหลมากกว่าไดโอดพี-เอ็นซึ่งถือเป็นจุดด้อยของช็อตต์กีย์ไดโอด ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ได้ทำการพัฒนาคุณสมบัติของช็อตต์กีย์ไดโอดโดยการลดกระแสรั่วไหลลง [3-4]

จากงานวิจัยที่ทำการศึกษาการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมลงในซิลิคอน [5-6] ซึ่งพบว่าแพลตทินัมนั้นส่งผลต่อการนำกระแสไฟฟ้าของซิลิคอน โดยที่การเติมอะตอมสารเจือแพลตตินัมนั้นอะตอมของแพลตทินัมจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอะตอมของซิลิคอน ผลจากการแพร่แพลตทินัมนี้ทำให้โครงสร้างของซิลิคอนเปลี่ยนไปเนื่องจากแพลตทินัมมีคุณสมบัติทำให้อายุของพาหะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีคุณสมบัติเป็นอะตอมสารเจือระดับลึกในแถบพลังงานซึ่งจะทำให้เกิดระดับพลังงานระดับลึกขึ้น ซึ่งระดับพลังงานดังกล่าวจะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการดักจับหรือการรวมตัวใหม่ ทำให้อายุการเกิดและอายุการรวมตัวของพาหะเปลี่ยนแปลงไป [7] ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้แพลตทินัมจึงได้ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้เพื่อเพิ่มความเร็วในการสวิตซ์ และช่วยลดปริมาณกระแสรั่วไหลของซ็อตต์กีไดโอดลงได้แต่ก็ยังพบปัญหา คือ ซ็อตตกีย์ไดโอดที่แพร่แพลตทินัมมีกระแสทางด้านแรงดันไบอัสตรงที่ลดลงเมื่อเทียบกับซ็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม [8] ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะศึกษาหาเทคนิควิธีการแก้ปัญหาผลของแพลตทินัมที่มีต่อซ็อตต์กีย์ไดโอดในส่วนนี้ซึ่งจากการค้นคว้าบทความวิจัยพบวิธีที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ไดโอดนั่นคือ เทคนิควิธีการฉายรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันยกตัวอย่างเช่น ในด้านการแพทย์ที่ใช้ฟิล์มภาพเอกซ์เรย์ช่วยในการวินิจฉัยโรค [9] ด้านความปลอดภัยช่วยในการตรวจค้นหาอาวุธ หรือสิ่งต้องสงสัยที่ซุกซ่อนอยู่ในวัตถุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา [10] เปล่าด้านเกษตรกรรม รังสีเอกซ์สามารถช่วยในการถนอมอาหาร [11] และด้านอุตสาหกรรม รังสีเอกซ์ช่วยตรวจรอยร้าวของวัสดุสินค้า หรือรอยเชื่อมต่อท่อโลหะต่างๆ [12] เป็นต้น ส่วนทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวก็เริ่มมีการนำรังสีเอกซ์มาใช้ในงานวิจัยในช่วงแรกเริ่มงานวิจัยที่ทำการศึกษาการฉายรังสีเอกซ์พบว่าจะใช้พลังงานการฉายรงสีไม่เหมาะสมแก่ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์นั้นแย่ลง ทั้งกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงที่ลดลง กระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้น และอายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง เนื่องจากการฉายรังสีที่พลังงานสูงไปส่งผลทำให้เกิดความเสียหายและจุดบกพร่อง (Defect) ในโครงสร้างอุปกรณ์ [13-14] ต่อมาได้มีนักวิจัยที่ทำการศึกษาหาพลังงานและเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสมแก่ตัวไดโอดพี-เอ็นพบว่าหลังการฉายรังสีที่พลังงานและเวลาเหมาะสมสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของไดโอดพี-เอ็น ค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 1000 เท่าเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสี และค่ากระแสรั่วไหลมีแน้วโน้มลดลง นอกจากนี้ค่าตัวแปรอื่น ได้แก่ ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance) ก็มีค่าลดลงเช่นกัน [15-17] ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการฉายรังสีเอกซ์ออกมาอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับการฉายรังสีเอกซ์

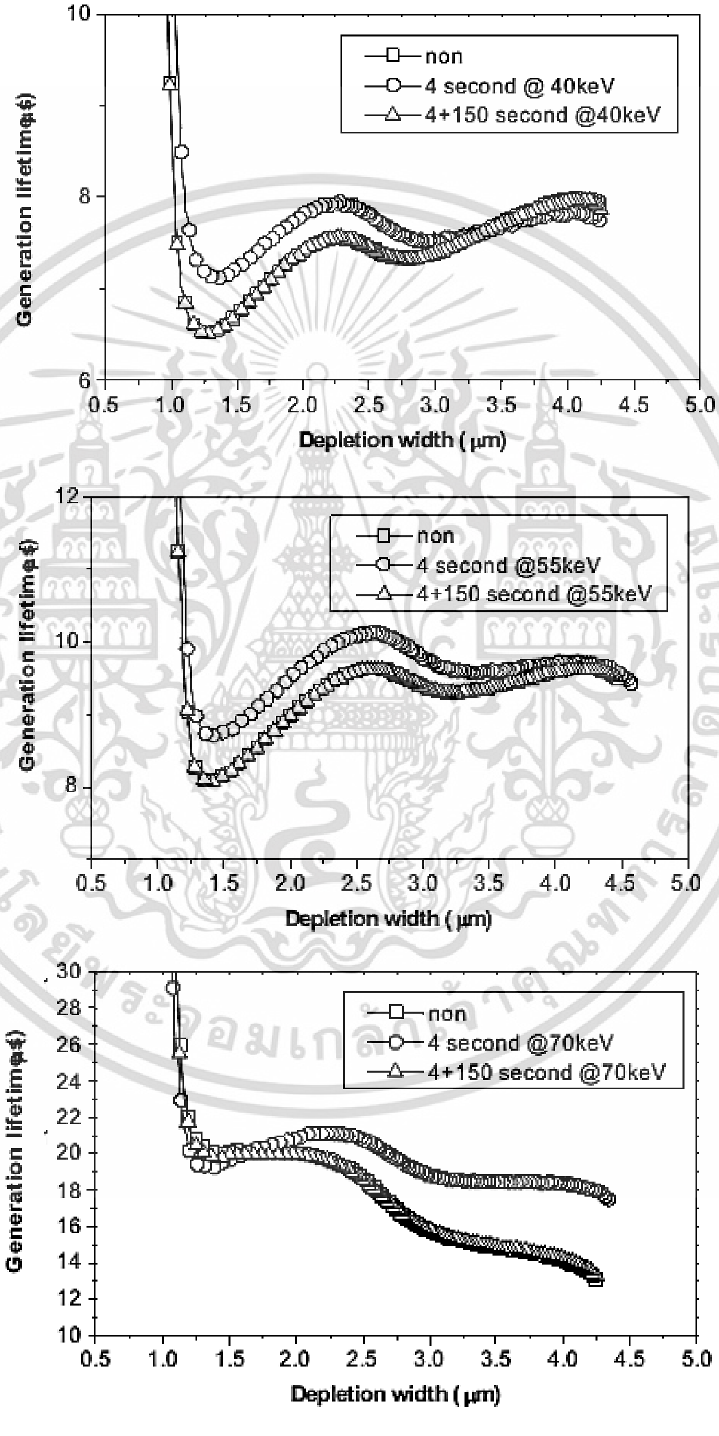
ปี ค.ศ. 2010 เป็นบทความที่ศึกษาอายุการเกิดของพาหะ (Generation lifetime) ของตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์เรย์รอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังการฉายารังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 40, 55 และ70 keV ที่เวลาการฉาย 4 และ 150 วินาที จากการทดลองพบว่าอายุการเกิดของพาหะเพิ่มขึ้นทุกค่าพลังงานที่เวลาการฉาย 4 วินาที โดยที่พลังงาน 70 keV เพิ่มมากที่สุดดังรูปที่ 1.1 และยังพบว่าที่พลังงานและเวลาเดียวกันนี้กระแสรั่วไหลมีแนวโน้มลดลงอีกด้วย [18]

ปี ค.ศ. 2011 ในบทความนี้ได้มีการศึกษาผลของการแอนนีลด้วยรังสีเอกซ์ต่อค่าความต้านทานอนุกรมของไดโอดกำลังรอยต่อพี-เอ็น ในการทดลองใช้พลังงานการฉายรังสีเอกซ์ 70 keV ที่เวลาแต่แตกต่างกันคือ 5, 55 และ 205 วินาที ผลการศึกษาพบว่า ไดโอดหลังการฉายรังสีมีกระแสทางด้านแรงดันไบอัสตรงเพิ่มขึ้นประมาณ 1000 เท่า แต่ทางด้านกระแสรั่วไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 1.2 ส่วนค่าความต้านทานอนุกรมก็มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน [19]

ในปีเดียวกันมีบทความการทดลองที่ศึกษาลักษณะสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอด พี-เอ็น หลังใช้วิธีการแอนนีลโดยการฉายรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ ในการทดลองใช้พลังงานการฉายรังสี 40 keV ปริมาณความเข้มของรังสี คือ $7 \times 10^4$, $7.8 \times 10^5$ และ $2.9 \times 10^6$ เรินท์เก้น ที่พลังงาน 55 keV ปริมาณ

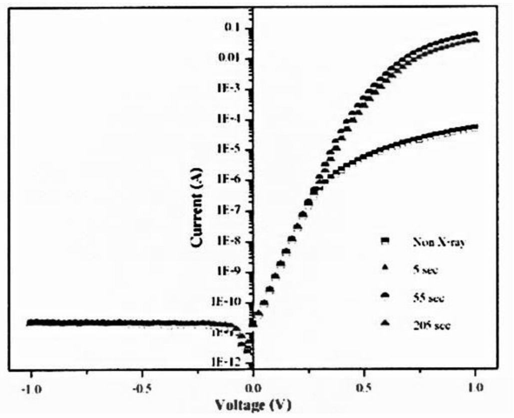
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มของรังสี คือ $4.7\text{x}10^{5}$, $5.4\text{x}10^{6}$ และ $1.9\text{x}10^{7}$ เรินท์เก้น และ 70 keV ปริมาณความเข้มของรังสีคือ $4.9\text{x}10^{6}$, $5.4\text{x}10^{7}$ และ $2\text{x}10^{8}$ เรินท์เก้น ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าหลังจากการฉายรังสีทั้งสามพลังงานมีค่ากระแสที่แรงดันไบอัสตรงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนทางด้านไบอัสกลับพบว่าที่พลังงาน 70 keV มีแนวโน้มกระแสรั่วไหลมีค่าลดลงดังรูปที่ 1.3 ตามลำดับ ส่วนค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง [20]

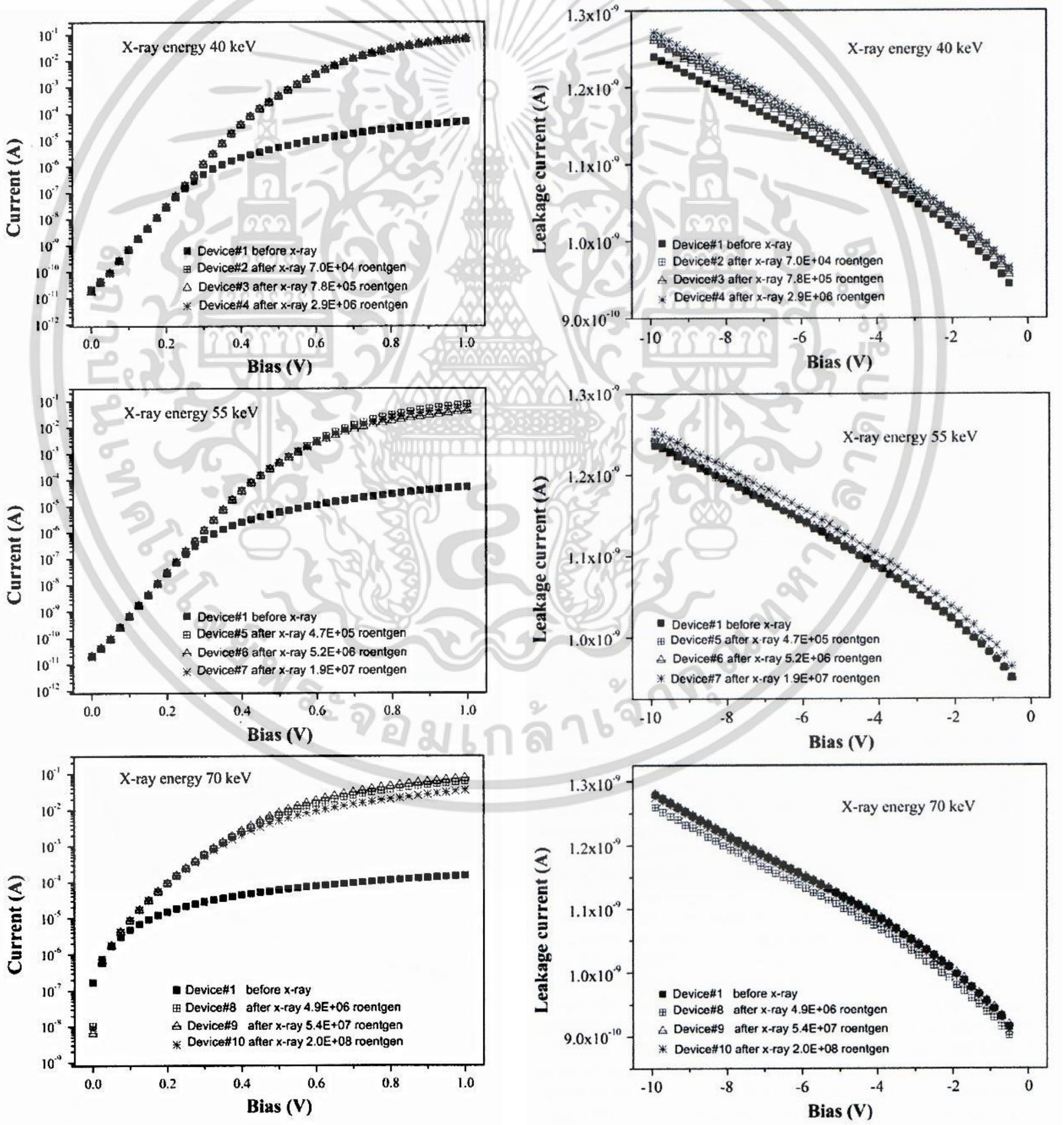



**รูปที่ 1.1** ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเกิดพาหะกับบริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์รอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงานและเวลาต่างๆ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



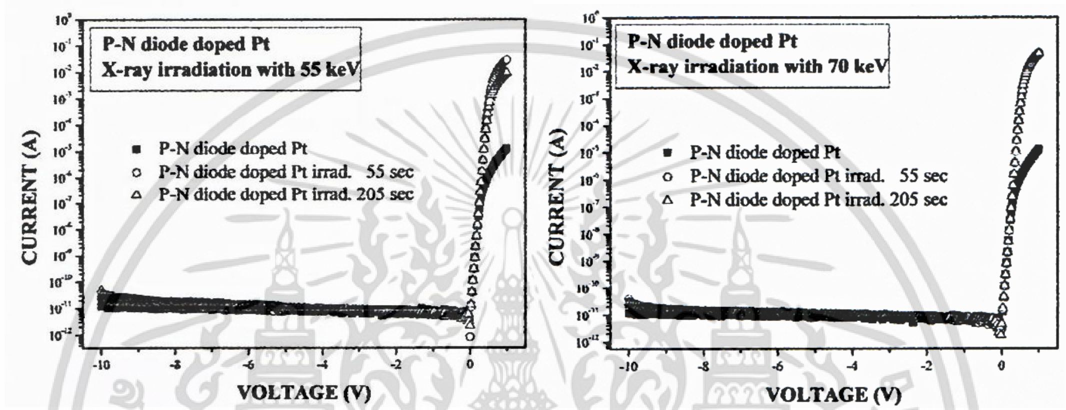

**รูปที่ 1.2** ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดกำลังรอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keVที่เวลา 5, 55 และ 205 วินาที [19]




**รูปที่ 1.3** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของพี-เอ็นไดโอดก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 40, 55 และ 70 keV [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี ค.ศ. 2012 ก็มีบทความออกมาอย่างต่อเนื่องในบทความนี้เป็นการปรับปรุงกระแสทางด้านไบอัสตรงของของไดโอดพี-เอ็นโดยการใช้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ ในการทดลองใช้พลังงานการฉายรังสี 55 และ 70 keV ที่เวลาการฉายรังสี 55 และ 205 วินาที จากการทดลองพบว่า ทั้งสองค่าพลังงานและเวลาการฉายรังสีมีค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีเอกซ์ช่วยปรับปรุงกระแสด้านไบอัสตรงของไดโอดพี-เอ็นได้ ดังรูปที่ 1.4 ในบทความนี้ยังคำนวณหาค่าอายุการรวมตัวของพาหะ (Recombination lifetime) ซึ่งจะมีค่าลดลงจากก่อนฉายรังสีโดยที่พลังงาน 55 และ 70 keV เวลาการรวมตัวลดลงจาก 55 μs เป็น 45 และ 48 μs ตามลำดับ [21]




**รูปที่ 1.4** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของไดโอดพี-เอ็นก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 55 และ 70 keV ที่เวลา 55 และ 205 วินาที [21]

จากงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวไว้หลังจากไดโอดพี-เอ็นได้รับพลังงานและเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสมแล้วจะทำให้ค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มที่กระแสรั่วไหลลดลงเช่นกัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะใช้เทคนิควิธีการฉายรังสีเอกซ์มาศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยเริ่มจากการหาพลังงานและเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสมสำหรับแก่ตัวช็อตต์กีไดโอด จากนั้นจะทำการศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และตัวแปรอื่นๆ ที่ได้รับผลกระทบจากการฉายรังสีต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ ได้อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการนำเสนอการศึกษาผลของการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงต่อช็อตต์กีไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมโครงสร้าง Cr/n-Si โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาตามลำดับดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาผลของการแพร่อะตอมแพลตทินัมที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อศึกษาหาค่าพลังงานการฉายรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมแก่ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมซึ่งการทดลองจะใช้พลังงานฉายรังสีที่ 40, 55, 70 และ 85 keV ด้วยเวลา 55 วินาทีเท่ากัน
3. เพื่อศึกษาเวลาการฉายรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมแก่ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม ซึ่งจะแบ่งเวลาการฉายออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 5, 55 และ 105 วินาที
4. เพื่อศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมอันได้แก่ กระแสรั่วไหล ($I_{leak}$), กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ($I_0$), แรงดันภายใน ($V_{bi}$), กำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ($\phi_{bn}$), ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ($W$), ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ($N_D$), ความต้านทานอนุกรม ($R_S$), พลังงานกระตุ้น (Activation energy : $E_A$) และแฟคเตอร์อุดมคติ (Ideality factor : $n$)

## 1.3 หลักการทางทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยและสมมติฐานของการศึกษา

เนื่องจากแพลตทินัมเป็นอะตอมสารเจือระดับลึก (Deep impurity) มีสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) สูง ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณของแพลตทินัมในซิลิคอนได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิเมื่อแพร่อะตอมแพลตทินัมเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น อะตอมแพลตทินัมจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอะตอม (Interstitial) ของซิลิคอนโดยไม่มีพันธะใดๆยึดกับอะตอมซิลิคอนหลังทำการแพร่จะเกิดระดับพลังงานระดับลึกในช่องว่างแถบพลังงานของซิลิคอนอยู่ 2 ระดับพลังงานคือ ระดับพลังงานผู้รับ (Acceptor level) ซึ่งจะอยู่ต่ำลงมาจากแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ประมาณ 0.23 eV จะทำหน้าที่ดักจับ (Trap) อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้าตกลงมาในระดับพลังงานผู้รับแบบลึก ด้วยเหตุนี้จะทำให้กระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดมีปริมาณลดลง และส่งผลต่อกระแสทางด้านแรงดันไบอัสตรงมีปริมาณลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีระดับพลังงานผู้ให้ (Donor level) จะอยู่สูงจากระดับวาเลนซ์ (Valence band) ขึ้นไปประมาณ 0.32 eV [22-23] ดังนั้นอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก จะรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ทำให้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ลดลง [24] ทำให้ค่าสภาพต้านทานเพิ่มขึ้น และกระแสทางด้านไบอัสตรงมีค่าลดลงเช่นกัน ในกรณีแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระดับพลังงานผู้รับจะมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์มากกว่าชนิดพี ทั้งนี้เกิดจากช็อตต์กีย์ไดโอดจะใช้พาหะส่วนมากในการนำไฟฟ้า ซึ่งแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้พาหะส่วนมากจะเป็นอิเล็กตรอนนั่นเองจากการที่แพลตทินัมทำให้กระแสทางด้านไบอัสตรงของช็อตต์กีย์ไดโอดลดลงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะปรับปรุงกระแสทางส่วนนี้ และจากบทความงานวิจัยเกี่ยวกับการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงานและเวลาที่เหมาะสมพบว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของไดโอดทำให้ได้กระแสทางด้านแรงดันไบอัสตรงเพิ่มขึ้น และกระแสรั่วไหลมีแนวโน้มลดลงดังที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจใช้เทคนิควิธีการฉายรังสีเอกซ์มาปรับปรุงข้อบกพร่องของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยหวังว่ารังสีเอกซ์ที่ทำการฉายด้วยพลังงานและเวลาที่เหมาะสมแก่ตัวช็อตย์กีย์ไดโอด จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในตัวช็อตต์กีย์ไดโอดลดจุดบกพร่อง (Defect) ที่เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือ หรือจุดบกพร่องในเนื้อซิลิคอน ทำให้ความต้านทานอนุกรมลดลง กระแสทางด้านไบอัสตรงมีปริมาณเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถช่วยลดปริมาณกระแสรั่วลงได้อีก หากสมมติฐานนี้เป็นจริงจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นที่ใช้ลักษณะขั้วเป็นช็อตต์กีย์ไดโอดและต้องการกระแสรั่วไหลที่ต่ำเช่น ตัวตรวจวัดแสง หรือตัวตรวจวัดก๊าซ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพได้การใช้งานให้ดียิ่งขึ้นได้อีกด้วย

## 1.4 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

จากวัตถุประสงค์และสมมติฐานการวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษาผลของการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงต่อช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมโดยหวังว่ารังสีเอกซ์จะช่วยปรับปรุงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนการฉายรังสีเอกซ์ โดยทำการแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 30 นาที บนฐานรองซิลิคอน Czochralski silicon (CZ) ชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานแผ่น 5 Ω.cm และสร้างขั้วโลหะโครเมียม (Cr) มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 1 $mm^2$ส่วนที่สองจะศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังการฉายรังสีเอกซ์ โดยเริ่มจากการหาค่าพลังงานการฉายที่เหมาะสมในการทดลองจะแบ่งพลังงานการฉายรังสีเป็น 4 กลุ่ม คือ 40, 55, 70 และ 85 keV จากนั้นจะดูลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของพลังงานที่เหมาะสมที่สุดมาทำการหาเวลาการฉายรังสีที่แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 5, 55 และ 105 วินาที เมื่อได้ค่าพลังงานและเวลาการฉายรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมแล้ว จะทำการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของช็อตต์กีย์ไดโอดไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงานและเวลาที่ได้เลือกจากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากรังสีเอกซ์ เช่น กระแสรั่วไหล, กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์, กำแพงศักย์ช็อตต์กีย์, แรงดันภายใน, ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ, ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ, ความต้านทานอนุกรม, พลังงานกระตุ้นและแฟคเตอร์อุดมคติ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น
2. ความรู้ความเข้าใจในลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอด
3. ความรู้เกี่ยวกับผลของการแพร่อะตอมแพลตทินัมที่มีต่อช็อตต์กีย์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความรู้เกี่ยวความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิควิธีการฉายรังสีเอกซ์
5. ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม
6. ความรู้เกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังการฉายรังสีเอกซ์

## 1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับผลของการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงที่มีต่อช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** บทนำ เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาของช็อตต์กีย์ไดโอด อะตอมสารเจือแพลตทินัมและแนวความคิดที่จะใช้เทคนิควิธีการฉายรังสีเอกซ์เข้ามาช่วยปรับปรุงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหัวข้อถัดมาเป็นวัตถุประสงค์หลักการทางทฤษฎีที่ใช้และสมมติฐาน ขอบเขตของงานวิจัย และส่วนสุดท้าย คือ ขั้นตอนของการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยในครั้งนี้

**บทที่ 2** ทฤษฎี เป็นการกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับรังสีเอกซ์ ทฤษฎีรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ทฤษฎีเกี่ยวกับจุดบกพร่องลักษณะต่างๆ คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม ระดับพลังงานของแพลตทินัมในซิลิคอน สภาพต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม การควบคุมช่วงอายุพาหะของแพลตทินัม

**บทที่ 3** กระบวนการสร้างและการทดลอง ในส่วนนี้ได้กล่าวเทคโนโลยีการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมในแต่ละขั้นตอน ได้แก่ การสร้างกระจกต้นแบบ เทคนิคการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน เทคนิคกระบวนการไอออนอิมแพลนเทชัน เทคนิคการสร้างและการแพร่อะตอมแพลตทินัมเทคนิคการสร้างลวดลายขั้วด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเทคนิคการสร้างชั้นโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง จนกระทั่งเสร็จสิ้นทุกกระบวนการสร้าง

**บทที่ 4** การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยกล่าวถึงผลของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ อันได้แก่ กระแสรั่วไหล กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์แรงดันภายในกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ความต้านทานอนุกรม พลังงานกระตุ้นและแฟคเตอร์อุดมคติ

**บทที่ 5** สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการกล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะที่เกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2

# ทฤษฎี

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซ็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม ซึ่งในบทนี้จะเสนอหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องได้แก่ ทฤษฎีรังสีเอกซ์ กลไกการตรวจวัดทางรังสีจุดบกพร่องในผลึกสมบัติต่างๆของแพลตทินัม (Pt) คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมทฤษฎีรอยสัมผัสซ็อตต์กีย์และหลักการทำงาน รวมถึงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของพื้นฐานของรอยสัมผัสซ็อตต์กีย์ ได้แก่ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (I-V characteristics) ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V characteristics) เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ผลการทดลองในบทที่ 4 ต่อไป

## 2.1 รังสีเอกซ์

### 2.1.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ (X-Ray) ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1895 โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ วิลเฮม คอนราดเรินท์เก้น (Willhem ConardRöntgen) ได้พบรังสีนี้โดยบังเอิญภายในห้องทดลองที่มหาวิทยาลัยวู๊ซบรูค (Wiurzburg) ประเทศเยอรมัน [25-26] ในขณะที่เขากำลังทำการทดลองเกี่ยวกับการดูดกลืนของหลอดรังสีแคโทดในห้องมืดสนิทโดยใช้หลอดทดลองที่เรียกว่า “Crooke’s tube” เขาสังเกตเห็นว่าหลอดรังสีแคโทด (Cathode) ทำให้กระดาษแข็งที่เคลือบด้วยสารแบเรียมบลาติโนไซยาไนด์ (Barium platinocyanide) เกิดการเรืองแสงขึ้นโดยระยะไกลสุดที่เกิดการเรืองแสงบนกระดาษแข็งคือ 120 cm ในขณะเดียวกันเขาสังเกตเห็นตัวอักษร “A” ที่เคลือบสารแบเรียมบลาติโนไซยาไนด์ที่อยู่ห่างออกไปเกือบ 20 ft ก็เกิดการเรืองแสงขึ้นด้วยทั้งที่ไม่ได้อยู่ในระยะของหลอดรังสีแคโทด ทำให้เขาคิดว่าจะต้องมีรังสีบางอย่างเกิดขึ้นจากหลอดรังสีแคโทดและมีอำนาจทะลุผ่านสูงจนสามารถผ่านผนังหลอดแคโทดไปยังวัตถุที่เคลือบสารแบเรียมบลาติโนไซยาไนด์แล้วเกิดการเรืองแสงขึ้นได้ ดังนั้นเรินท์เก้นจึงประกาศว่าเขาเป็นผู้ค้นพบรังสีชนิดใหม่ และให้ชื่อว่า “รังสีเอกซ์” จากนั้นเขาใช้เวลาอีกหลายสัปดาห์ทำการสังเกตศึกษาการทะลุทะลวง (Penetration) ของรังสีเอกซ์ผ่านกระดาษ หนังสือไม้ โลหะ รวมถึงคนด้วย ซึ่งเขาได้ถ่ายภาพรังสีของมือภรรยาเขาเป็นภาพแรกอีกด้วย เรินท์เก้นจึงได้รับการประกาศว่าเป็นผู้ค้นพบรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือมหัศจรรย์ทางการแพทย์ (Medical miracle) และได้รับรางวัลโนเบล (Nobel prize) สาขาฟิสิกส์เป็นคนแรก ในปี 1901

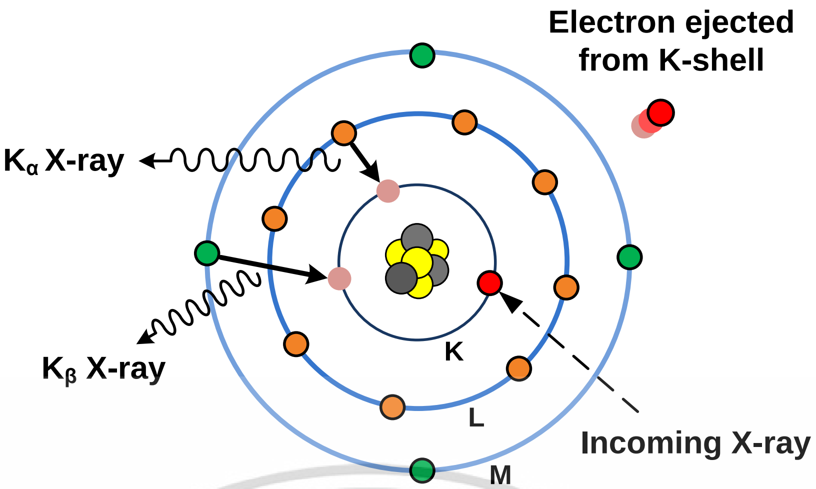
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 2.1** วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น ผู้ค้นพบรังสีเอกซ์เป็นคนแรก และภาพถ่ายมือภรรยาเขาซึ่งเป็นภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ภาพแรก

**2.1.2 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์**

ทฤษฎีอิเล็กตรอนในปัจจุบันได้อธิบายการเกิดรังสีเอกซ์ว่า ธาตุต่างๆ ประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากในแต่ละอะตอมมีนิวเคลียสเป็นศูนย์กลาง และมีอิเล็กตรอนโคจรอยู่เป็นระดับชั้นรอบนิวเคลียสธาตุที่มีเลขมวลน้อยจะมีระดับวงโคจรของอิเล็กตรอนอยู่น้อย ส่วนธาตุที่มีเลขมวลมากจะมีระดับวงโคจรของอิเล็กตรอนหลายระดับอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นของวงโคจรจะมีพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ที่ได้รับจากนิวเคลียสแตกต่างกัน อิเล็กตรอนวงในที่อยู่ใกล้นิวเคลียส จะได้รับพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่าอิเล็กตรอนวงนอก เมื่ออะตอมธาตุมวลมากถูกยิงด้วยรังสีเอกซ์, รังสีแกมมา ($\gamma$) [27], อิเล็กตรอน (Electron) หรือโปรตอน (Proton) ไปยังอะตอมของธาตุจะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ยังระดับวงโคจรเดิม พร้อมกับคายพลังงานออกมาในรูปรังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและในรูปความร้อนดังแสดงรูปที่ 2.2 ถ้าอนุภาคที่ยิงเข้าไปมีพลังงานมาก เมื่อชนเข้ากับอิเล็กตรอนวงโคจรชั้นในใกล้นิวเคลียสแล้วทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกมาวงโคจรด้านนอก เมื่ออิเล็กตรอนตกกลับลงไปจะทำให้ได้รังสีที่มีพลังงานมาก เรียกว่า ฮาร์ดเอกซ์เรย์ (Hard x-ray) ถ้าอนุภาคที่ใช้ยิงมีพลังงานน้อย จะให้รังสีที่เรียกว่า ซอฟต์เอกซ์เรย์ (Soft x-ray)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.2** กลไกการเกิดรังสีเอกซ์

การเกิดรังสีเอกซ์โดยธรรมชาติหรือโดยมนุษย์สร้างขึ้นนั้นมีอยู่ 2 วิธีหลักๆ ได้แก่

1. การเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนด้วยความต่างศักย์สูงเพื่อให้อิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงเคลื่อนที่ชนเป้าโลหะ เช่น ทังสเตน (W) ส่งผลทำให้เกิดรังสีเอกซ์และความร้อน ซึ่งใช้องค์ประกอบที่สำคัญ 5 ประการ คือ

1) ทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอน หรือการแยกอิเล็กตรอนออกจากอะตอมของโลหะ

อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นหรือแยกออกจากอะตอมของโลหะที่ทำเป็นไส้หลอดรังสีเอกซ์โดยการผ่านกระแสเข้าไปในไส้หลอด (Filament) จนไส้หลอดมีอุณหภูมิประมาณ 2000$^{\circ}$C หรือมากกว่า จะทำให้เกิดการปลดปล่อยทางความร้อน (Thermionic emission) อิเล็คตรอนเมื่อได้รับพลังงานมากพอจะถูกกระตุ้นหลุดออกจากวงโคจรเดิมและรวมตัวกันอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของโลหะจนกลายเป็นกลุ่มเรียกว่า Space charge (สาเหตุที่อิเล็กตรอนไม่สามารถหลุดไปจากผิวโลหะได้นั้นเนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของโลหะนั่นเอง)

2) การทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

วิธีที่ทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมได้ จำเป็นต้องหาสิ่งที่มีพลังงานหรือแรงดึงดูดมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนด้วยกันและมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอะตอมโลหะกับอิเล็กตรอน นั่นคือไฟฟ้าแรงดันสูงความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดยิ่งมากยิ่งทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวหน้าของไส้หลอกได้มากขึ้นเท่านั้น และเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงขึ้นโดยที่ความต่างศักย์ 100 keV จะทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วประมาณ 165 km/s

3) การทำให้เส้นทางที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านไม่มีสิ่งกีดขวาง

การที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้จะต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง ดังนั้นภายในหลอดรังสีเอกซ์จึงเป็นสุญญากาศเพราะถ้ามีอากาศหรือก๊าซอยู่ภายในหลอดจะทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากเกิดการไอออไนเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้ม

เป็นการใช้เครื่องมือเพื่อควบคุมให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันคือพุ่งไปหาจุดโฟกัสของเป้าซึ่งเครื่องมือนั่นเรียกว่า เครื่องบังคับลำอิเล็กตรอน (Electron focusing device)

5) การทำให้อิเล็กตรอนหยุดวิ่งอย่างทันทีทันใด

การที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งด้วยความเร็วสูงจากการเร่งด้วยความต่างศักย์หยุดอย่างทันทีทันใดทำได้โดยนำวัตถุมากั้น ซึ่งวัตถุนั้นคือเป้าโลหะผลที่เกิดขึ้นจากการชนคือ อะตอมของเป้าโลหะจะถูกชนจนอิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร และมีอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรอื่นถัดไปเข้ามาแทน แต่เนื่องจากพลังงานในแต่ละวงโคจรไม่เท่ากัน จึงมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์และความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นความร้อน กล่าวคือพลังงานงานของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่วิ่งไปสู่เป้าจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน 99.8 % และอีก 0.2 % จะเป็นรังสีเอกซ์

ซึ่งตัวอย่างอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์แบบวิธีแรกนี้ คือ เครื่องฉายรังสีเอกซ์ที่ใช้งานกันทั่วไปในโรงพยาบาลและในโรงงานอุตสาหกรรม

2. การเกิดรังสีเอกซ์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอน หรือโปรตอน อย่างมีความเร่ง คือ เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้นแล้วจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างห้ามไม่ได้ ซึ่งถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมามีความถี่สูงพอก็จะเป็นรังสีเอกซ์ วิธีนี้เป็นวิธีที่นักวิทยาศาสตร์นิยมใช้ในการผลิตรังสีเอกซ์ในห้องทดลองวิทยาศาสตร์

### 2.1.3 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอกซ์

1. รังสีเอกซ์เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงคลื่นสั้นมีความยาวคลื่นประมาณ 0.01 ถึง 100 Å ตรงกับความถี่ในช่วง 30 ถึง 30,000 PHz หรืออยู่ในช่วงระหว่างรังสีแกมม่าและรังสีอัลตราไวโอเลต

2. มีคุณสมบัติเหมือนกับแสงสว่างธรรมดา เช่นเดินทางเป็นเส้นตรง ความเร็วการเดินทางในสุญญากาศมี ความเร็วเท่ากับแสงคือ $3.8\times10^{8}$ m/s นอกจากนี้แล้วยังมีการสะท้อนกลับ การหักเหและเบี่ยงเบนได้เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา

3. ไม่หักเหโดยสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก

4. เกิดจากอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนเป้าโลหะหนัก อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่นๆที่อยู่ในวงโคจรของอะตอมโลหะหนัก ทำให้หลุดออกมานอกวงโคจร

5. ทำให้เกิดการเรืองแสงในสารพิเศษบางอย่าง

6. ดูดกลืนโดยสสารทุกชนิด มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและน้ำหนักอะตอมของสารนั้น

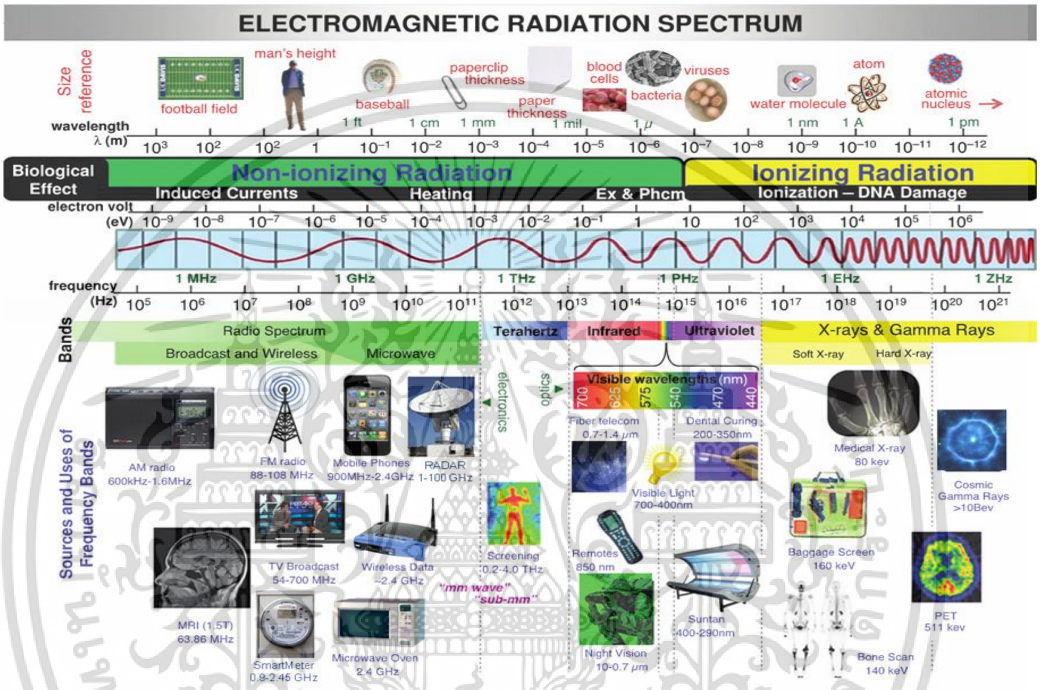
7. ทำให้เกิดการไอออไนเซชัน (Ionization) เมื่อผ่านไปในอากาศหรือก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่นเมื่อรังสีเอ็กซ์ไปถูกฟิล์มถ่ายรูป จะเกิดปฏิกิริยาทำให้ฟิล์มมีสีดำ จึงได้นำผลจากปฏิกิริยานี้มาใช้ในการบันทึกภาพลงบนแผ่นฟิล์ม

9. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวะ เช่นทำให้เซลล์ของร่างกายมีการเปลี่ยนแปลง หรือเกิดการผ่าเหล่า (Mutation) ถ้าได้รับรังสีเป็นจำนวนมากและนานพอ

10. มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง สามารถผ่านเนื้อมนุษย์ และสัตว์ได้ แต่ไม่สามารถผ่านตะกั่วหรือคอนกรีตหนาๆได้




รูปที่ 2.3 แผนภูมิคุณสมบัติโดยทั่วไปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

## 2.2 หน่วยการวัดปริมาณรังสี

ชื่อเฉพาะที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้บอกขนาดและปริมาณของสิ่งต่างๆ คือ “หน่วย” ซึ่งหน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสีมีดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 2.1** หน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสี

| ปริมาณ | หน่วยที่ใช้เดิม | หน่วยใหม่ (SI unit) |
|---|---|---|
| กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) | คูรี (Ci) | เบคเคอเรล (Bq) |
| รังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed dose) | แรด (Rad) | เกรย์ (Gy) |
| รังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure) | เรินท์เก้น (R) | คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg) |
| รังสีสมมูล (Dose Equivalent) | เรม (Rem) | ซีเวิร์ต (Sv) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดหน่วยของปริมาณที่กล่าวมาข้างต้น ในการวัดค่ารังสีเพื่อกำหนดปริมาณสามารถเปรียบเทียบผลได้โดยอาศัยการวัดค่าพื้นฐานตามคำจำกัดความของแต่ละหน่วย

**2.2.1 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี**

กัมมันตภาพรังสี เป็นการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ของธาตุและไอโซโทปบางส่วนที่สามารถเปลี่ยนแปลงตัวเองเป็นธาตุหรือไอโซโทปอื่น ส่งผลให้เกิดอนุภาคที่มีพลังงานหรือเกิดการแผ่รังสีขึ้น การวัดปริมาณไอโซโทปรังสีหรือปริมาณกัมมันตภาพรังสีขณะใดขณะหนึ่งจะวัดได้โดยวัดรังสีที่เกิดขึ้นในขณะนั้น หน่วยของปริมาณกัมมันตภาพรังสีเดิมอาศัยการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ ของธาตุเรเดียมหนัก 1 กรัม ซึ่งเท่ากับ $3.7 \times 10^{10}$ การสลายตัวต่อหนึ่งหน่วยวินาที (Disintegration per second) หรือเรียกว่า 1 คูรี (Ci)

$$1 \text{ คูรี (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ ครั้งต่อวินาที } (s^{-1}) \quad (2.1)$$

ในเวลาถัดมาได้เปลี่ยนมาใช้หน่วย SI unit โดยหน่วยจะใช้เป็น $s^{-1}$ และให้ใช้ชื่อเฉพาะว่า “เบคเคอเรล” (Bq) ดังนั้นจะได้ว่า

$$1 \text{ (Bq)} = 1 s^{-1} \text{ และ } 1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (2.2)$$

ปริมาณกัมมันตภาพรังสีเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดกลืนในอวัยวะและเนื้อเยื่อโดยเฉพาะอนุภาคแอลฟา ($\alpha$) หรือ เบตา ($\beta$) เพราะอนุภาคทั้งสองเป็นอนุภาคที่มีการทะลุทะลวงต่ำแน่นอนว่าจะต้องถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้อวัยวะและเนื้อเยื่อในร่างกายทำให้เกิดอันตรายมากที่สุด

**2.2.2 ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน**

เป็นผลการดูดกลืนของรังสีต่อวัตถุต่างๆที่สามารถสังเกตเห็นได้ เช่น การที่แก้วหรือพลาสติกเปลี่ยนสีเมื่อนำไปฉายรังสี ซึ่งเกิดจากเนื้อแก้วได้ดูดกลืนพลังงานของรังสีเอาไว้ และเนื่องจากรังสีแต่ละชนิดมีความสามารถทะลุทะลวงผ่านวัตถุได้ไม่เท่ากันทำให้มีการถ่ายเทพลังงานให้กับวัตถุแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นผลของรังสีต่อวัตถุจึงแปรผันตามปริมาณพลังงานรังสีที่วัตถุนั้นดูดกลืนไว้ (Absorbed dose) ตัวอย่างเช่น รังสีแอลฟาและรังสีเบตาจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับวัตถุในระยะทางจากผิวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โฟตอนพลังงานต่ำๆก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน ผลคือได้คือจะเกิดรอยไหม้ที่ผิวหนัง ถ้าเป็นโฟตอนพลังงานสูงหรือนิวตรอนพลังงานบางส่วนจะทะลุออกไปจากวัตถุและส่วนที่เหลือจะถูกดูดกลืนไว้ ซึ่งหน่วยของปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนเดิมจะใช้ “rad” (Radiation absorbed dose) ซึ่งเท่ากับพลังงานรังสีที่ถูกดูดกลืน 100 ergs ในวัตถุมวล 1 gm

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/gm} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันได้ใช้หน่วย SI unit เป็นมาตรฐาน โดยให้หน่วยของ absorbed dose จากหน่วยของพลังงานเป็น จูล (Joule) และหน่วยของมวลเป็น กิโลกรัม (kg) จะใช้เป็นชื่อเฉพาะว่า “เกรย์ (Gy)”

$$1\ \text{Gy} = 1\ \text{Jkg}^{-1} = 100\ \text{rads} \tag{2.4}$$

### 2.2.3 ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว

ปริมาณรังสีทีทำให้อากาศแตกตัว (Exposure) เป็นปริมาณรังสีที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลของรังสีเพียงแต่วัดว่ามีการแตกตัวของอากาศมาน้อยเพียงใด การวัดปริมาณรังสีทีทำให้อากาศแตกตัว เป็นที่นิยมเพราะเป็นวิธีที่มีความไวสูง และเป็นเทคนิคที่สามารถวัดค่าได้ถูกต้องน่าเชื่อถือ ซึ่งหน่วยเดิมของปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัวนี้ คือ “เรินเก้น” (Röntgen : R) ซึ่งเท่ากับปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศตัวให้ประจุไฟฟ้า 1 e.s.u. (Electrostatic unit) ในอากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ NTP (Normal Temperature and Pressure conditions) หรืออากาศมวล $1.293 \times 10^{-3}$ กรัม แต่ในปัจจุบันใช้หน่วย SI unit คือ คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg)

$$1\ \text{R} = 2.58 \times 10^{-4}\ \text{C/kg} \tag{2.5}$$

โดยที่ ประจุ 1 e.s.u. มีค่าเท่ากับ $3.335 \times 10^{-10}$

### 2.2.4 ปริมาณรังสีสมมูล

ปริมาณรังสีสมมูลเป็นหน่วยที่นำเอาผลทางชีววิทยาของรังสีเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยอาศัยค่า absorbed dose เฉลี่ยทั่วกลุ่มของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะร่วมกับ radiation weighting factor ($W_R$) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.2 ตามชนิดและพลังงานของรังสี ในการหาค่า dose equivalent ($H_T$) ของเนื้อเยื่อและอวัยวะต่างๆ ได้ดังนี้

$$H_T = S_R W_R \times D_{T \times R} \tag{2.6}$$

โดยที่ $D_{T \times R}$ เท่ากับ absorbed dose เฉลี่ยทั่วกลุ่มเนื้อเยื่อ หรืออวัยวะ (*T*) เนื่องจากรังสี (*R*) ค่า $W_R$ นี้มีความสัมพันธ์กับค่า relative biological effectiveness (RBE) ซึ่งอาศัยการเปรียบเทียบความเสียหายของเนื้อเยื่อเมื่อได้รับ absorbed dose จากรังสีต่างชนิดและต่างพลังงาน หน่วยเดิมของ dose equivalent คือ “rem” มีค่าเท่ากับ absorbed dose (rad) x $W_R$ ในปัจจุบันใช้หน่วยในระบบ SI unit คือ “ซีเวิร์ต” (Sv) และมีค่าเท่ากับ absorbed dose (Gy) x $W_R$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$1\ \text{ซีเวิร์ต (Sv)} = 100\ \text{เรม (rem)} \tag{2.7}$$

หน่วยของซีเวิร์ต (Sv) เป็นหน่วยใหญ่ ค่าปริมาณรังสีส่วนมากจะเป็นมิลลิซีเวิร์ต (mSv)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 พลังงานของรังสี

พลังงานของรังสี (Energy) มีหน่วยเป็น “อิเล็กตรอนโวลต์” (Electronvolt) หรือ eV พลังงาน 1 eV โดยทั่วไปจะใช้หน่วยเป็นจำนวนเท่าของ eV ได้แก่ kiloelectronvolt (keV) และ megaelectronvolt (MeV)

1 keV = 1000 eV, 1 MeV = 1000 keV

6,200 billion MeV = 1 joule

1 joule per second = 1 Watt

โดย Watt เป็นหน่วยของกำลัง ซึ่งเป็นหน่วยเทียบเท่าของพลังงานต่อเวลา หรืองานต่อเวลาการฉายรังสี (Radiation exposure)

**ตารางที่ 2.2** ค่า radiation weighting factor ($W_R$)

| Type and energy range | Radiation weighting factor ($W_R$) |
|---|---|
| Photons, all energies | 1 |
| Electrons and mounds, all energies | 1 |
| Neutrons, energy < 10 keV<br>10 keV to 100keV<br>< 100 keV to 2 MeV<br>> 2 MeV to 20 MeV<br>> 20 MeV | 5<br>10<br>20<br>10<br>5 |
| Protons, other than recoil protons, energy > 2MeV | 5 |
| Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei | 20 |

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเสนอเงื่อนไขของการฉายรังสีเอกซ์ในรูปของพลังงาน (keV) และเวลาการฉายรังสีเป็นวินาที (s) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการเปลี่ยนค่าพลังงานของรังสีเป็นความเข้ม (Intensity) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

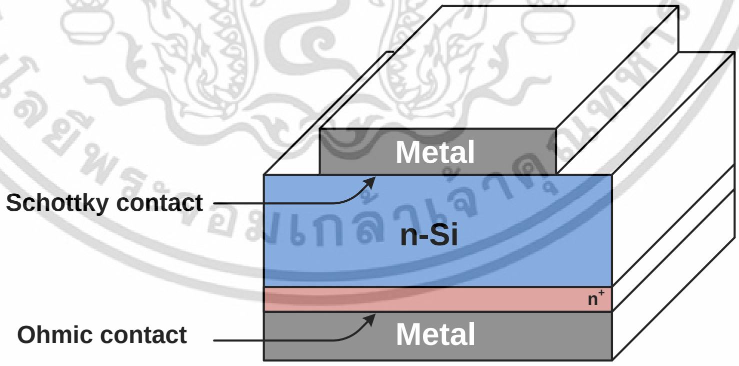
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Intensity\left(R\right)=\frac{(mA)s(keV)^2}{D^2} \quad (2.8)$$

โดยที่ $mA$ คือ กระแสที่ถูกป้อนให้หัวจ่ายรังสีเอกซ์
$S$ คือ เวลาในการฉายรังสีเอกซ์ (s)
$keV$ คือ พลังงานรังสีเอกซ์ (eV)
$D$ คือ ระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดรังสีและอุปกรณ์ (m)

## 2.3 รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (Metal-Semiconductor contact) เป็นรอยสัมผัสที่สำคัญมากกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิดเกิดจากการนำเอาโลหะ และสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันซึ่งสามารถแบ่งลักษณะของรอยสัมผัสได้ 2 ชนิด คือ รอยสัมผัสเรคทิไฟร์ (Rectifier contact) หรือรอยสัมผัสช็อตต์กีย์และรอยสัมผัสโอห์มิค (Ohmic contact) ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างตัวอุปกรณ์ภายในกับอุปกรณ์ภายนอกต่างๆ ซึ่งจะต้องมีความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมากๆโดยรอยสัมผัสจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของโลหะ (Work function : $\phi_M$ ), ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($\phi_S$ ) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity : $\chi$ ) ของสารกึ่งตัวนำที่มาสร้างเป็นรอยสัมผัส มีโครงสร้างอย่างง่ายดังรูป 2.4 เนื่องจากเป้าหมายของวิยานิพนธ์นี้ต้องการศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อช็อตต์กีย์ไดโอด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงขอถึงกล่าวเฉพาะรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นรอยสัมผัสแบบเรคทิไฟร์



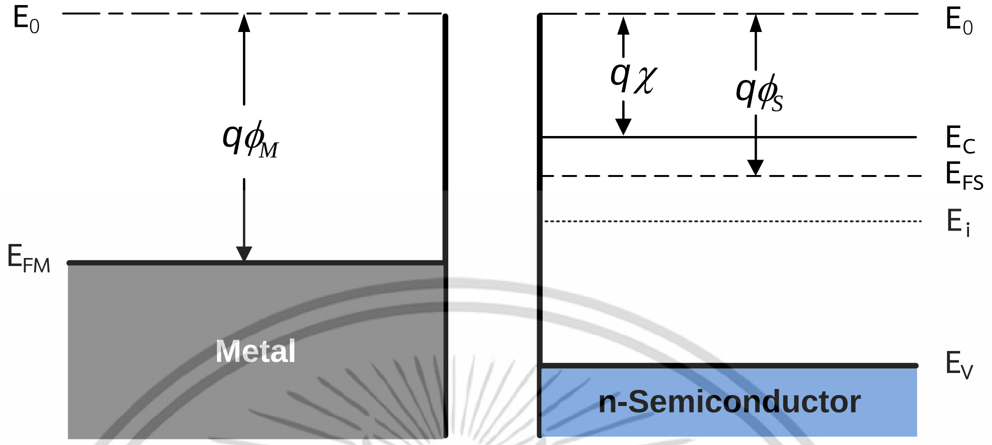

**รูปที่ 2.4** ภาคตัดขวางโครงสร้างอย่างง่ายของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์และรอยสัมผัสโอห์มิค

### 2.3.1 แถบพลังงานก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดการสัมผัสแสดงดังรูปที่ 2.5 ระดับสุญญากาศ (Vacuum level : $E_0$ ) คือระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน และนิยามได้ว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อสารของแข็ง และหยุดนิ่งที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือพลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ




**รูปที่ 2.5** แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์

ดังนั้นระดับพลังงาน $E_0$ จะมีค่าเท่ากับ 0 eV ในส่วนของโลหะ ระดับเฟอร์มิของโลหะ (Fermi level : $E_{FM}$) หรือค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่อยู่ภายในโลหะนั้น จะอยู่สูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ($E_C$) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงาน มีหน่วยวัดเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ เขียนแทนด้วย $q\phi_M$ ซึ่งหมายถึงพลังงานค่าน้อยที่สุดที่อิเล็กตรอนในโลหะต้องการเพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะนั้นๆ และเป็นอิสระโดยสมบูรณ์ มีค่าดังสมการที่ 2.9

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \tag{2.9}$$

ค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น แพลตทินัม มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 4.5 eV สำหรับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิจะอยู่ในช่องว่างพลังงานโดยอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน ($E_i$) และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานสุญญากาศและระดับเฟอร์มิ มีค่าดังสมการที่ 2.10

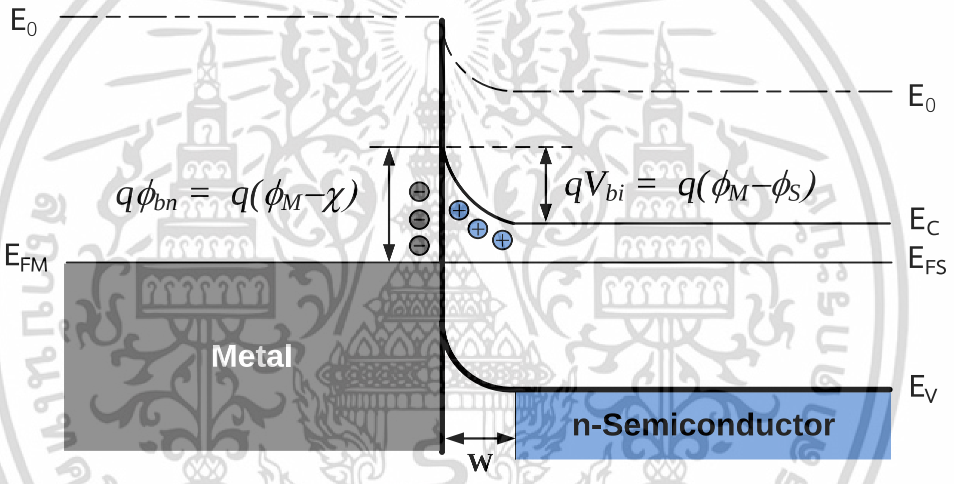
$$q\phi_S = E_0 - E_{FS} \tag{2.10}$$

ในสารกึ่งตัวนำความแตกต่างของพลังงานระดับสุญญากาศกับระดับนำไฟฟ้าถูกเรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้ และถูกนิยามว่าเป็นค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าต้องการเพื่อที่จะเคลื่อนที่ออกไปหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวภายนอกของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอนมีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้เท่ากับ 4.01 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.2 แถบพลังงานหลังเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ภาวะสมดุล**

การเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงเกิดมีการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D^+$ ) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในสภาวะสมดุลดังรูปที่ 2.6




**รูปที่ 2.6** แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์

ในสภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (Potential barrier : $qV_{bi}$ ) ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.11

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \tag{2.11}$$

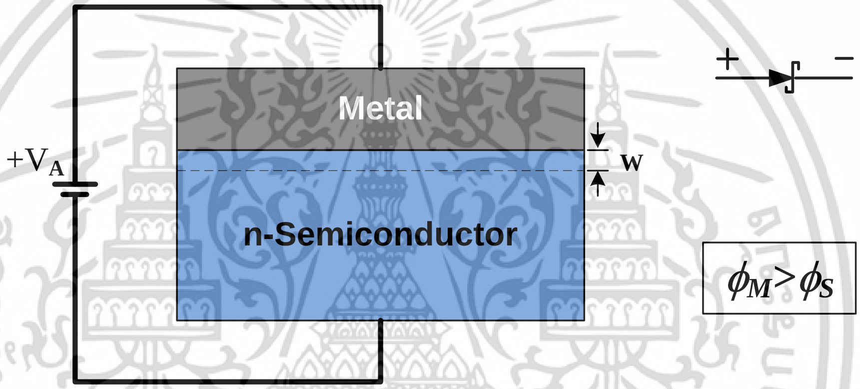
ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำเรียกว่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ มีค่าดังสมการที่ 2.12 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกันจะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ต่างๆกัน

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \tag{2.12}$$

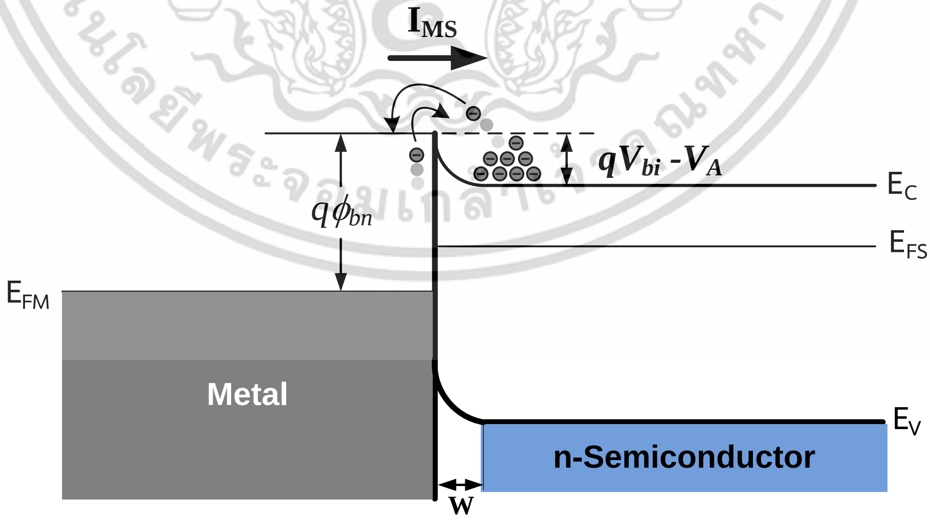
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.2.1 รอยสัมผัสช็อตต์กีย์กรณีได้รับแรงดันไบอัสตรง**

เมื่อให้แรงดันไบอัส ($V_A$) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น ($V_{bi} - V_A$) และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะเดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อตต์กีย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงช็อตต์กีย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล




(ก)




(ข)

**รูปที่ 2.7** (ก) การให้แรงดันไบอัสตรงและสัญลักษณ์ของช็อตต์กีย์ไดโอด
(ข) แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการที่ 2.13

$$I_F = AA^*T^2 e^{-\frac{q\phi_{bn}}{kT}} \left( e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \quad (2.13)$$

โดยที่ $A$ คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm$^2$)

$A^*$ คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน n-Si มีค่า 110 A.cm$^{-2}$.K$^{-2}$

$T$ คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$q$ คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602x10$^{-19}$ C

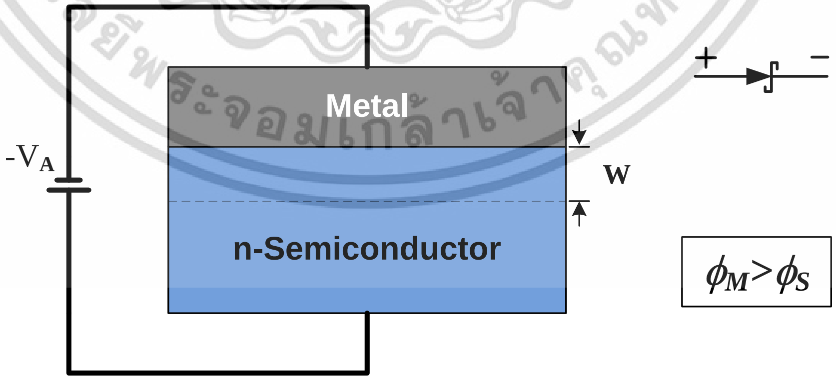
$\phi_{bn}$ คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์(eV)

$k$ คือ ค่าคงที่โบลต์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.617x10$^{-5}$eV/K

$V_A$ คือ แรงดันไบอัส (V)

### 2.3.2.2 รอยสัมผัสช็อตต์กีย์กรณีไบอัสย้อนกลับ

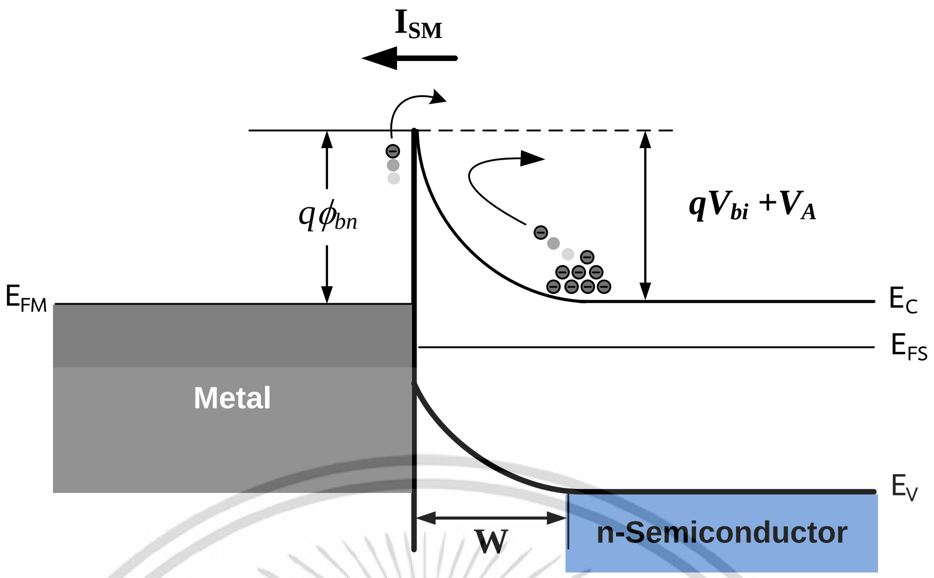
เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น ($V_{bi} + V_A$) และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล




(ก)

**รูปที่ 2.8** (ก) การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับและสัญลักษณ์ของช็อตต์กีย์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(ข)

**รูปที่ 2.8** (ต่อ) (ข) แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่าดังสมการที่ 2.14

$$I_R = AA^*T^2 e^{-\frac{q\phi_{bn}}{kT}} \quad (2.14)$$

โดยที่ $A$ คือ พื้นที่รอยสัมผัส ($cm^2$)

$A^*$ คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน n-Si มีค่า 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$

$T$ คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$q$ คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602\text{x}10^{-19}$ C

$\phi_{bn}$ คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ (eV)

$k$ คือ ค่าคงที่โบสต์มันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617\text{x}10^{-5}$ eV/K

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion width : $W_d$) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ 2.15 โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\varepsilon_s$ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

$q$ คือ ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C

$N_D$ คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

$V_{bi}$ คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ (V)

$V_A$ คือ แรงดันไบอัส (V)

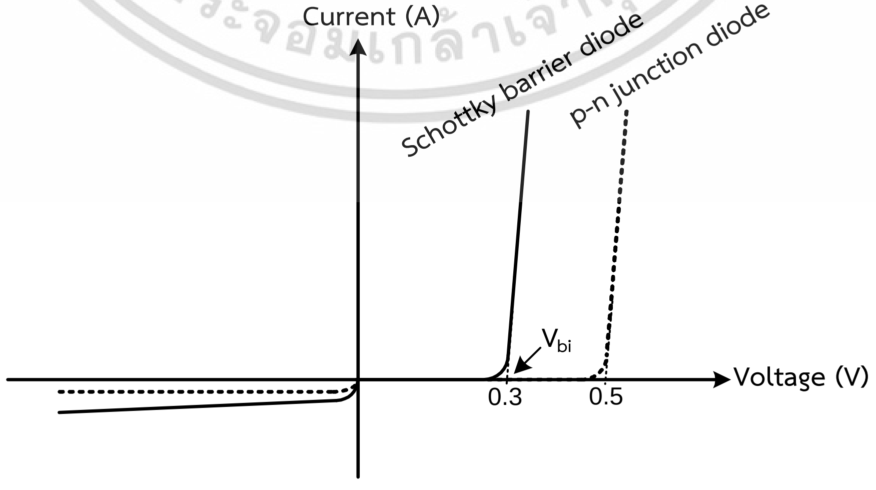
จากตัวอย่างข้างต้นสามารถสรุปคุณสมบัติของรอยสัมผัสในทางอุดมคติระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีที่ทำให้เกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ได้ดังตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** สรุปคุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำในทางอุดมคติที่ทำให้เกิดรอยสัมผัสช็อตต์กีย์หรือรอยสัมผัสเรคทิไฟร์ และรอยสัมผัสโอห์มิค

| ชนิดรอยสัมผัส | รอยสัมผัสเรคทิไฟร์ | รอยสัมผัสโอห์มิค |
|---|---|---|
| สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | $\phi_M > \phi_S$ | $\phi_M < \phi_S$ |

**2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์**

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสแบบเรคทิไฟร์ ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งจะยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวเมื่อได้รับการให้ไบอัสตรง แต่ถ้าให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสไหลผ่านน้อยมาก กราฟกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสนี้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.9 พบว่าแรงดันภายใน ($V_{bi}$) ของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์มีค่าต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น โดยส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ส่วนรอยต่อพี-เอ็นส่วนใหญ่ จะมีค่าประมาณ 0.5-0.7 V แต่กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์มีค่าสูงกว่ารอยต่อพี-เอ็น เป็นผลมาจากผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ค่ากระแสรั่วไหลมากกว่ารอยต่อพี-เอ็นประมาณ $10^4$ เท่า




**รูปที่ 2.9** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์และรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.4 การหาค่าตัวแปรของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ด้วยเทคนิคการประมาณค่าของ Cheung**

การคำนวณเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าจากสมการที่ 2.13 และ 2.14 ซึ่งเป็นสมการเบื้องต้นที่หาได้จากข้อกำหนดของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ในอุดมคติ และจะต้องทราบค่าตัวแปรต่างๆในสมการทั้งหมด ในทางปฏิบัติแล้วอาจเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยากที่จะหาตัวแปรได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ทำให้เกิดการคิดค้นเทคนิคการประมาณการหาค่าตัวแปรที่ต่างออกไปเพื่อต้องการให้ได้ค่ากระแสของรอยสัมผัสถูกต้องทั้งการให้ไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ในการประมาณค่าตัวแปรอย่างง่ายยกตัวอย่างเช่น การประมาณค่า $V_{bi}$ ที่แสดงในรูป 2.9 คำตอบที่ได้มาอาจเกิดการคลาดเคลื่อนไปจากการทดลองมาก ดังนั้นหากต้องการคำตอบที่มีความแม่นยำถูกต้องมากขึ้นและสามารถยอมรับได้นั้นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแปรจากการประมาณการจะต้องมีความถูกต้องมากขึ้น

การประมาณค่าตัวแปร โดยส่วนใหญ่จะมาจากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ซึ่งอาจรวมตัวแปรที่ส่งผลกระทบอื่นๆเข้าไปด้วย จากการศึกษาของ Norde [28] ในปี 1979 ได้ประมาณค่าตัวแปรโดยปรับปรุงและเพิ่มรูปแบบของสมการ แต่ยังคงยึดหลักการทำงานแบบเทอร์มิโอนิคอิมิสชัน (Thermionic emission) มาประยุกต์กับช็อตต์กีย์ไดโอดที่มีความต้านทานอนุกรมภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูง เนื่องจากผลกระทบจากความต้านทานอนุกรมมีค่าสูงทำให้ช่วงเชิงเส้นจากลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันมีค่าแคบลง ทำให้กระแสรั่วไหลที่ได้มีค่าความถูกต้องน้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้ความแม่นยำในการหาค่ากำแพงศักย์ ($\phi_{bn}$) ลดลงไปด้วยและ Norde สามารถแก้ปัญหานี้ได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากในสมการของ Norde กำหนดให้ค่าแฟคเตอร์ทางอุดมคติ (Ideality factor : $n$) = 1 จึงทำให้เกิดข้อจำกัดขึ้น และในทางปฏิบัติพบว่าค่าแฟคเตอร์ทางอุดมคติจะมีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นในปี 1985 Sato [29] ได้พิจารณาถึงข้อจำกัดนี้ และพยายามปรับปรุงสมการของ Norde ซึ่งสามารถพิจารณาช็อตต์กีย์ไดโอดที่มีค่าแฟคเตอร์ทางอุดมคติได้กว้างขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1 < $n$ < 2 ได้ แต่มีความยุ่งยากมากขึ้นเพราะว่าจะต้องทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิแตกต่างกันสองค่า ซึ่งปัญหานี้ได้ถูกแก้ไขโดย Cheung ในปี 1986 ได้นำเทคนิคการประมาณค่าตัวแปรจากลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันจากการให้ไบอัสตรงเพียงอุณหภูมิเดียวแล้วจัดให้อยู่ในเทอมของ $\frac{d(V)}{d(lnJ)}$ กับ $J$ และในเทอมของ $H(J)$ กับ $J$ ซึ่งเริ่มต้นพิจารณาจากสมการที่ 2.16 และค่าที่หาได้จะถูกต้องเมื่อ $V_D > \frac{3kT}{q}$ คือ

$$I = I_S \exp[\frac{q(V - IR_S)}{nkT}] \tag{2.16}$$

โดยที่ $I_S$ คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)

$V$ คือ แรงดันตกคร่อมไดโอดทั้งหมด ซึ่งรวมแรงดันตกคร่อมโอด ($V_D$) และแรงดันเนื่องจากความต้านทานอนุกรม ($IR$) ในสารกึ่งตัวนำ

$R_S$ คือ ความต้านทานอนุกรมภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ($\Omega$)

$n$ คือ แฟคเตอร์ทางอุดมคติ (Ideality factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการที่ 2.16 ให้อยู่ในเทอมของความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) จะได้ว่า

$$V = R_S AJ + n\phi_{bn} + (\frac{nkT}{q})\ln(\frac{J}{A^*T^2}) \tag{2.17}$$

จากนั้นทำการดิฟเฟอเรนทิเอท (differentiate) สมการที่ 2.17 เทียบกับ $J$ แล้วจัดเทอมใหม่ จะได้

$$\frac{d(V)}{d\ln(J)} = R_S AJ + \frac{nkT}{q} \tag{2.18}$$

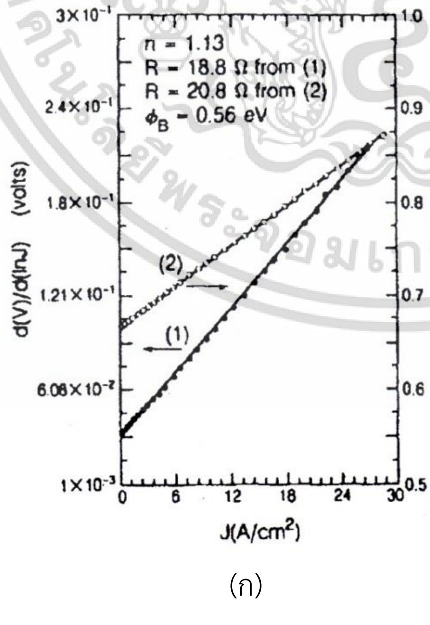
เมื่อนำไปเขียนกราฟระหว่าง $\frac{d(V)}{d(lnJ)}$ กับ $J$ จะได้ความชันเท่ากับ $R_S A$ และจุดตัดแกน y จะเท่ากับ $\frac{nkT}{q}$ ซึ่งจะทำให้เราทราบค่า $R_S$ และ $n$ และถ้าต้องการประมาณค่า $\phi_{bn}$ สามารถหาได้ในเทอมของ $H(J)$ กับ $J$

$$H(J) = V - (\frac{nkT}{q})\ln(\frac{J}{A^*T^2}) \tag{2.19}$$

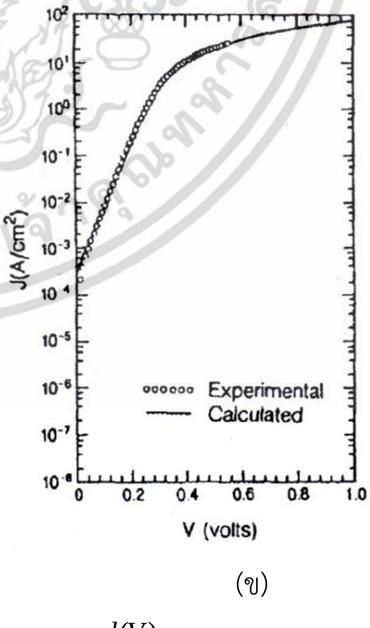
สมการที่ 2.19 เมื่อลดรูปสมการจะได้

$$H(J) = R_S AJ + n\phi_{bn} \tag{2.20}$$

จากสมการที่ 2.20 จะได้ความชันกราฟมีค่าเท่ากับ $R_S A$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $n\phi_{bn}$




(ก)




(ข)

**รูปที่ 2.10** รอยสัมผัสช็อตต์กีย์ของ W/GaAs (ก) กราฟในเทอม $\frac{d(V)}{d(lnJ)}$ กับ $J$ และ $H(J)$ กับ $J$

(ข) ผลจากการทดลอง เปรียบเทียบกับการคำนวณในเทอมของ $\ln J$ กับ $V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

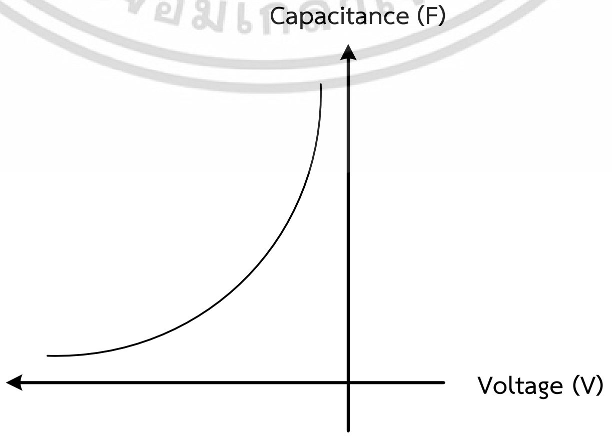
ในบทความของ Cheung ได้แสดงการประมาณค่าของรอยสัมผัสของ W/GaAs ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) และเมื่อนำค่าตัวแปรที่ประมาณได้มาคำนวณหาความหนาแน่นกระแส พบว่าผลการคำนวณที่ได้ตรงกับผลการทดลอง ดังแสดงในรูป 2.10 (ข) นอกจากนี้การประมาณค่าด้วยวิธีนี้ยังสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งนอกจากการนำไปใช้กับรอยสัมผัสช็อตต์กีย์แล้วโครงสร้างแบบ MIS (Matel-Insulator-Semiconductor) ยังสามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้หาค่าตัวแปรในลักษณะเดียวกันได้อีกด้วย เทคนิคการประมาณค่าตัวแปรนี้ จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ของ Cr/n-Si ในบทที่ 4 ทำให้ได้ทราบค่าตัวแปร $R_S$ , $n$ และ $\phi_{bn}$ ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น [30]

**2.3.5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์**

ค่าความจุไฟฟ้า ( $C$ ) ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่แสดงในรูปที่ 2.11 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส เห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ และมีค่าเป็นไปตามสมการที่ 2.21

$$C = \frac{\varepsilon_S A}{W_D} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \tag{2.21}$$

โดยที่ $N_D$ คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้ ($cm^{-3}$)
$W_D$ คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (cm)
$A$ คือ พื้นที่รอยสัมผัส ($cm^2$)
$\varepsilon_S$ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ
$q$ คือ ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C
$V_{bi}$ คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
$V_A$ คือ แรงดันไบอัส



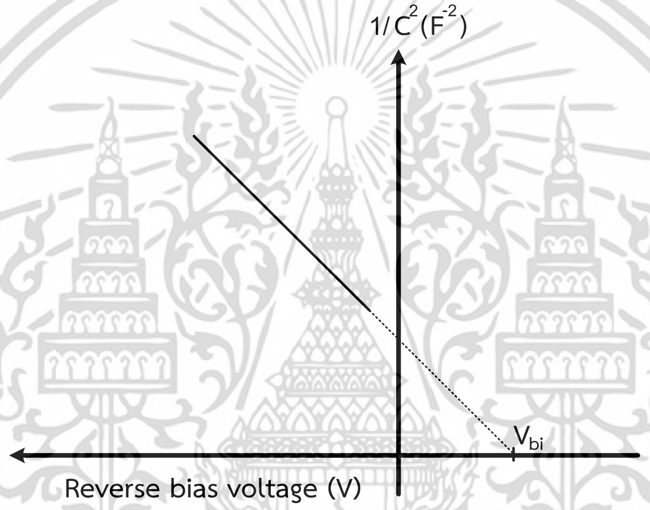

**รูปที่ 2.11** ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า–แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 2.11 เมื่อนำไปเขียนใหม่ให้อยู่ในเทอมของ $\frac{1}{C^2}$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ของสมการที่ 2.21 จะเปลี่ยนเป็นสมการที่ 2.22

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{q\varepsilon_S N_D} \tag{2.22}$$

ซึ่งลักษณะของกราฟที่ได้จะเป็นกราฟเส้นตรงทำให้ง่ายในการวิเคราะห์หาตัวแปร ดังเช่นจากกราฟจะได้ค่าความชันมีค่าเทากับ $2/q\varepsilon_S N_D$ ทำให้สามารถหาความเข้มข้นอะตอมของสารกึ่งตัวนำเริ่มต้นได้และที่จุดตัดแกน X ของกราฟจะทราบค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์จากความสัมพันธ์ของกราฟในรูปที่ 2.15 [31]




**รูปที่ 2.12** ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ในเทอมของ $1/C^2$

## 2.4 จุดบกพร่องในผลึก

นิยามของผลึกที่สมบูรณ์คือสสารซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีรูปแบบที่แน่นอนตลอดเนื้อสารนั้น อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี พฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ รวมไปถึงสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งสำคัญมากในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาจุดบกพร่องนี้

จุดบกพร่อง (Defects) อาจเป็นอะตอมแปลกปลอมหรือสิ่งปนเปื้อน (Contamination) ที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้ตั้งใจ เช่น เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสร้างแผ่นผลึกและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ หรือเกิดจากความตั้งใจเพื่อปรับปรุงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ให้เป็นไปตามต้องการ จุดบกพร่องที่เกิดนั้นมีสาเหตุการเกิดและลักษณะการเกิดที่แตกต่างกัน ดังนั้นจุดบกพร่องใน

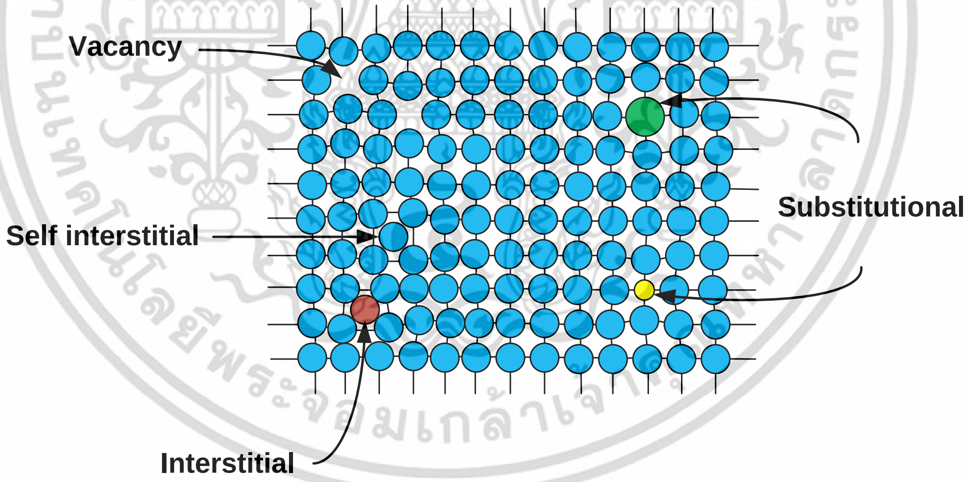
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกจึงถูกจัดแบ่งเป็นชนิดได้หลายชนิด เช่น จุดบกพร่องแบบจุด (Point defect) จุดบกพร่องแบบเส้น (Line defect) จุดบกพร่องแบบพลาน่าร์ (Planar defect) เป็นต้น [32]

### 2.4.1 จุดบกพร่องแบบจุด

จุดบกพร่องของผลึกแบบจุด (Point defect) นี้จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.13

- จุดบกพร่องผลึกแบบvacancyซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบช็อตต์กีย์ (Schottky defect)
- จุดบกพร่องผลึกแบบinterstitialซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
- จุดบกพร่องผลึกแบบ Substitutionalเกิดจากอะตอมชนิดอื่นเข้าไปแทนที่อะตอมชนิดเดิม



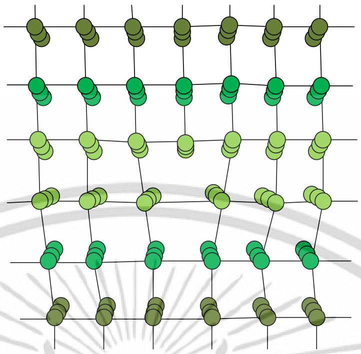

**รูปที่ 2.13** จุดบกพร่องผลึกชนิดต่างๆ

### 2.4.2 จุดบกพร่องแบบแนวเส้น

จุดบกพร่องแบบแนวเส้น (Line defect) เกิดขึ้นในผลึกได้เนื่องจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น

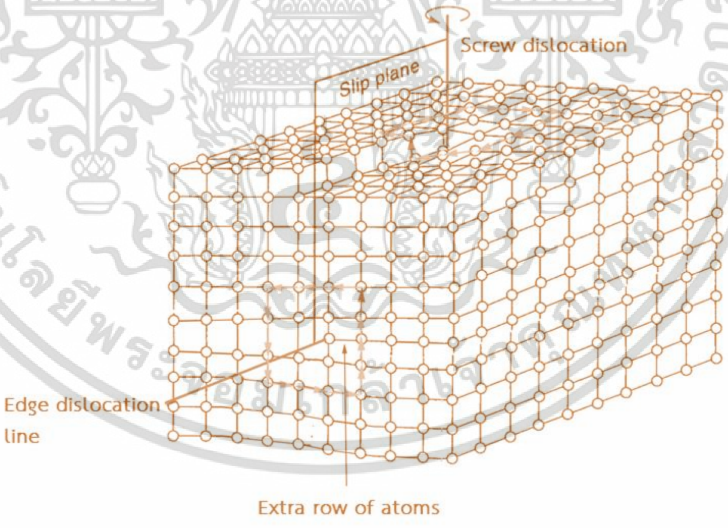
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุดบกพร่องแบบ Edge dislocation เกิดจากการขาดหายไปของอะตอมหลายอะตอม ซึ่งอะตอมเหล่านี้อยู่เหล่านี้อยู่เรียงชิดติดกันเป็นแนวยาว และโครงสร้างผลึกบิดเบี้ยวไปจากแนวปกติดังรูปที่ 2.14อะตอมที่อยู่ใกล้ๆแนวจุดบกพร่องนี้จะถูกแรงกระทำทั้งแรงบีบอัดและแรงตึง อะตอมที่เรียงตัวอยู่ในตำแหน่งที่ผิดไปจากเดิมเป็นแนวเส้น



**รูปที่ 2.14** จุดบกพร่องแบบ Edge dislocation

- จุดบกพร่องแบบ Screw dislocation เกิดจากส่วนใดส่วนหนึ่งมีลักษณะเหมือนถูกเฉือนแล้วดันส่วนหนึ่งให้เลื่อนขึ้นข้างบนดังรูปที่ 2.15




**รูปที่ 2.15** จุดบกพร่องแบบ Screw dislocation

### 2.4.3 จุดบกพร่องแบบพลาน่าร์

จุดบกพร่องแบบพลาน่าร์ (Planardefect) มักจะเกิดขึ้นในผลึกหลายรูป (Poly crystalline) จะประกอบไปด้วยผลึกชิ้นเล็กๆจำนวนมากซึ่งเรียกว่า “เกรน” (Grain) แต่ละเกรนจะมีการระนาบและทิศทางของผลึกที่กระจัดกระจาย ผลึกรวมที่ได้จึงไม่เป็นผลึกเนื้อเดียวกันโดยตลอดเพราะมีแนว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตะเข็บระหว่างเกรน (Grain boundary) เกิดขึ้นจุดบกพร่องนี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะลดจุดบกพร่องนี้ได้โดยการเพิ่มขนาดของเกรนโดยใช้กระบวนการทางความร้อน

ในกรณีที่ไดโอดถูกฉายด้วยอนุภาคพลังงานสูงดังเช่น รังสีเอกซ์นั้น จะก่อให้เกิดความเสียหาย (Damage) ขึ้นอย่างน้อย 2 ลักษณะ คือ ionization damage และ displacement damage

- Ionization damage คือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ($SiO_2$) เนื่องจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงเข้าไปทำให้พันธะระหว่างซิลิคอนและออกซิเจนแตกออก ทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระเกิดขึ้นก่อให้เกิด transient หรือ long-term ionization damage ขึ้นได้
- Displacement damage เกิดจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปกระตุ้นให้อะตอมเคลื่อนตัวออกไปจากตำแหน่งแลททีสเดิมเมื่ออะตอมเคลื่อนที่ออกไปแล้วจะทำให้เกิดเป็นช่องว่างในโครงสร้างผลึก (Vacancy) และอาจเกิดการแทรกที่ (Interstitial) ด้วยอะตอมที่หลุดออกมาไปพร้อมกันอีกด้วย ความเสียหายเหล่านี้ก่อให้เกิดจุดบกพร่องในเนื้อสาร ซึ่งเป็นการเพิ่มระดับพลังงานดักจับ (Energy trap) ในชั้นพลังงานอีกด้วย

## 2.5 คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม

ปัจจุบันอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ที่ต้องการความสะดวกสบายในชีวิต ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของตัวช็อตต์กีย์ไดโอดให้มีความสามารถในการตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้น ลดกระแสรั่วลง โดยใช้วิธีการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมแล้ว ยังใช้เทคนิควิธีการของรังสีเอกซ์มาช่วยปรับปรุงให้ช็อตต์กีย์ไดโอดมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นกว่าเดิมอีกด้วย

### 2.5.1 คุณสมบัติของแพลตทินัม

แพลตทินัมเป็นโลหะสีขาวเงิน มีลักษณะอ่อน สามารถดึงเป็นเส้นได้ดี เป็นโลหะที่หนักมากโลหะหนึ่ง มีความหนาแน่น 21.45 g/cc ที่อุณหภูมิ 20°C แพลตทินัมเป็นหนึ่งในจำนวน 6 ธาตุในหมู่ VIII ของตารางธาตุ ซึ่งธาตุทั้งหมดนี้มีสมบัติคล้ายคลึงกันมาก และนิยมเรียกว่าธาตุตระกูลแพลตทินัม หรือธาตุหมู่แพลตทินัมเพราะแพลตทินัมเป็นธาตุที่รู้จักกันดีที่สุดในบรรดาธาตุทั้งหมดของหมู่นี้ แพลตทินัมเป็นโลหะที่มีราคาแพงเพราะเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งในหลายๆ ปฏิกิริยา คุณสมบัติทั่วไปของแพลตทินัมเป็นไปตามตารางที่ 2.4 [33]

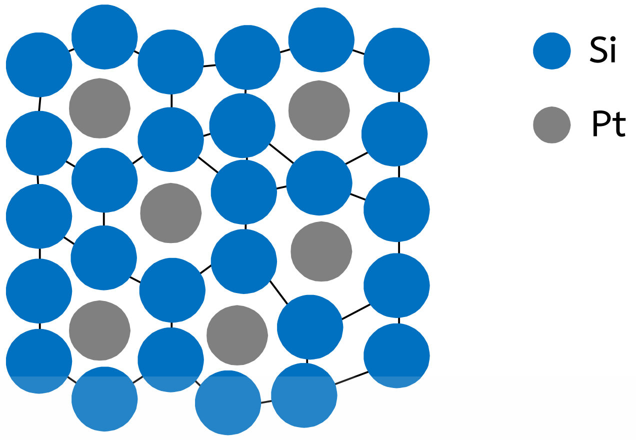
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.4** ตารางแสดงคุณสมบัติทั่วไปของแพลตทินัม

| | |
|---|---|
| เลขอะตอม | 78 เป็นธาตุที่ ของคาบที่ 37 ของหมู่ VIII ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน |
| รัศมีอะตอมิก | 1.385 อังสตรอม |
| น้ำหนักอะตอม | 195.08 amu |
| จุดหลอมเหลว | 1772 องศาเซลเซียส |
| จุดเดือด | 3827 องศาเซลเซียส |
| ความหนาแน่น | 21.45g/cc |
| โครงสร้างอิเล็กตรอน | [Xe] $6s^1$ $4f^{14}$ $5d^9$ |
| เลขออกซิเดชัน | +2, +4 |
| ความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนของธาตุ (Electronegativity) | 2.28 |
| โครงสร้างผลึก | Face centered cubic |
| ค่าสภาพต้านทาน (Resistivity) ที่ $20^{o}C$ | 9.85 μΩ.cm |
| ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว | 4.7 kcal/mol |
| ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ | 135.0 kcal/mol |
| ความร้อนจำเพาะ | 0.03136 cal/g-$^{o}C$ |
| การนำความร้อน | 0.73 watts/cm-$^{o}C$ |
| ความจุความร้อน | 6.18 cal/mol-$^{o}C$ |

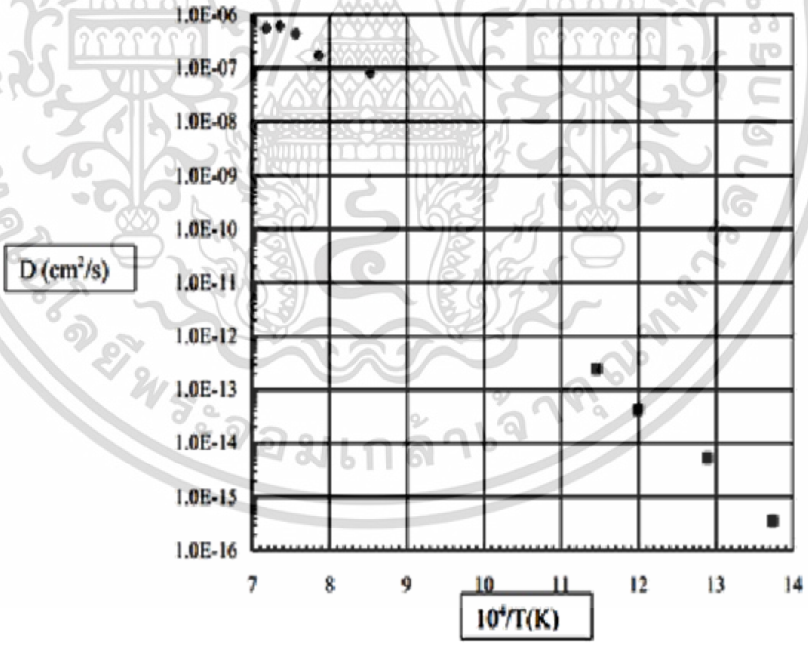
แพลตทินัมเป็นสารเจือระดับลึก (Deep impurity) ที่สำคัญในซิลิคอนทั้งนี้เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณของแพลตทินัมในซิลิคอนได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิอะตอมแพลตทินัมจะแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมของซิลิคอนโดยไม่มีพันธะใดๆยึดกับอะตอมซิลิคอน ดังรูปที่ 2.16 อัตราการแพร่ชนิดนี้จะเร็วกว่าอัตราการแพร่แบบเข้าไปแทนที่ (Substitutional diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.16** ลักษณะการแพร่ของอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอน

เมื่ออะตอมแพลตทินัมแพร่เข้าไปในซิลิคอนจะไปควบคุมช่วงอายุและสภาพต้านทาน ทั้งชนิดเอ็นและพี กล่าวคือจะทำให้อายุพาหะของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมีค่าลดลง เราจึงเรียกแพลตทินัมว่าเป็น “carrier lifetime killer”และสามารถนำมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์พวกความเร็วสูง เช่น สวิทชิงไดโอด และวงจรรวมดิจิตอลแบบต่างๆได้เป็นอย่างดี




**รูปที่ 2.17** กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแพลตทินัมในซิลิคอน

โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแพลตทินัมที่อุณหภูมิต่างๆได้จากรูปที่ 2.17 ซึ่งเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ในรูปของสมการแล้วจะได้ดังสมการที่ (2.23) โดยสามารถแทนค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ลงในสมการ ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ได้ [34-35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

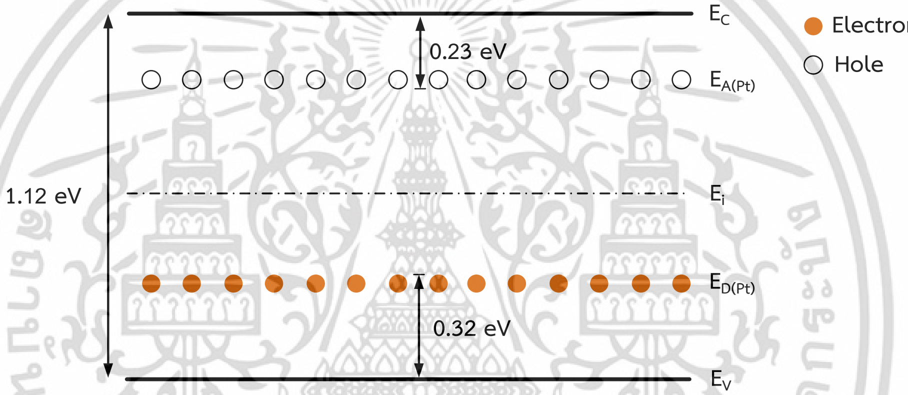
$$D(m^2/s) = 0.00021\exp\left[\frac{-1.79(eV)}{kT}\right] \quad (2.23)$$

โดยที่ $k$ คือ ค่าคงที่โบลต์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.617x10$^{-5}$ eV/K

$T$ คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

**2.5.2 สภาพต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม**

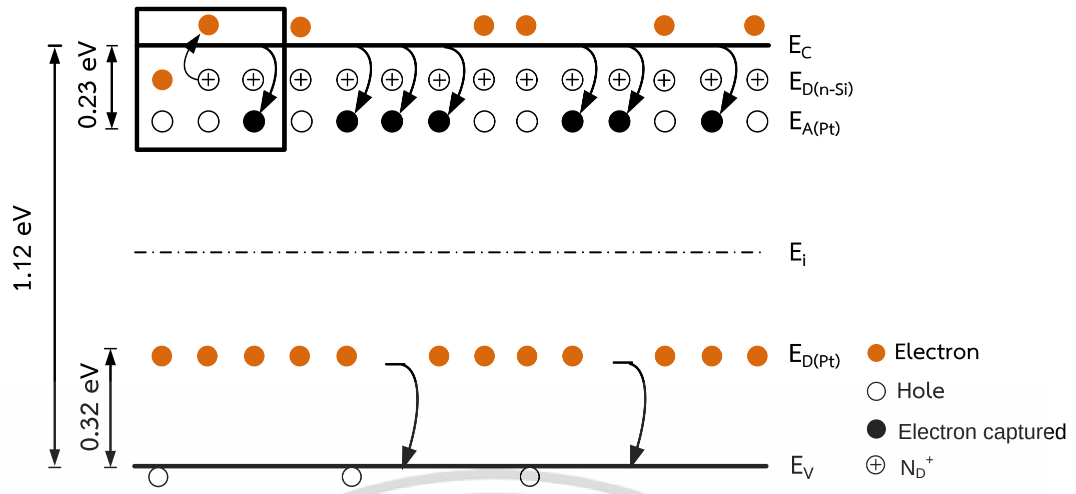
ในซิลิคอนชนิดอินทรินซิคเมื่อถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมแพลตทินัมจะทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นมา 3 ระดับแต่จะมีระดับพลังงานที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางไฟฟ้าเพียง 2 ระดับ ซึ่งได้แก่ ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก (Deep acceptor level) และระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก (Deep donor level) ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.18 [36]




**รูปที่ 2.18** ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอนบริสุทธิ์

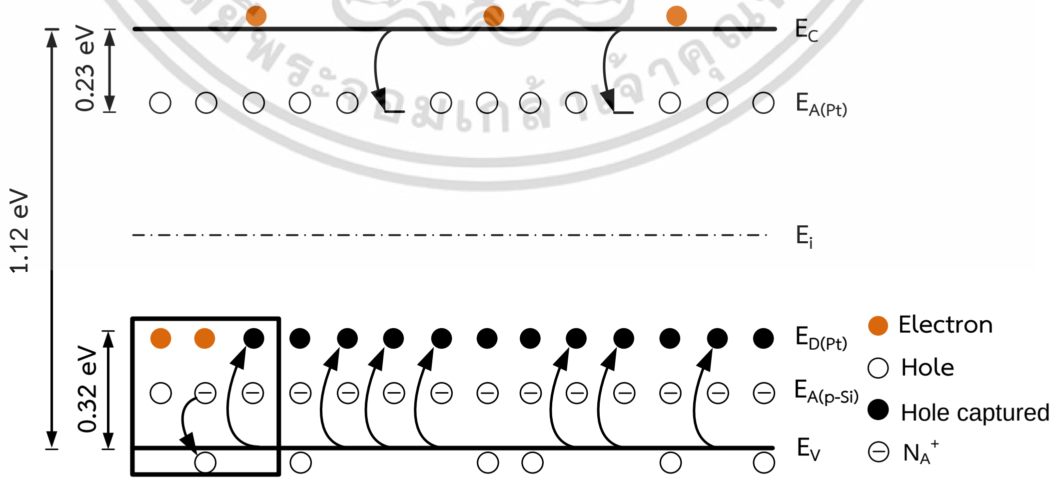
ในซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำตกลงมาในระดับพลังงานผู้รับแบบลึก ซึ่งอยู่ห่างจากแถบความนำลงมาประมาณ 0.23 eV ดังรูปที่ 2.19 ในกรอบสี่เหลี่ยมเป็นการแสดงกลไกการให้และรับอิเล็กตรอนของแถบพลังงานผู้ให้ของซิลิคอนชนิดเอ็นและแถบพลังงานผู้รับแบบลึกของแพลตทินัมกล่าวคือภายในอุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานผู้ให้ของซิลิคอนชนิดเอ็นจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าโดยทิ้งไอออนบวกไว้ เมื่อทำการแพร่แพลตทินัมเข้าไปอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้รับแบบลึก คือเกิดปรากฏการณ์ชดเชย ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบความนำลดลง ค่าสภาพต้านทานจึงเพิ่มขึ้น เมื่อให้ปริมาณอะตอมของแพลตทินัมมากขึ้นก็จะทำให้มีระดับพลังงานผู้รับแบบลึกมากขึ้น ซึ่งมีจำนวนมากพอที่จะจับอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำได้เกือบหมด ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าสูงมากขึ้นจนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



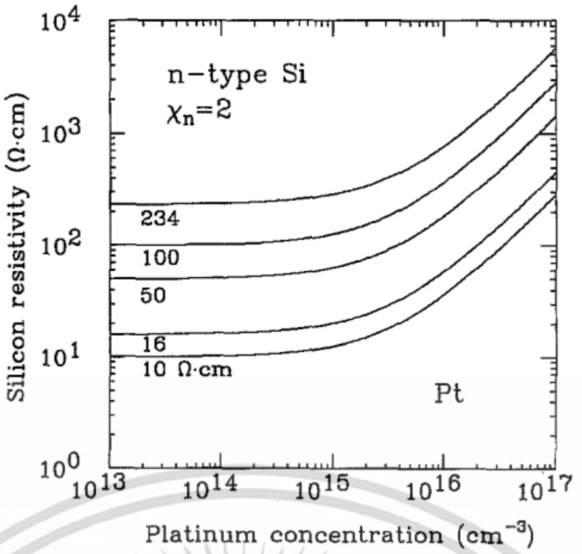

**รูปที่ 2.19** ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมแพลตทินัม

สำหรับซิลิคอนชนิดพีเมื่อถูกแพร่ด้วยแพลตทินัมจะทำให้เกิดระดับพลังงานที่เรียกว่าระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก ซึ่งอยู่ห่างจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปประมาณ 0.32 eV ดังรูปที่ 2.20 ในกรอบสี่เหลี่ยมเป็นการแสดงกลไกของโฮลจากแถบพลังงานผู้รับของซิลิคอนชนิดพีและแถบวาเลนซ์ในอุณหภูมิห้องโฮลจากแถบพลังงานผู้รับของซิลิคอนชนิดพีจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปที่แถบวาเลนซ์โดยจะทิ้งไอออนลบไว้ เมื่อทำการแพร่แพลตทินัมเข้าไปในซิลิคอนชนิดพีจะทำให้โฮลในแถบวาเลนซ์รวมตัวกับอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานผู้ให้แบบลึกของแพลตทินัมส่งผลให้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ลดลง ค่าสภาพต้านทานจึงมีค่าสูงขึ้นและถ้าหากยังเพิ่มปริมาณของอะตอมแพลตทินัมจนกระทั่งโฮลในแถบวาเลนซ์ถูกรวมตัวเกือบหมด ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าสูงมากขึ้นจนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิค

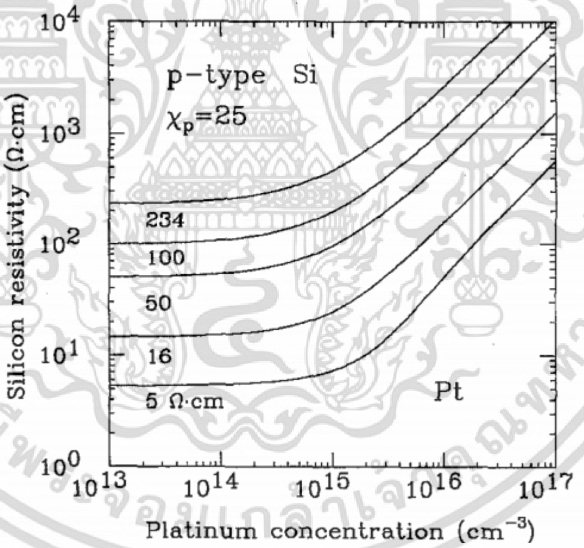



**รูปที่ 2.20** ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอนชนิดพี ซึ่งอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมแพลตทินัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.21** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือแพลตทินัม ของซิลิคอนฐานรองชนิดเอ็นที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่แตกต่างกัน โดยตัวเลขในกราฟแสดงค่าของสภาพต้านทานเริ่มแรกของซิลิคอน

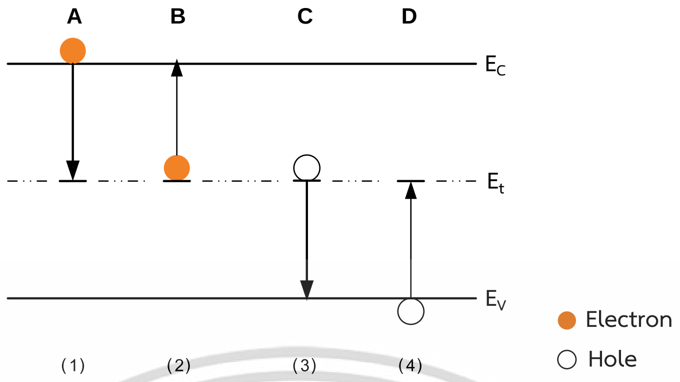



**รูปที่ 2.22** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดสภาพต้านทานของซิลิคอนกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือแพลตทินัม ของซิลิคอนฐานรองชนิดพีที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่แตกต่างกัน โดยตัวเลขในกราฟแสดงค่าของสภาพต้านทานเริ่มแรกของซิลิคอน

เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ชดเชยในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมจะทำให้ความหนาแน่นของพาหะลดลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานกับความหนาแน่นของอะตอมแพลตทินัมที่ถูกแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.21 และซิลิคอนชนิดพีแสดงดังรูปที่ 2.22 [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 กระบวนการจับยึด




**รูปที่ 2.23** กระบวนการจับยึดและกำเนิดอิเล็กตรอน-โฮลที่ตำแหน่ง $E_t$
ก. กระบวนการจับอิเล็กตรอน
ข. กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน
ค. กระบวนการจับโฮล
ง. กระบวนการปลดปล่อยโฮล

อะตอมสารเจือระดับลึกจะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัว เมื่อมีความหนาแน่นของพาหะมากกว่าความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำ และจะเป็นศูนย์กลางการเกิดใหม่เมื่อมีความหนาแน่นของพาหะน้อยกว่าจำนวนความหนาแน่นของพาหะในสภาวะสมดุล ซึ่งในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงกลไกการทำงานของศูนย์กลางการรวมตัว หรือศูนย์กลางการดักจับ จากการพิจารณาสารเจือขับลึกที่มีระดับพลังงาน มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮล ซึ่งเกิดจากสารเจือแบบตื้น ดังรูปที่ 2.23 จากรูปแสดงให้เห็นว่ากระบวนการจับยึด และการเกิดของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่ง จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี คือ

(1) กระบวนการจับอิเล็กตรอน

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนจากแถบความนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงานดักจับ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลงมาที่ระดับดักจับขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำไฟฟ้า

(1.1) จำนวนความหนาแน่นสถานะของระดับพลังงานดักจับ

(1.2) ความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอนที่จะผ่านเข้าไปในสถานะของระดับพลังงานดักจับ ความน่าจะเป็นต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่อิเล็กตรอนจะถูกจับที่ localized state มีค่าเท่ากับ $v_{th}\sigma_n$ เมื่อ $v_{th}$ คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน (Thermal velocity) ของอิเล็กตรอน และ $\sigma_n$ คือ ภาคตัดขวางการจับยึด (Capture cross section) ดังนั้นจะได้ผลรวมอัตราการจับอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานดักจับ (A) ดังสมการที่ 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = n\left\{N_t\left[1 - f\left(E_t\right)\right]\right\}v_{th}\sigma_n \tag{2.24}$$

(2) กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน

เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายจากระดับพลังงานดักจับไปยังแถบความนำ โดยอัตราการเคลื่อนย้าย (B) ดังสมการที่ 2.25

$$B = \left[N_t f\left(E_t\right)\right]e_n \tag{2.25}$$

โดยที่ $e_n$ คือ ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยที่สภาวะสมดุลความร้อน

$$A = B$$

$$n\left\{N_t\left[1 - f\left(E_t\right)\right]\right\}v_{th}\sigma_n = \left[N_t f\left(E_t\right)\right]e_n \tag{2.26}$$

จาก $n = n_i \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right)$ และ $f\left(E_t\right) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)}$

จะได้ว่า

$$e_n = v_{th}\sigma_n n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \tag{2.27}$$

(3) กระบวนการจับโฮล

เป็นกระบวนการจับโฮลจากแถบวาเลนซ์มายังระดับพลังงานดักจับ หรือเป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานดักจับเคลื่อนที่ไปจับกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ซึ่งอัตราการจับโฮลขึ้นอยู่กับ

(3.1) ความหนาแน่นของสถานะที่ถูกครอบครองด้วยอิเล็กตรอน

(3.2) ความหนาแน่นของโฮล

(3.3) ความน่าจะเป็นในการส่งผ่านต่อหนึ่งหน่วยเวลา

ดังนั้น

$$C = \left[N_t f\left(E_t\right)\right]\rho v_{th}\sigma_p \tag{2.28}$$

(4) กระบวนการปลดปล่อยโฮล

เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังสถานะว่าง

$$D = \left\{N_t\left[1 - f\left(E_t\right)\right]\right\}e_p \tag{2.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และที่สภาวะสมดุลความร้อน

$$C = D$$

จะได้ว่า

$$e_p = v_{th}\sigma_p n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \tag{2.30}$$

**2.5.4 การควบคุมช่วงอายุของพาหะด้วยอะตอมแพลตทินัม**

เมื่อพิจารณาซิลิคอนชนิดเอ็น $N_D \gg N_A$ ที่มีการเติมอะตอมของแพลตทินัม จะทำให้ระดับพลังงานผู้รับแบบลึกของแพลตทินัม ซึ่งมีประจุเป็นกลาง ( $N_{Pt}^0$ ) เมื่อไม่มีการครอบครองอิเล็กตรอน และเมื่ออิเล็กตรอนถูกจับทำให้ระดับพลังงานดังกล่าวมีประจุเป็นลบ ( $N_{Pt}^-$ ) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการจับโฮล จะทำให้ค่าเวลาช่วงชีวิตของโฮล ( $\tau_p$ ) ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยมีค่าลดลง ดังสมการที่ 2.31

$$\tau_p = \frac{1}{v_p \sigma_p^- N_{Pt}} \tag{2.31}$$

เมื่อพิจารณาซิลิคอนชนิดพี $N_A \gg N_D$ ที่มีการเติมอะตอมของแพลตทินัม จะทำให้ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึกของแพลตทินัม ซึ่งมีประจุเป็นกลาง ( $N_{Pt}^0$ ) เมื่อไม่มีการครอบครองโฮล และเมื่อโฮลถูกจับทำให้ระดับพลังงานดังกล่าวมีประจุเป็นลบ ( $N_{Pt}^+$ ) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการจับอิเล็กตรอน จะทำให้ค่าเวลาช่วงชีวิตของอิเล็กตรอน ( $\tau_n$ ) ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยมีค่าลดลง ดังสมการที่ 2.32 [38-39]

$$\tau_n = \frac{1}{v_p \sigma_p^+ N_{Pt}} \tag{2.32}$$

โดยที่ $\tau$ คือ ค่าเวลาช่วงชีวิตของพาหะ
$\sigma$ คือ ภาคตัดขวางการจับยึด
$v$ คือ ความเร็วของพาหะ
$N_{Pt}$ คือ ความหนาแน่นของอะตอมแพลตทินัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

# กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกโด๊ปด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมลงบนแผ่นซิลิคอน Czochralski silicon (CZ) ชนิดเอ็น ระนาบ (100) สภาพต้านทาน 5 Ω-cm มีความหนา 625 μm ซึ่งมีโครงสร้างรอยสัมผัสระหว่าง Cr/n-Si โดยในการออกแบบการทดลองนั้นแยกเป็นสองส่วนหลักๆ คือศึกษาผลของแพลตทินัมที่มีต่อช็อตต์กีย์ไดโอดและศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอด ในการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดจะใช้เทคโนโลยีการสร้างจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) เมื่อทำการสร้างเสร็จเป็นที่เรียบร้อยจะนำชิ้นงานไปฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงานและเวลาต่างกัน เพื่อทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกโด๊ปด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ต่อไป

## 3.1 เทคโนโลยีการสร้าง

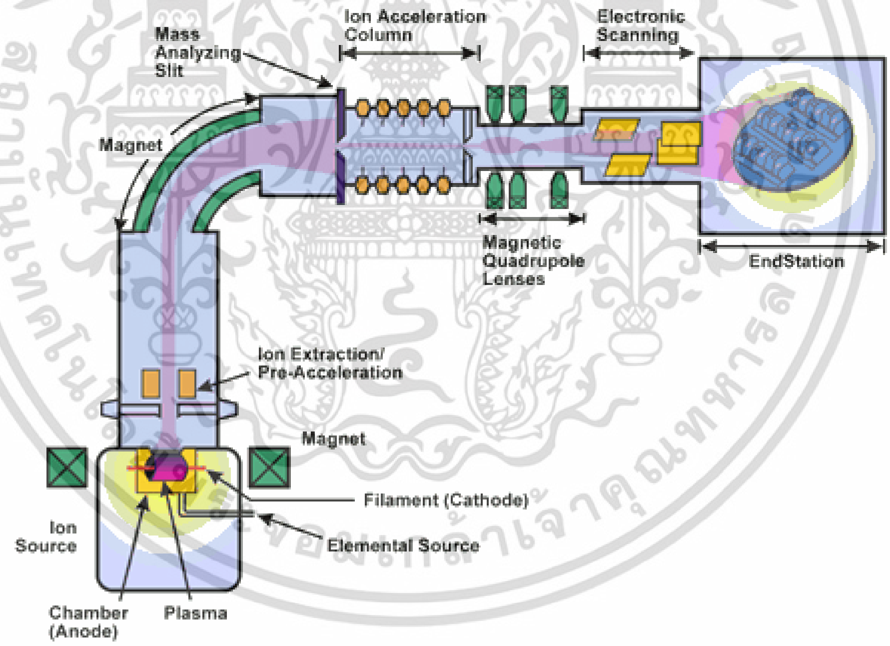
ในกระบวนสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดเพื่อนำมาศึกษาในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้นั้นประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานหลักๆ 3 กระบวนการ คือ การแพร่สารเจือ การสร้างชั้นโลหะ และกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

### 3.1.1 กระบวนการแพร่สารเจือโดยเทคนิคไอออนอิมแพลนเทชัน

กระบวนการไอออนอิมแพลนเทชันเป็นวิธีการของเทคโนโลยีขั้นสูงสำหรับการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของพื้นผิวของวัสดุที่มีการพัฒนามาเพื่อใช้ในงานเซมิคอนดักเตอร์และยังคงใช้กันอย่างกว้างขวางในทุกวันนี้ ในการออกแบบและสร้างวงจรรวมระดับ VLSI นั้นจะนิยมใช้กระบวนการไอออนอิมแพลนเทชัน (Ion implantation) เนื่องจากสามารถควบคุมให้มีความเที่ยงตรงแน่นอน ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อ หรือปริมาณอะตอมของสารเจือ กระบวนการไอออนอิมแพลนเทชัน เป็นกระบวนการยิงไอออนของอะตอมสารเจือเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยหลักการทำให้อะตอมสารเจือมีสภาพเป็นไอออนด้วยการให้พลังงานแก่สารเจือประมาณ 50–500 keV จากนั้นไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าค่าสูงทำให้ไอออนมีความเร็วสูง มีพลังงานจลน์มากกระทั่งสามารถฝังเข้าไปในเนื้อผลึกสารกึ่งตัวนำได้ ซึ่งความลึกที่ไอออนของอะตอมสารเจือสามารถเข้าไปในผลึกได้นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานที่ให้แก่ไอออนขณะมีความเร่งช่วงสุดท้ายก่อนทะลุเข้าไปในเนื้อของๆแข็ง โดยขั้นตอนสุดท้ายลำของไอออนจะถูกควบคุมและกวาดลงบนแผ่นผลึกฐานรองไอออนของสารเจือซึ่งมีพลังงานจลน์ค่าสูง จะถูกฝังเข้าไปในฐานรอง และเพื่อไม่ให้ไอออนสูญเสียพลังงาน ลำของไอออนจะถูกเร่งในสุญญากาศ ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิคนี้ยิงอะตอมฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น $n^+$ เป็นรอยต่อโอห์มิคที่ด้านหลังแผ่น เครื่องไอออนอิมแพลนเทชันแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. **Ion source** เป็นส่วนที่อะตอมสารเจือเกิดการไอออไนซ์มีสภาพเป็นพลาสม่า ซึ่งใช้วิธีการแบบ hot filament เมื่อได้ไอออนของอะตอมสารเจือแล้ว ไอออนจะถูกทำให้เป็นลำไอออน (Ion beam) วิ่งเข้าสู่ส่วนของ mass analyzing slit
2. **Mass analyzing slit** เป็นอุปกรณ์ที่คัดเลือกไอออนอะตอมสารเจือที่ต้องการออกจากไอออนอะตอมสารเจืออื่น ซึ่งทำได้โดยใช้สนามแม่เหล็กเรียกว่า magnetic analysis โดยจะตรวจสอบ mass ของไอออนที่ต้องการ เมื่อคัดเลือกเสร็จแล้วไอออนที่ต้องการจะถูกบีบให้เป็นลำและผ่านต่อไปยังส่วนเพิ่มอัตราเร่ง
3. **Ion acceleration column** เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงโดยใช้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ค่าสูงๆ ทำให้ไอออนมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆในขณะที่ผ่านสนามความต่างศักย์ก่อนที่จะชนกับแผ่นผลึกฐานรองที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวน์
4. **Electronic scanning** ขณะที่ลำไอออนถูกเร่งให้พุ่งเข้าชนแผ่นผลึกฐานรอง ก่อนถึงแผ่นผลึกลำไอออนจะถูกควบคุมให้กวาดหรือสแกนลงบนแผ่นฐานรองเพื่อให้ไอออนอะตอมสารเจือสามารถฝังเข้าไปบนฐานรองได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ




**รูปที่ 3.1** เครื่องไอออนอิมแพลนเทชัน [40]

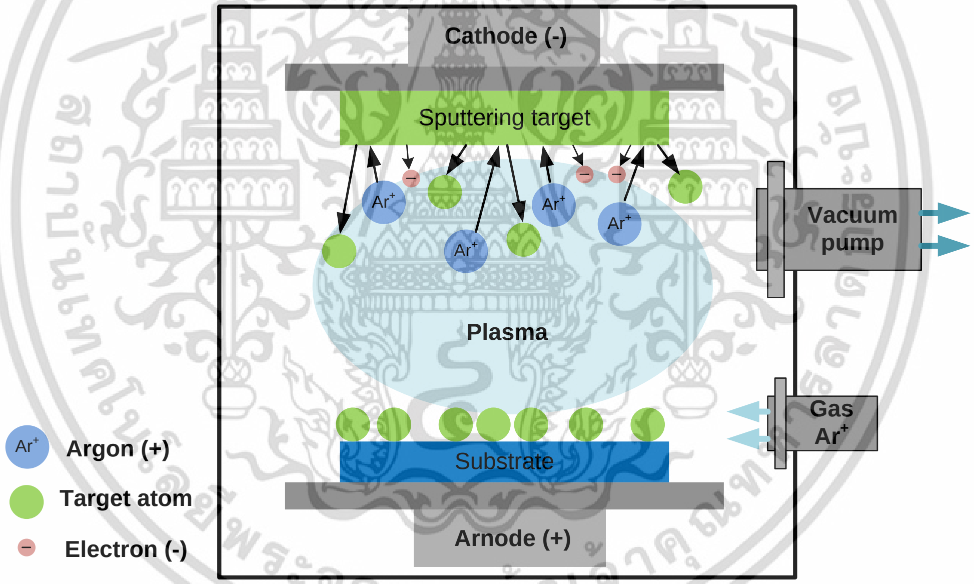
### 3.1.2 กระบวนการเมทัลไลเซชัน

เป็นกระบวนการสร้างชั้นโลหะเพื่อเชื่อมต่อส่วนต่างๆของอุปกรณ์เข้าด้วยกันตามรูปแบบโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ หรือเป็นการเคลือบสารก่อนทำการแพร่เข้าสู่แผ่นฐานรองซึ่งเทคนิคกระบวนการเมตัลไลเซชันนั้นมีหลายเทคนิคด้วยกัน ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) และเทคนิค Electron beam evapolation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1 Sputtering

สปัตเตอร์ริงเป็นเทคนิคหนึ่งในกระบวนการเมทัลไลเซชัน สำหรับการสร้างชั้นฟิล์มบางของโลหะ สารกึ่งตัวนำ หรือฉนวน ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการสปัตเตอร์ริงในการสร้างขั้วโลหะโครเมียม ซึ่งหลักการของการสปัตเตอร์ริงนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ภายในระบบจะประกอบไปด้วยแผ่นเพลตคู่ด้านบนและด้านล่างอยู่ภายในระบบปิดที่ทำการดูดอากาศออกจนได้ความดันต่ำตามที่ต้องการ ประมาณ $10^{-5}$-$10^{-6}$ Torr เพลตด้านบนคือเป้าของโครเมียมที่มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งเป็นวัสดุที่ต้องการเคลือบ (Sputtering target) และเป็นขั้วคาโทด ส่วนด้านล่างคือฐานรองสำหรับวางชิ้นงานหรือแผ่นเวเฟอร์ที่ต้องการสร้างชั้นฟิล์ม เป็นขั้วอาโนด เมื่อได้รับการป้อนกำลังงานทำให้ก๊าซที่เป็นตัวกลางในสปัตเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้เราเลือกใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) จะเกิดโกล์วดิสชาร์ท (Glow discharge) หรือการแตกตัวเป็นพลาสม่าเกิดเป็นอาร์กอนไอออน ในบริเวณพลาสม่าอาร์กอนไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าเข้าชนเป้าโครเมียม อะตอมของโครเมียมจะได้รับการถ่ายเทพลังงานจากอะตอมอาร์กอนไอออนจนอะตอมโครเมียมหลุดออกมาจากเป้าและวิ่งลงสู่แผ่นฐานรองซิลิคอนเวเฟอร์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทับถมกันเรื่อยๆ จนเกิดเป็นฟิล์มบางในที่สุด

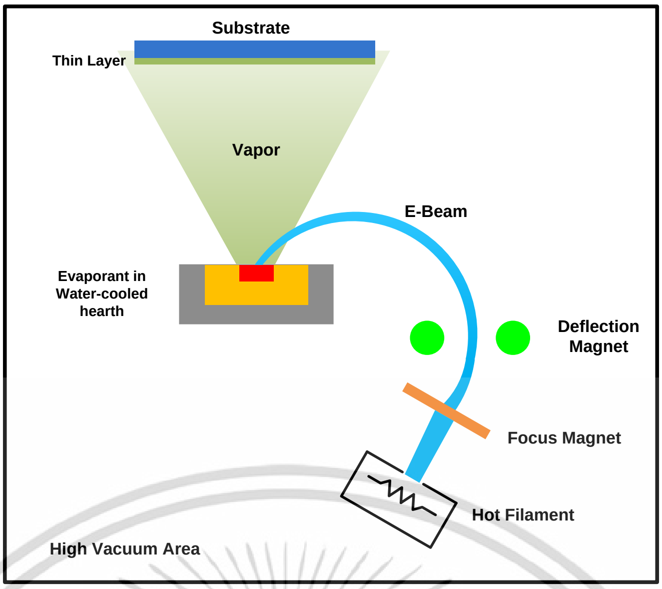



**รูปที่ 3.2** กระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

3.1.2.2 Electron-beam evaporation

เป็นกระบวนการเพื่อสร้างชั้นฟิล์มบางอีกเทคนิคหนึ่งซึ่งหลักการคือลำอิเล็กตรอนจะเกิดจาก hot filament และจะถูกบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าให้ตกลงบนสารที่ต้องการจะเคลือบซึ่งบรรจุอยู่ภายในเบ้าหลอมสาร (Crusible) เมื่อลำอิเล็กตรอนชนเข้ากับก้อนสารในเบ้าจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในตัวเป็นพลังงานความร้อน เมื่อสารก้อนดังกล่าวได้รับพลังงานจนถึงจุดหนึ่งจะระเหยกลายเป็นไอขึ้นไปเกาะจนเกิดเป็นชั้นฟิล์มบนฐานรองที่วางไว้ด้านบน ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



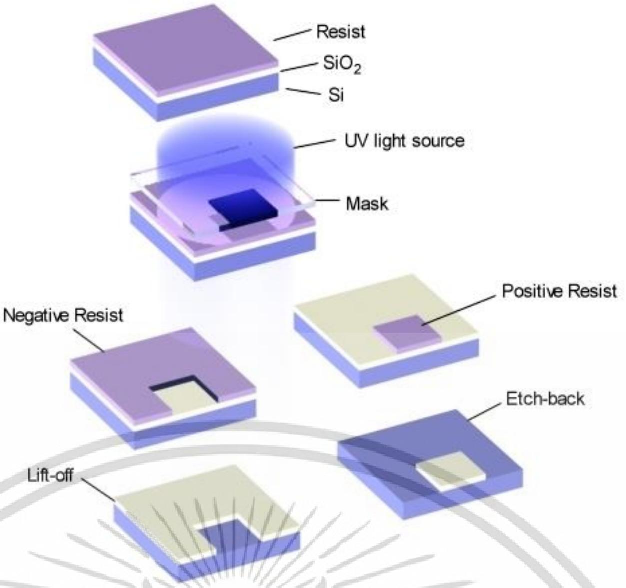

**รูปที่ 3.3** Electron-beam evaporator

### 3.1.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี

โฟโตลิโธกราฟฟี (Photolithography) เป็นกระบวนการถ่ายแบบของแพตเทิร์นที่อยู่บนแผ่นโฟโตมาสก์ให้ลงไปยังผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน มีประโยชน์มากในการสร้างวงจรรวม ซึ่งจะช่วยในกระบวนการแพร่อะตอมของสารเจือเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอนทำให้เกิดส่วนต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสามารถอธิบายได้ดังนี้

เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบนไปเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสง ซึ่งน้ำยาไวแสงนั้นมีสองแบบ คือ แบบ Positive นั่นคือเวลาที่น้ำยาไวแสงชนิดนี้โดนแสงแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น เมื่อนำไปล้างด้วยน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) จะสามารถหลุดลอกออกไปได้ อีกแบบหนึ่งเป็นน้ำยาไวแสงแบบ Negative เมื่อน้ำยาไวแสงชนิดนี้โดนแสงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้น้ำยาไวแสงนั้นแข็งตัวติดแน่นส่วนที่ไม่โดนแสงจะถูกน้ำยาล้างฟิล์มลอกออกไป ดังนั้นในการเลือกใช้น้ำยาไวแสงจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับงานที่ออกแบบไว้ เมื่อเคลือบน้ำยาไวแสงเสร็จแล้วจากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกลวดลายต้นแบบ ที่เรียกว่า โฟโตมาส์ก (Photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาส์กจะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนจะคงเหลือค้างอยู่บนผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกสกัดออกไป จากนั้นนำแผ่นผลึกไปสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยสารเคมีที่เป็นตัวสกัด หลังจากนั้นลอกชั้นน้ำยาไวแสงที่เหลือออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเป็นลวดลายเหมือนกับลวดลายบนกระจกโฟโตมาส์กดังรูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.4** กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี [41]

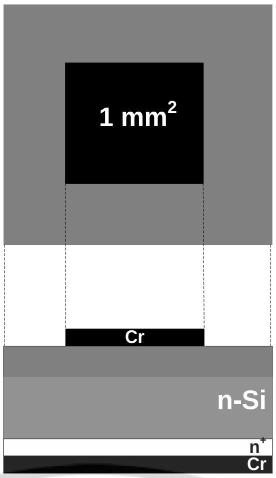
## 3.2 การออกแบบลวดลายบนกระจกต้นแบบ

การออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเพื่อนำไปสร้างขั้วไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดนั้นถือขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างทั้งหมด โดยการออกแบบนั้นเราจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไข และข้อจำกัดต่างๆที่เราต้องการที่จะทำการศึกษา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเป็นชนิดที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive) โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW X5 Graphic จากนั้นนำไปทำการสแกนด้วยเลเซอร์ (Laser scanner) ลงบนแผ่นฟิล์มป้องกันแสง แล้วนำไปติดบนกระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างต่อไป

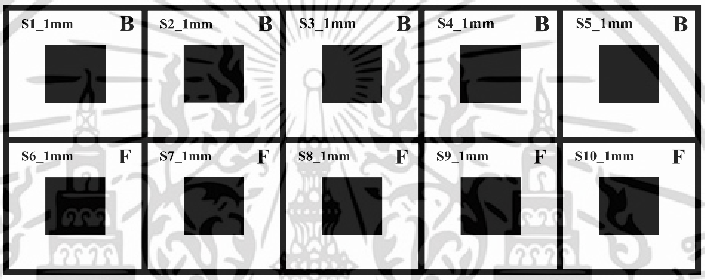
### 3.2.1 ลวดลายกระจกต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆของช็อตต์กีย์ไดโอด

โครงสร้างของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์เป็นโครงสร้าง MS แบบ Vertical มีขั้วโลหะโครเมียมอาโนดและแคโทดที่ได้ล่างของแผ่น ดังรูปที่ 3.5 ด้านบนจึงได้ทำการออกแบบลวดลายขั้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมมีขนาดพื้นที่ (A) เท่ากับ 1 $mm^2$ เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ได้แก่ กระแสเมื่อได้รับไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ (I-V characteristics) และความจุไฟฟ้าเมื่อได้รับไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ (C-V characteristics) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น กระแสรั่วไหล ($I_{leak}$), กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ($I_0$), แรงดันภายใน ($V_{bi}$), กำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ($\phi_{bn}$), ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ($W$), ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ($N_D$), ความต้านทานอนุกรม ($R_S$), Activation energy ($E_A$) และ Ideality factor ($n$) เพื่อเปรียบเทียบดูผลจากการแพร่แพลตทินัมและผลจากการฉายรังสีเอกซ์ที่มีต่อช็อตต์กีย์ไดโอด ลวดลายกระจกต้นแบบที่ใช้ในการศึกษารอยสัมผัสช็อตต์กีย์ แสดงดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.5** ลักษณะโครงสร้างของช็อตต์กีย์ไดโอด




**รูปที่ 3.6** ลักษณะลวดลายกระจกต้นแบบ

## 3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอด

ในการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดนั้นจะทำการสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ (100) สภาพต้านทานแผ่น 5 Ω-cm มีความหนา 625 μm มีโครงสร้างรอยสัมผัสของขั้วไฟฟ้าโลหะคือ Cr/n-Si ซึ่งรอยสัมผัสนี้เป็นรอยสัมผัสช็อตต์กีย์โดยในการศึกษานี้จะทำการศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม ดังนั้นในการสร้างสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีขั้นตอนการสร้างทั้งหมดดังแผนภูมิในรูปที่ 3.7

**รูปที่ 3.7** แผนผังกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si (Pt doped)

เอกสารนี้เป็นเอกส... ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนของกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไอโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมที่มีโครงสร้าง Cr/n-Si จะประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอน คือ การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน, กระบวนการ Implantation, กระบวนการ Electron-beam evaporation, กระบวนการแพร่แพลตทินัม, กระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอร์ริงและกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยแต่ละขั้นตอนนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

ในการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นการทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะและคราบน้ำมันที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะทำเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างทั้งหมดและถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะหากชิ้นงานไม่สะอาดอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานลดลงได้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- นำแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมาอัลตร้าโซนิค (Ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (De-ionization water : DI water) เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดปิรันยา ($3H_2SO_4 + H_2O_2$ : Piranha) เพื่อขจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอทธีลีน (Trichloroethylene) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมัน
- อัลตร้าโซนิคแผ่นผลึกซิลิคอนในอะซิโตน (Acetone)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดไฮโดรฟูออริก (Hydrofluoric acid : HF) ที่มีความเข้มข้น 5% เพื่อกัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Native oxide) บนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจากออกซิเจนในอากาศ
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการ Implantation

เป็นการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นสูงที่ด้านหลังแผ่นเพื่อสร้างส่วนของ $n^+$ layer ซึ่งจะสร้างเป็นรอยสัมผัสโอห์มิคต่อไป โดยกระบวนการไอออนอิมแพลนเทชัน (Ion implantation) เป็นกระบวนการยิงไอออนของอะตอมสารเจือเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยหลักการทำให้อะตอมสารเจือมีสภาพเป็นไอออน จากนั้นไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าค่าสูงทำให้ไอออนมีความเร็วสูงมีพลังงานจลน์มากจนกระทั่งสามารถฝังเข้าไปในเนื้อผลึกสารกึ่งตัวนำ โดยมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขคือ Implantation phosphorus 2x$10^{15}$ atom/$cm^2$ ที่พลังงาน 60 keV จากนั้น anneal ที่อุณหภูมิ 950℃ เป็นเวลา 60 นาที

3. กระบวนการ Electron-beam evaporation

กระบวนการ Electron-beam evaporation เป็นกระบวนการเพื่อสร้างชั้นของแพลตทินัมหนา 20 nm โดยใช้ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ (Electron-beam evaporator system) หลักการคือจะบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าให้ตกลงบนแพลตทินัมซึ่งบรรจุอยู่ภายในเบ้าหลอมสาร (Crusible) เมื่อลำอิเล็กตรอนชนเข้ากับผิวหน้าของแพลตทินัมจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในตัวเป็นพลังงานความร้อน จากนั้นแพลตทินัมจะเกิดการระเหยเป็นไอขึ้นไปเกาะเป็นชั้นฟิล์มของแพลตทินัมบนซิลิคอนที่เป็นฐานรองรับ

4. กระบวนการแพร่แพลตทินัม

หลังจากการสร้างชั้นแพลตทินัมด้วยกระบวนการ Electron-beam evaporation แล้วจะเป็นขั้นตอนการแพร่อะตอมของแพลตทินัมให้เข้าไปในซิลิคอน โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง 850℃ เป็นเวลา 30 นาที

5. กระบวนการสปัตเตอร์ริง

กระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง (RF sputtering) เป็นกระบวนการเพื่อสร้างชั้นของโลหะโครเมียมหนาประมาณ 500 nm โดยเงื่อนไขของการสร้างชั้นโครเมียมด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริงมีวิธีการดังต่อไปนี้

- ติดเป้าโครเมียมที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.9999% ไว้ที่เพลตด้านบน และวางชิ้นงานไว้ที่เพลตด้านล่างภายในแชมเบอร์
- เปิดปั๊มดูดอากาศภายแชมเบอร์โดยเปิด Rough valve (RV) 1.30 ชั่วโมงเปิด Main valve (MV) 2 ชั่วโมง จนความดันภายในแชมเบอร์ลดลงถึงประมาณ $10^{-6}$ mbar
- ปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าแชมเบอร์แล้วขังก๊าซไว้ที่ความดัน 8x$10^{-3}$ mbar
- ทำการ Pre sputtering โดยจ่ายกำลังไฟฟ้า 100 W และกระแสไฟฟ้า 170 mA เป็นเวลา 30 นาที
- เปิดชัตเตอร์เริ่มการสปัตจริงด้วยเงื่อนไข กำลังไฟฟ้า 75 W, กระแสไฟฟ้า 140 mA, Reflect 20 W และความดันก๊าซอาร์กอน 8x$10^{-3}$ mbar ใช้เวลา 2 ชั่วโมง
- ปิดชัตเตอร์, ลดกำลังไฟฟ้าลง, ปิดก๊าซอาร์กอน, ปิดวาล์วปั๊ม และปิดสวิตช์เครื่องเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ

6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

เป็นการสร้างลวดลายขั้วโลหะโครเมียมด้วยกระจกต้นแบบ ที่เรียกว่า โฟโตมาส์ก (Photomask) ซึ่งมีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ที่ได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจกโฟโตมาส์กจะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนผิวโครเมียม จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นโครเมียมบริเวณนี้ถูกกัดออกไป เมื่อลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นโครเมียมขึ้นตามลวดลายที่เราออกแบบไว้ โดยกระบวนการทั้งหมดมีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นออก ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 10 วินาที และ 2000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (Pre bake) ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบด้วยเครื่องปรับซ้อนมาร์ก (Mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 25 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer)
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (Post bake) ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง
- กัดชั้นโครเมียมส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อสร้างลวดลายขั้วไฟฟ้าโครเมียม โดยใช้สารละลายกัดชั้นโครเมียม ( $Ce(NH_4)_2$ : $HClO_4$ : DI ในอัตราส่วน 50 : 13 : 220 )
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในอะซิโตนเพื่อลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออก
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

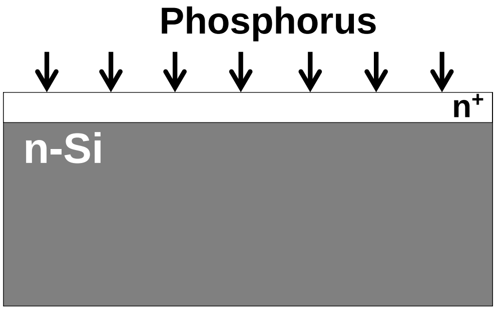
**ภาพตัดขวางสรุปกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดมีดังนี้**

ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น

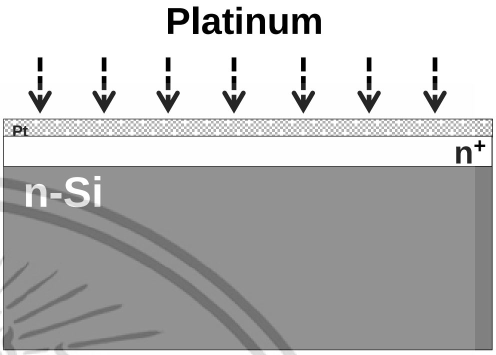
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง ... ครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 3.8** ภาพตัดขวางแสดงกระบวนการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอด

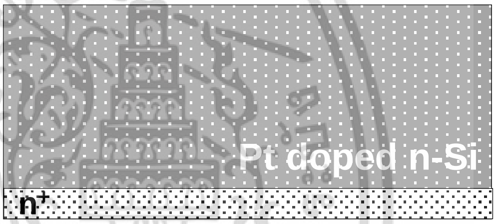
Implantation Phosphorus สร้างชั้น $n^+$
ที่ด้านหลังแผ่น



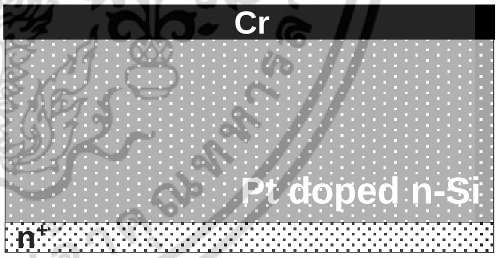

สร้างชั้นแพลตทินัมหนา 20 nm
ที่ด้านหลังแผ่น



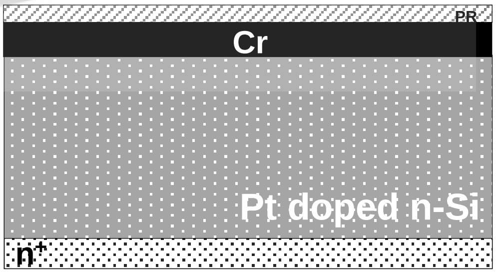

แพร่แพลตทินัมที่อุณหภูมิ 850°C
เป็นเวลา 30 นาที




สร้างชั้นโลหะโครเมียมที่ด้านหน้าแผ่น
หนา 500 nm



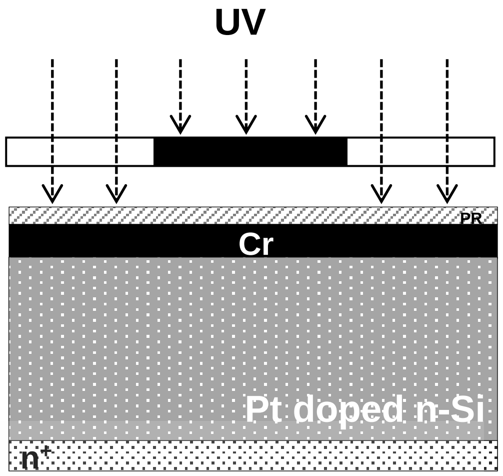

เคลือบน้ำยาไวแสงที่ด้านหน้าแผ่น



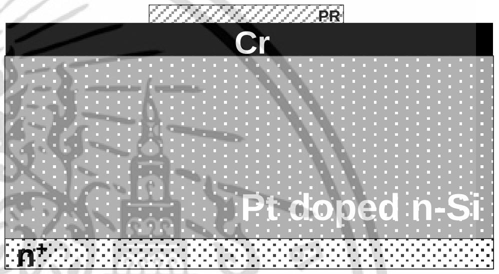

**รูปที่ 3.8 (ต่อ)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

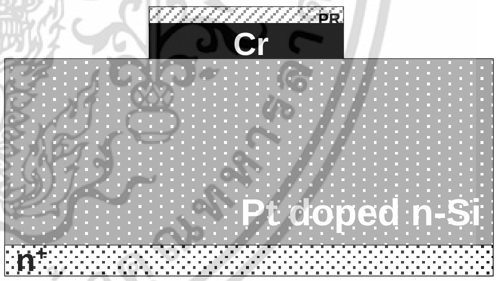
ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ



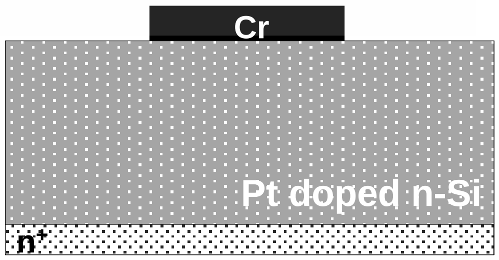

ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลง
ในน้ำยา Developer




กัดชั้นโครเมียมในส่วนที่ไม่ต้องการออก



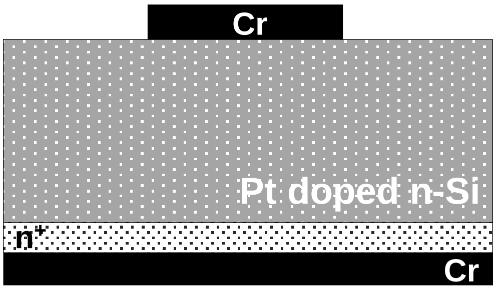

ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออก

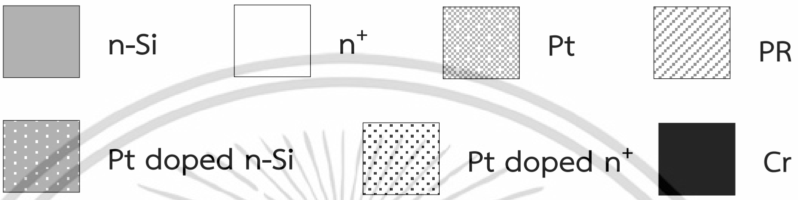



**รูปที่ 3.8 (ต่อ)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างชั้นโลหะโครเมียมที่ด้านหลังแผ่น




**รูปที่ 3.8 (ต่อ)**

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 3.9 จากนั้นจะนำชิ้นงานไปตัดเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

**รูปที่ 3.9** ภาพถ่ายชิ้นงานจริงที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ของช็อตต์กีย์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

# การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

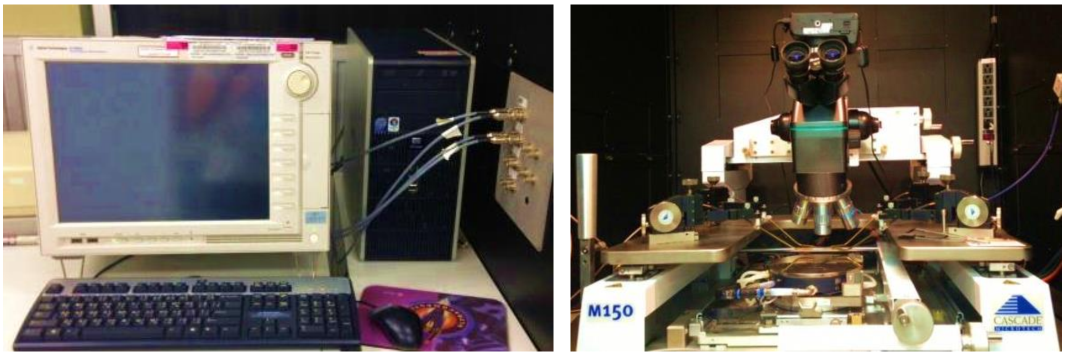
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมโครงสร้าง Cr/n-Si จากนั้นนำช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมมาศึกษาหาค่าพลังงานในการฉายรังสีที่เหมาะสมจากการใช้พลังงานการฉายรังสีที่ 40, 55, 70 และ 85 keV และหาช่วงเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสมจากเวลาการฉายที่ 5, 55 และ 105 วินาทีตามลำดับในการทดลองจะทำการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงานและเวลาที่ได้เลือกจากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น กระแสรั่วไหล ($I_{leak}$), กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ($I_0$), แรงดันภายใน ($V_{bi}$), กำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ($\phi_{bn}$), ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ($W$), ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ($N_D$), ความต้านทานอนุกรม ($R_S$), พลังงานกระตุ้น (Activation energy : $E_A$) และ แฟคเตอร์อุดมคติ (Ideality factor : $n$) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากรังสีเอกซ์โดยรายละเอียดในแต่ละหัวข้อจะนำเสนอดังนี้

## 4.1 การทดลอง

### 4.1.1 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า

ช็อตต์กีย์ไดโอดที่สร้างขึ้นนั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็น Cr/n-Si รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีพื้นที่ใช้งาน (Active area) ขนาด 1 $mm^2$ เมื่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการวัดค่ากระแส-แรงดัน และความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 27-127$^{\circ}$C โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A และ Cascade Microtech Model M150 probe station มี ERS Aircool SP72-300 thermo chuck ดังรูปที่ 4.1 ก. และ ข. ตามลำดับ ซึ่งได้รับการสนับสนุนเครื่องมือการวัดจากศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ในการวัดค่ากระแส-แรงดันไดโอดจะถูกป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 ถึง 10 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 mV และในการวัดความจุไฟฟ้า-แรงดัน จะป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง -10 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 mV และใช้ความถี่ 100 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(ก) (ข)

**รูปที่ 4.1** (ก) เครื่องวิเคราะหคุณลักษณะของอุปกรณสารกึ่งตัวนำAgilent รุน B1500A

(ข) เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe stationมี ERS Aircool SP72-300 thermo chuck

### 4.1.2 การฉายรังสีเอกซ์

ช็อตต์กีไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมจะถูกนำมาศึกษาผลของการฉายรังสีเอกซ์ ซึ่งแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ทำการทดลอง คือ เครื่อง C-ARM SIEMENS SIREMOBIL COMPACT 650 135 ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในการทดลองจะทำการเปลี่ยนค่าพลังงานและเวลาการฉายรังสีเอกซ์ โดยจะแบ่งค่าพลังงานในการฉายออกเป็น 4 พลังงาน ได้แก่ 40, 55, 70 และ 85 keV ตามลำดับ ทำการหาค่าเวลาการฉายรังสีอีกครั้งหนึ่งโดยจะแบ่งเวลาการฉายรังสีออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 5, 55 และ 105 วินาที ตามลำดับ

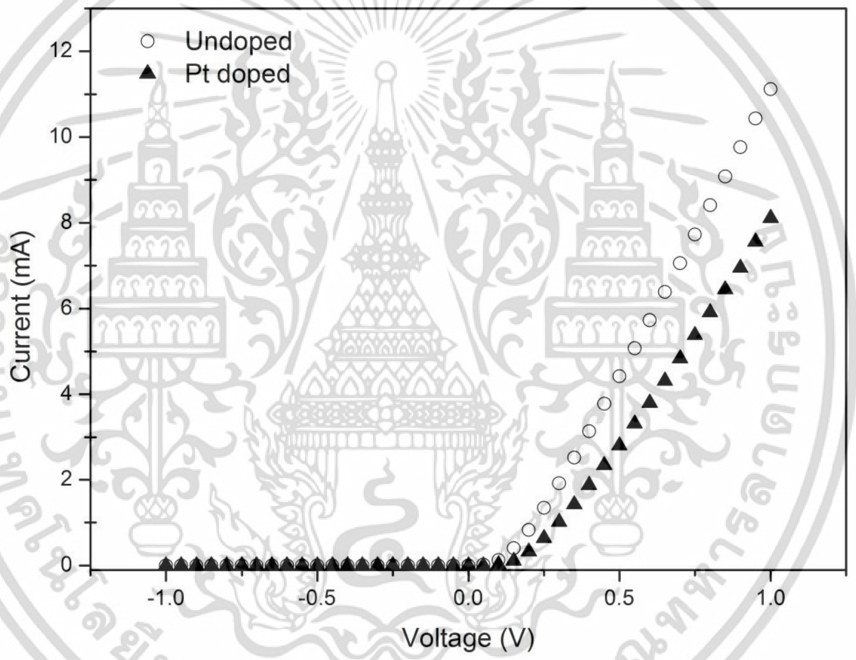
**รูปที่ 4.2** เครื่อง C-ARM SIEMENS SIREMOBIL COMPACT 650 135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม และไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม

### 4.2.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์โครงสร้าง Cr/n-Si ที่ถูกแพร่อะตอมแพลตทินัม และไม่ถูกแพร่อะตอมแพลตทินัม

ก่อนที่จะนำช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมไปฉายรังสีเอกซ์นั้น อันดับแรกต้องศึกษาผลของอะตอมสารเจือแพลตทินัมที่มีต่อลักษณะสมบัติของช็อตต์กีย์ไดโอดเสียก่อน เพื่อเป็นการเก็บผลการทดลองก่อนการฉายรังสีผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม และไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมแสดงดังรูปที่ 4.3

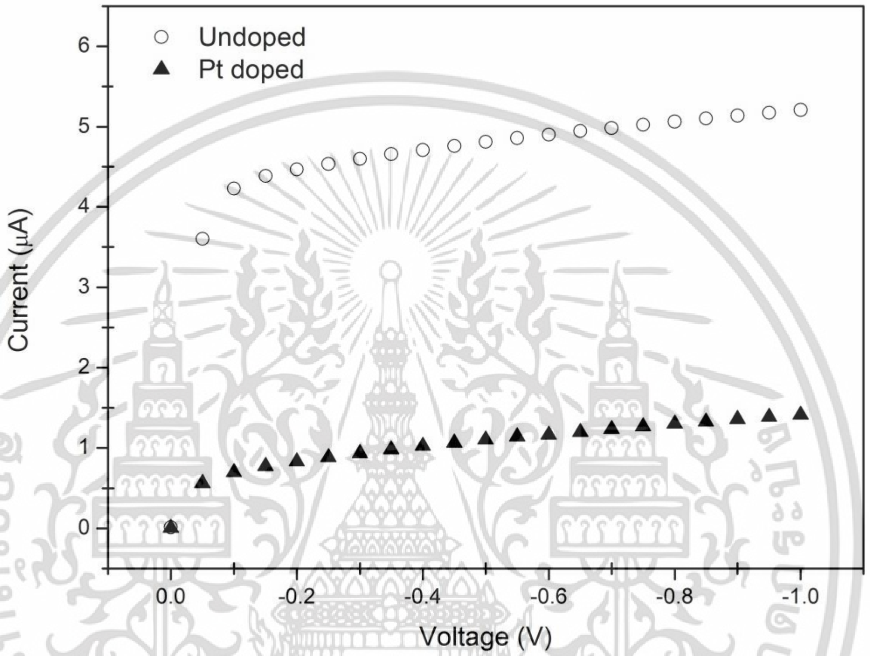



**รูปที่ 4.3** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรง ของรอยสัมผัสระหว่าง Cr/n-Si ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีลักษณะกราฟเป็นแบบเรคทิไฟร์ หรืออาจกล่าวได้ว่ารอยสัมผัสที่เกิดขึ้นนั้นเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตต์กีย์และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นจะมีกระแสต่ำกว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมโดยที่แรงดันไบอัส 1 V ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีกระแสอยู่ที่ 8.11 mA และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีกระแสอยู่ที่ 11.12 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่กระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมลดลงมีสาเหตุมาจากระดับพลังงงานผู้รับ (Acceptor level) ในสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมลงไป ซึ่งระดับพลังงานนี้จะอยู่ต่ำกว่าระดับนำไฟฟ้าอยู่ 0.25 eV ทำหน้าที่ดักจับอิเล็กตรอนโดยอิเล็กตรอนบางส่วนจากแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางด้านโลหะจะเกิดการรวมตัวกับโฮลของแถบพลังงานผู้รับของแพลตทินัมทำให้อิเล็กตรอนที่แถบนำไฟฟ้าลดลงกระแสจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย [7]



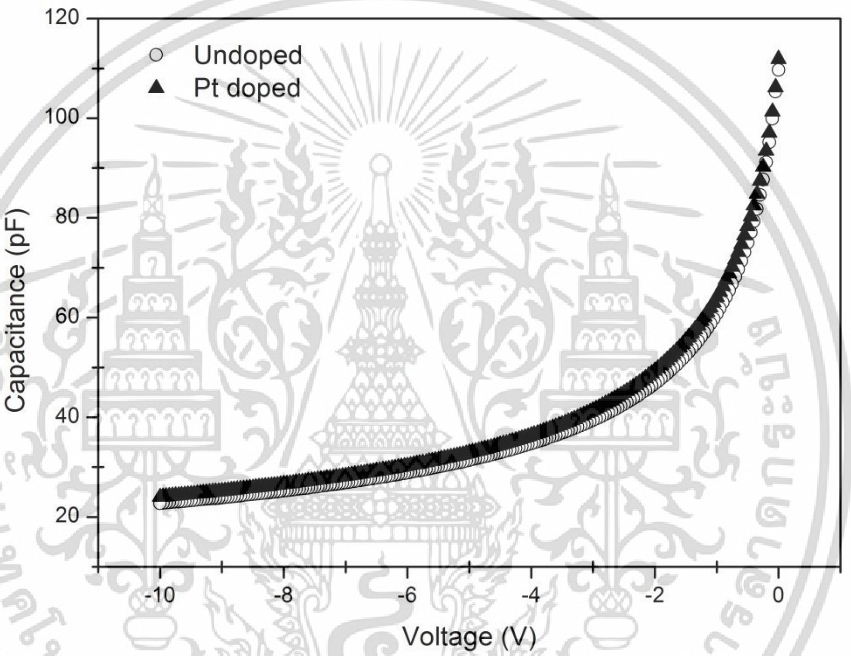

**รูปที่ 4.4** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม

ในส่วนของกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน จากรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม ที่แรงดันไบอัส -1 V มีค่ากระแสรั่วไหล คือ 1.41 μA และ 5.21 μA ตามลำดับซึ่งจะเห็นว่าการแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมลงไปส่งผลให้กระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมการที่กระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมลดลงนั้นมีสาเหตุเช่นเดียวกันกับแรงดันไบอัสตรง แต่จะต่างกันที่ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีทิศตรงข้ามนั่นคืออิเล็กตรอนจากโลหะจะเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อไปยังฝั่งสารกึ่งตัวนำ ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนบางส่วนที่ข้ามผ่านมายังสารกึ่งตัวนำได้จะถูกดักจับโดยระดับพลังงานผู้รับของแพลตทินัมดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากโลหะไปสารกึ่งตัวนำจึงมีค่าลดลง ปริมาณกระแสรั่วไหลจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.2.2 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า–แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์โครงสร้าง Cr/n-Si ที่ถูกแพร่อะตอมแพลตทินัม และไม่ถูกแพร่อะตอมแพลตทินัม**

เมื่อทำการเก็บผลการศึกษากระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่และไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมแล้วต่อไปเป็นการเก็บผลการศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่และไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนการฉายรังสีเอกซ์ การวัดความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์จะทำการวัดโดยใช้เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station เช่นเดียวกับที่ใช้ศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันซึ่งจะป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง -10 V ครั้งละ 50 mV โดยใช้ความถี่ 100 kHz ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.5




**รูปที่ 4.5** ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงกันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม

จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากแรงดันไบอัสที่มากขึ้นทำให้เกิดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง เป็นไปตามสมการที่ 4.1 โดยค่าความจุไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่และถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม ที่แรงดัน 0 V มีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 110 pF และ 112 pF ตามลำดับ

$$C = \frac{A\varepsilon_S}{W} = A\sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2\left(V_{bi} - V_A\right)}} \tag{4.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\varepsilon_S$ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

$q$ คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602\times10^{-19}$ C

$N_D$ คือ อะตอมสรเจือผู้ให้ใน n-Si

$V_{bi}$ คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

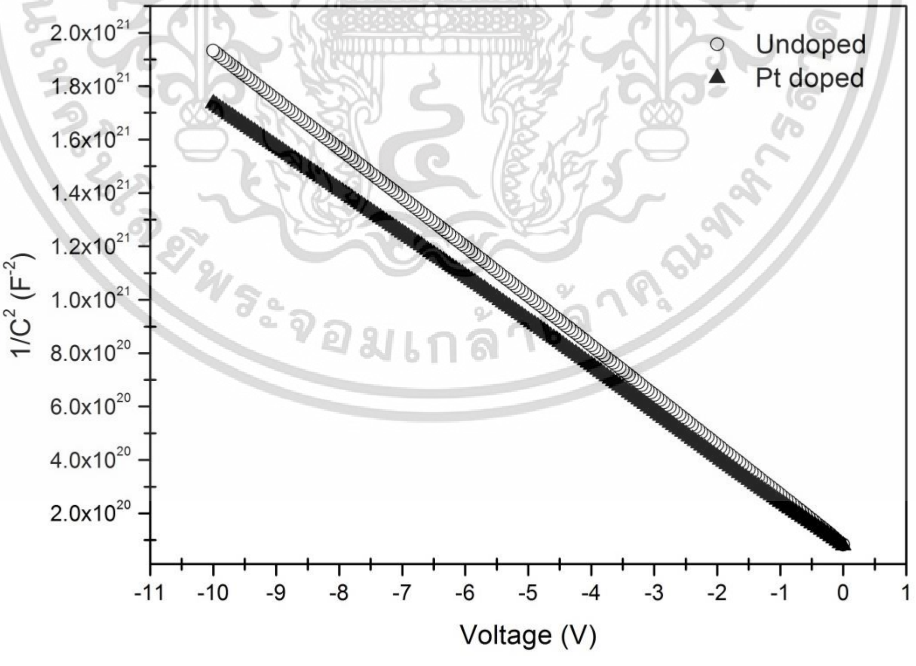
$V_A$ คือ แรงดันไบอัส

$W$ คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันตามสมการที่ 4.1เมื่อเขียนให้อยู่ในรูป $1/C^2$ ดังสมการที่ 4.2 จะสามารถวิเคราะห์เพื่อหาค่าแรงดันภายใน ($V_{bi}$) ของช็อตต์กีย์ไดโอดได้จากจุดตัดแกนแรงดัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ค่าแรงดันภายในของรอยของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมมีค่าประมาณ 0.4 V

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2\left(V_{\mathrm{bi}} - V_{\mathrm{A}}\right)}{Aq\varepsilon_{\mathrm{S}}N_{\mathrm{D}}} \tag{4.2}$$

เมื่อทำการศึกษาผลของแพลตทินัมเสร็จแล้ว ในส่วนการทดลองต่อไปจะเป็นการศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมที่พลังงานและเวลาการฉายรังสีต่างกันในหัวข้อที่ 4.3 จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรและอธิบายผลของที่รังสีเอกซ์เข้าไปมีผลกระทบต่อตัวแปรนั้นๆต่อไปในหัวข้อที่ 4.4 ตามลำดับ




**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์

ในการทดลองนี้จะทำการเปลี่ยนค่าพลังงานและเวลาการฉายรังสีเอกซ์เพื่อให้ได้ค่าพลังงานและเวลาที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลอง โดยในการทดลองจะแบ่งค่าพลังงานในการฉายออกเป็น 4 พลังงาน ได้แก่ 40, 55, 70 และ 85 keV ตามลำดับ จากนั้นจะทำการเลือกค่าพลังงานการฉายที่เหมาะสมจากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ออกมา เสร็จแล้วจะนำค่าพลังงานการฉายรังสีนั้นมาหาค่าเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสมอีกครั้งหนึ่งโดยจะแบ่งเวลาการฉายรังสีออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 5, 55 และ 105 วินาที ตามลำดับ

### 4.3.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส–แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมที่พลังงานการฉายรังสีที่แตกต่างกัน

หลังจากที่ทำการศึกษาช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมแล้วต่อไปจะเป็นการศึกษาผลของพลังงานจากการฉายรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมโดยในการทดลองจะแบ่งค่าพลังงานในการฉายออกเป็น 4 พลังงาน ได้แก่ 40, 55, 70 และ 85 keV และจะใช้เวลาการฉายที่ 55 วินาทีเท่ากัน สาเหตุที่เลือกพลังงานและเวลาเริ่มต้นการทดลองนี้เพราะจากการศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับผลของการฉายรังสีเอกซ์ที่มีต่อไดโอดรอยต่อพีเอ็น พบว่าที่พลังงานการฉายรังสี 40, 55, และ 70 keV เวลาการฉาย 55 วินาที ทำให้กระแสที่แรงดันไบอัสตรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก [42-44] จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะใช้ค่าพลังงานและเวลาเริ่มต้นนี้อ้างอิงจากบทความดังกล่าวด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอเงื่อนไขของการฉายรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้นจากเดิม และทดลองในตัวอุปกรณ์ที่แตกต่างกันในซึ่งจะนำเสนอรูปของพลังงาน (keV) และเวลาการฉายรังสี (Second : s) แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการเปลี่ยนจากค่าพลังงานการฉายรังสีเป็นความเข้มรังสี (Intensity) จะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.8) ความเข้มของรังสีที่สามารถคำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.1

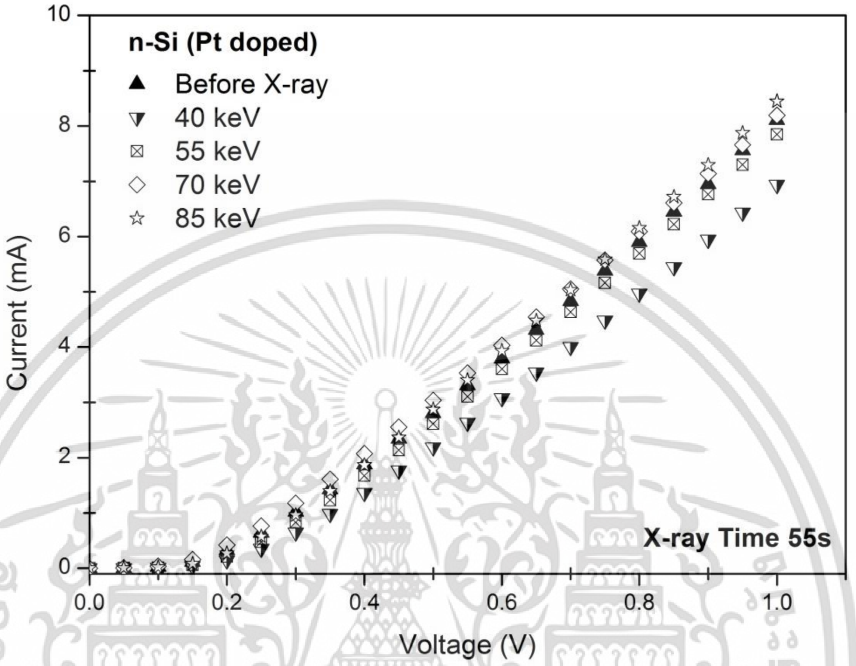
**ตารางที่ 4.1** ความเข้มของรังสีที่พลังงานต่างๆ

| พลังงานรังสีเอกซ์ (keV) | เวลาการฉายรังสี (s) | ความเข้มรังสี (R) |
|---|---|---|
| 40 | 55 | $7.82 \times 10^{5}$ |
| 55 | | $5.18 \times 10^{6}$ |
| 70 | | $5.39 \times 10^{7}$ |
| 85 | | $6.89 \times 10^{7}$ |

ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงานแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.7 จากรูปจะเห็นว่าที่แรงดัน 1 V ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมที่ถูกฉายรังสีที่พลังงาน 40 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการอ่านเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

55 keV มีค่ากระแสอยู่ที่ 6.93 และ7.85 mA ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากระแสลดลงเมื่อเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอดก่อนการฉายรังสี ส่วนที่พลังงาน 70 และ 85 keV มีค่ากระแส 8.19 และ 8.45 mA ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่พลังงาน 85 keV มีกระแสเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าพลังงานการฉายอื่น โดยก่อนฉายที่มีกระแสเท่ากับ 8.11 mA

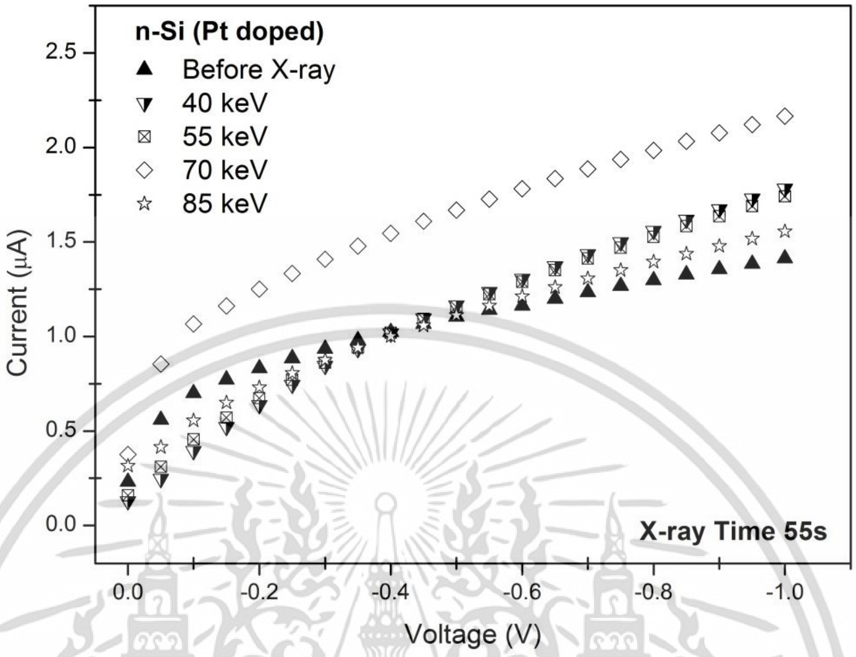



**รูปที่ 4.7** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 40, 55, 70 และ 85 keV

ส่วนลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับแสดงได้ดังรูป 4.8 จากรูปจะเห็นว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 40, 55, 70 และ 85 keV จะมีกระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นทุกค่าพลังงานเมื่อเทียบกับก่อนฉายรังสี โดยที่แรงดันไบอัส -1 V มีค่ากระแสรั่วไหล คือ 1.78, 1.74, 2.17 และ 1.56 μA ตามลำดับ ซึ่งก่อนฉายรังสีมีค่ากระแสรั่วไหลเท่ากับ 1.41 μA โดยที่พลังงานการฉายรังสีที่ 85 keV จะมีค่ากระแสรั่วไหลที่เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด จากผลการทดลองในการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานการฉายรังสีเอกซ์แก่ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม จะเห็นว่าที่พลังงานการฉายรังสีที่ 85 keV ทำให้กระแสทางด้านไบอัสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนฉายเล็กน้อย ส่วนด้านแรงดันไบอัสย้อนกลับก็มีค่ากระแสรั่วไหลที่เพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนฉายรังสีแต่เป็นการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าพลังงานการฉายรังสีที่พลังงานอื่น ด้วยเหตุนี้จึงเลือกค่าพลังงานที่ 85 keV ไปทำการศึกษาเกี่ยวกับเวลาในการฉายรังสีเอกซ์ต่อไปสำหรับในการศึกษาเวลาการฉายรังสีเอกซ์นั้นได้ทำการศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับผลของความต้านทานอนุกรมหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่เวลาแตกต่างของไดโอดรอยต่อพีเอ็นพบว่าได้มีการใช้เวลาการฉายในช่วง 5, 55 และ 205 วินาที ที่พลังงาน 70 keV ค่าความต้านทานอนุกรมหลังการฉายรังสีลดลงอย่างมากแต่ที่เวลาการฉาย 205 วินาที ทำให้ความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นกว่าที่เวลา 55 วินาทีเล็กน้อยจึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะศึกษาช่วงเวลาการฉายรังสีที่ลดลงจากเดิมดังนั้นในการเลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงเวลาการฉายรังสีที่ 5, 55 และ 105 วินาที ซึ่งเป็นการเพิ่มเวลาขึ้นในลักษณะเป็นเท่าๆอาจส่งผลให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจากเวลาการฉายรังสีในการทดลองต่อไปได้




**รูปที่ 4.8** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 40, 55, 70 และ 85 keV

**4.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส–แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมที่เวลาการฉายรังสีที่แตกต่างกัน**

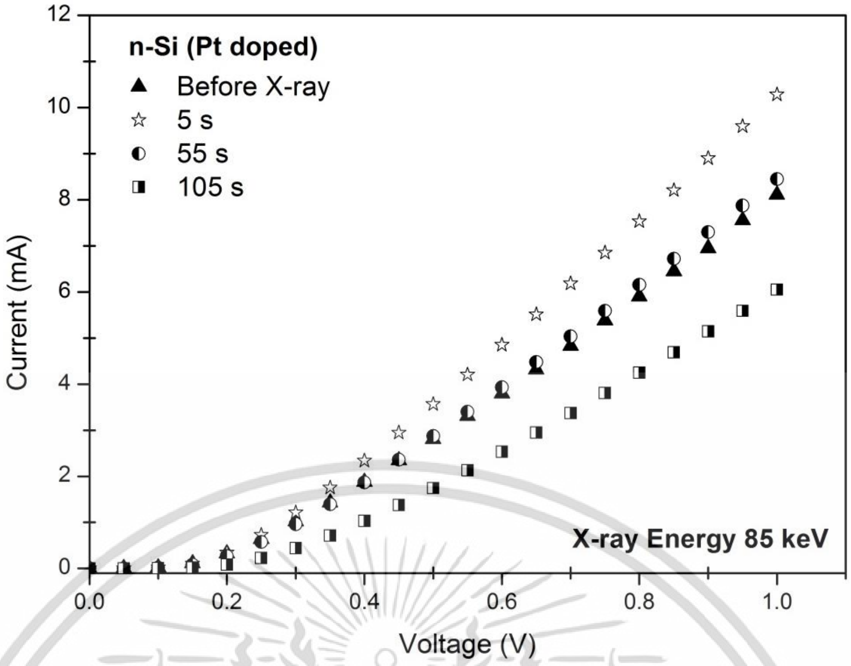
จากการทดลองการฉายรังสีที่พลังงานแตกต่างกันพบว่าที่พลังงานการฉายรังสีที่ 85 keV ถูกเลือกที่จะนำมาศึกษาถึงเวลาการฉายรังสีต่อไป เพราะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงที่มีกระแสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังการฉายรังสีและทางด้านไบอัสย้อนกลับมีกระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่ากระแสรั่วไหลที่พลังงานการฉายรังสีอื่น

ในการทดลองหาค่าเวลาการฉายรังสีจะแบ่งเวลาการฉายออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 5, 55 และ 105 วินาที ซึ่งสามารถหาค่าความเข้มของรังสีที่เวลาการฉายที่แตกต่างกันได้ตามตารางที่ 4.2

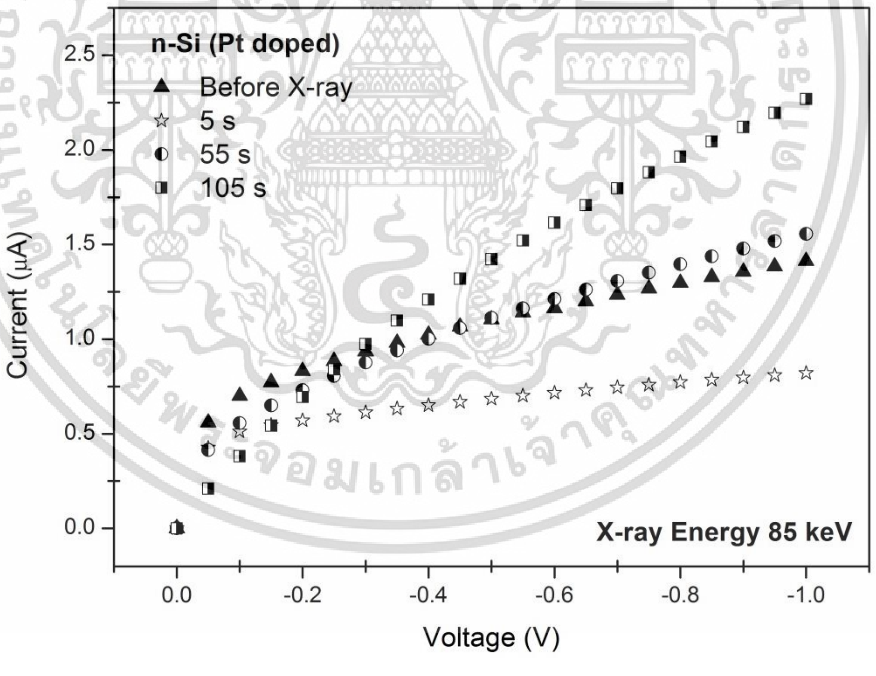
**ตารางที่ 4.2** ความเข้มของรังสีที่พลังงาน 85 keV ด้วยเวลาการฉายต่างๆ

| พลังงานรังสีเอกซ์ (keV) | เวลาการฉายรังสี (s) | ความเข้มรังสี (R) |
|---|---|---|
| 85 | 5 | $6.26 \times 10^6$ |
| | 55 | $6.89 \times 10^7$ |
| | 105 | $1.31 \times 10^8$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.9** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่เวลาการฉายรังสีเอกซ์ 5, 55 และ 105 วินาที



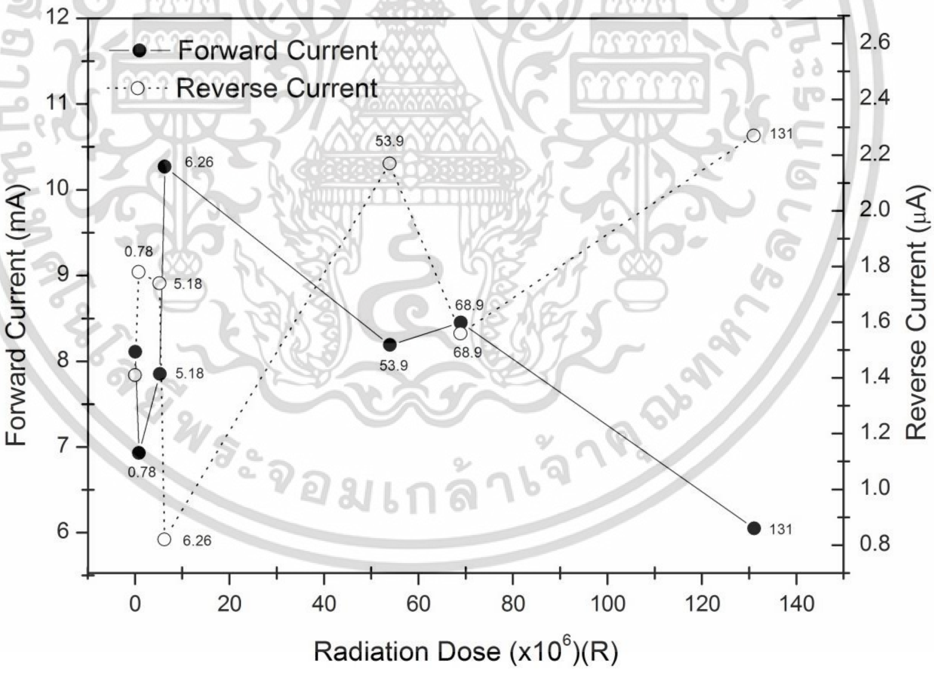

**รูปที่ 4.10** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่เวลาการฉายรังสีเอกซ์ 5, 55 และ 105 วินาที

ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่เวลาการฉายรังสีที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.9 จากรูปพบว่าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาการฉายรังสีที่ 105 วินาที มีค่ากระแสที่ลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสี โดยที่แรงดันไบอัส 1 V มีค่ากระแสอยู่ที่ 6.05 mA ส่วนที่เวลาการฉายรังสีที่ 55 วินาที มีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนฉายเล็กน้อย มีค่ากระแสที่แรงดันเดียวกันอยู่ที่ 8.45 mA และที่ 5 วินาที มีค่ากระแสเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนฉายรังสีเอกซ์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีค่ากระแสอยู่ที่ 10.27 mA โดยก่อนฉายมีค่ากระแสเท่ากับ 8.11 mA

ในส่วนของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 4.10 จากรูปจะเห็นว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมที่เวลาการฉายรังสีที่ 55 และ 105 วินาที จะมีกระแสรั่วไหลที่เพิ่มขึ้นมากกว่าช็อตต์กีย์ไดโอดก่อนการฉายรังสี ซึ่งที่แรงดันไบอัส -1 V มีค่ากระแสรั่วไหลอยู่ที่ 1.56 μA และ 2.27 μA ตามลำดับ แต่ที่เวลาการฉายรังสีที่ 5 วินาที ช็อตต์กีย์ไดโอดกลับมีกระแสรั่วไหลที่ลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสีโดยที่แรงดันไบอัส -1 V มีกระแสรั่วไหลเพียง 0.82 μA ซึ่งก่อนฉายรังสีมีค่ากระแสรั่วไหลเท่ากับ 1.41 μA จะเห็นว่ารังสีเอกซ์เมื่อฉายให้กับอุปกรณ์ในพลังงานและเวลาที่ไม่เหมาะสมอาจกลายเป็นการทำลายโครงสร้างบางอย่างในตัวอุปกรณ์ได้ แต่ในทางกลับกันถ้าใช้พลังงานและเวลาที่เหมาะสม ซึ่งในการทดลองนี้คือ ที่พลังงาน 85 keV เวลาการฉาย 5 วินาที กลับทำให้ได้กระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงเพิ่มขึ้น และกระแสรั่วไหลลดลงอีกด้วย เมื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์กับกระแสไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับดังรูปที่ 4.11




**รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มรังสีเอกซ์กับกระแสไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม

จากรูปพบว่าที่ปริมาณความเข้มรังสีที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อลักษณะสมบัติกระแสทางด้านไบอัสตรงและไบอัสกลับที่แตกต่างกัน จากแนวโน้มของกราฟปริมาณความเข้มของรังสีพบว่าที่ปริมาณความเข้ม $6.26 \times 10^{6}$ R สามารถทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้านกระแส-แรงดันของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช็อตต์กีย์ไดโอดที่แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมดีขึ้น โดยมีแนวโน้มของกระแสทางด้านไบอัสตรงที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุด อีกทั้งยังมีกระแสทางด้านไบอัสกลับหรือกระแสรั่วลดลงต่ำที่สุด ซึ่งปริมาณความเข้ารังสีอื่นๆกลับมีแนวโน้มที่ทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าแย่ลง ดังนั้นในการทดลองนี้ถือว่าปริมาณความเข้มรังสี $6.26 \times 10^{6}$ R เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการปรับปรุงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมในหัวข้อถัดไปจะทำการศึกษาตัวแปรอื่นๆ ที่ได้รับอิทธิพลจากการฉายรังสีเอกซ์ในหัวข้อที่ 4.4

## 4.4 การศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆ ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที กับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม

### 4.4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเปรียบเทียบกันระหว่างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที กับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม

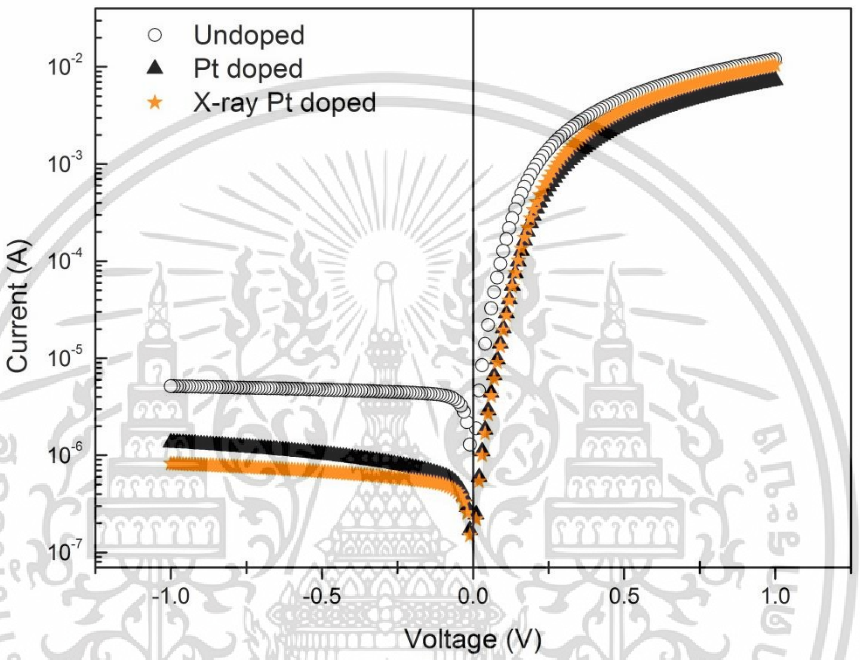
ในช่วงแรกเราได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่และไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม ซึ่งมีลักษณะสมบัติเป็นรอยต่อแบบเรคทิไฟร์ ดังรูปที่ 4.3 และยังพบว่ากระแสทั้งทางด้านไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับของไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นมีค่าลดลง ซึ่งเป็นข้อดีทางด้านไบอัสย้อนกลับที่แพลตทินัมสามารถช่วยลดกระแสรั่วไหลของไดโอดได้จากการเข้าไปสร้างแถบพลังงานที่ดักจับอิเล็กตรอน แต่ทางด้านไบอัสตรงที่มีกระแสลดลงด้วยนั้นยังถือว่าไม่ดีเท่าที่ควรต่อจากนั้นได้ทำทดลองการฉายรังสีเอกซ์แก่ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมที่พลังงานและเวลาต่างกันจนสามารถเลือกค่าพลังงานและเวลาที่เหมาะสมสำหรับในการทดลองครั้งนี้นั่นคือ ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที ด้วยค่าพลังงานและเวลานี้สามารถทำให้ค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนการฉายรังสี อีกทั้งยังทำให้กระแสรั่วไหลลดลงไปมากกว่าเดิมอีกด้วย ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆที่ได้รับผลจากรังสีเอกซ์ และทำการเปรียบเทียบกันระหว่างช็อตต์กีย์ไอโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์

#### 4.4.1.1 ความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์

ความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ถือเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์นั้นสามารถบ่งบอกถึงปริมาณกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นได้สำหรับค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์สามารถคำนวณหาได้จากค่ากระแส-แรงดันโดยการนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันมาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (แกนตั้ง) ในแบบกึ่งล็อก (Semi-log) กับแรงดันไบอัส (แกนนอน) ในลักษณะเชิงเส้นโดยสามารถหากระแสรั่วของรอยสัมผัสจากจุดตัดแกนที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟสามารถหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV ด้วยเวลา 5 วินาที ได้ 4, 0.5 และ 0.5 μA ตามลำดับ จากนั้นจะทำการคำนวณหาค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ของไดโอดที่ไม่ถูกแพร่และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ คือ 0.62, 0.67 และ 0.67 eV ตามลำดับ




**รูปที่ 4.12** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดในเงื่อนไขต่างๆ

กระแสรวมของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์จะมีค่าเท่ากับ

$$I = I_0\left\{\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)-1\right\} \tag{4.3}$$

เมื่อ $V_A$ = 0 V เป็นผลให้ $I$ มีค่าเท่ากับ $I_0$
โดย $I_0$ คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

$$I_0 = AA^*T^2\exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \tag{4.4}$$

ดังนั้นความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์จึงสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \tag{4.5}$$

โดยที่ $k$ คือ ค่าคงที่ของโบลต์มันน์ 1.38x10$^{-23}$ (J/K)

$T$ คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K)

$A^*$ คือ ค่าคงที่ริชาร์ดสัน มีค่าประมาณ 110 A.cm$^{-2}$.K$^{-2}$ (n-Si)

$A$ คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm$^2$)

$q$ คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน 1.602x10$^{-19}$ (C)

จากค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ของไดโอดที่แพร่แพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะสามารถทำได้ยากมากขึ้น ทำให้กระแสทางด้านไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับน้อยลงนั่นเอง แต่ผลของไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังฉายรังสีเอกซ์ที่มีค่ากระแสรั่วไหลลดลง และกระแสทางด้านไบอัสตรงเพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนฉายรังสีนั้นยังต้องหาค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นในการวิเคราะห์ต่อไป

นอกจากวิธีการวิเคราะห์หาค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ที่ได้นำเสนอไปข้างต้นแล้วยังมีอีกวิธีหนึ่งคือการใช้เทคนิคของ Cheung วิธีนี้ยังทำให้เราทราบค่าแฟคเตอร์อุดมคติ (Ideality factor : $n$) และค่าความต้านทานอนุกรมซึ่งเป็นตัวแปรที่คาดการณ์ว่าน่าจะได้รับผลกระทบจากการฉายรังสีเอกซ์ได้อีกด้วย วิธีนี้เป็นเทคนิคการประมาณค่าตัวแปรจากลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันจากการให้ไบอัสตรง ในเทอมของ $d(V)/d(\ln J)$ กับ $J$ และในเทอมของ $H(J)$ กับ $J$ โดยจะสามารถพิจารณาช็อตต์กีย์ไดโอดที่มีค่าแฟคเตอร์ทางอุดมคติกว้างขึ้นในช่วง 1 < $n$ < 2 ทำให้ทำการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยเริ่มต้นพิจารณาจากสมการที่ 4.6

$$I = I_S \exp[\frac{q(V - IR_S)}{nkT}] \tag{4.6}$$

โดยที่ $I_S$ คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)

$V$ คือ แรงดันตกคร่อมไดโอดทั้งหมด ซึ่งรวมแรงดันตกคร่อมโอด ($V_D$) และแรงดันเนื่องจากความต้านทานอนุกรม ($IR$) ในสารกึ่งตัวนำ

$R_S$ คือ ความต้านทานอนุกรมภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ($\Omega$)

$n$ คือ แฟคเตอร์ทางอุดมคติ (Ideality factor)

จัดรูปสมการที่ 4.6ให้อยู่ในเทอมของความหนาแน่นกระแส ($J$) เสร็จแล้วทำการดิฟเฟอเรนทิเอท (Differentiate) เทียบกับ $J$ แล้วจัดเทอมใหม่ จะได้ดังสมการ 4.7กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d(V)}{d(lnJ)}$ กับ $J$ จะสามารถหาค่าแฟคเตอร์อุดมคติได้จากจุดตัดแกนตั้ง ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $\frac{nkT}{\mathrm{q}}$ และสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมได้จากความชันของกราฟซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $R_S A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d(V)}{d\ln(J)} = R_S AJ + \frac{nkT}{q} \quad (4.7)$$

จากสมการที่ 4.6 จัดให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) และนำไปเขียนในเทอมของ $H(J)$ กับ $J$ จะได้สมการที่ 4.8

$$H(J) = V - (\frac{nkT}{q})\ln(JA^*T^2) \quad (4.8)$$

เมื่อลดรูปสมการที่ 4.8 จะได้สมการที่ 4.9 ซึ่งมีความชันกราฟเท่ากับ $R_S A$ และสามารถหาค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ได้จากจุดตัดแกน y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $n\phi_{bn}$

$$H(J) = R_S AJ + n\phi_{bn} \quad (4.9)$$

โดยที่ $k$ คือ ค่าคงที่ของโบลต์มันน์ 1.38x10$^{-23}$ (J/K)

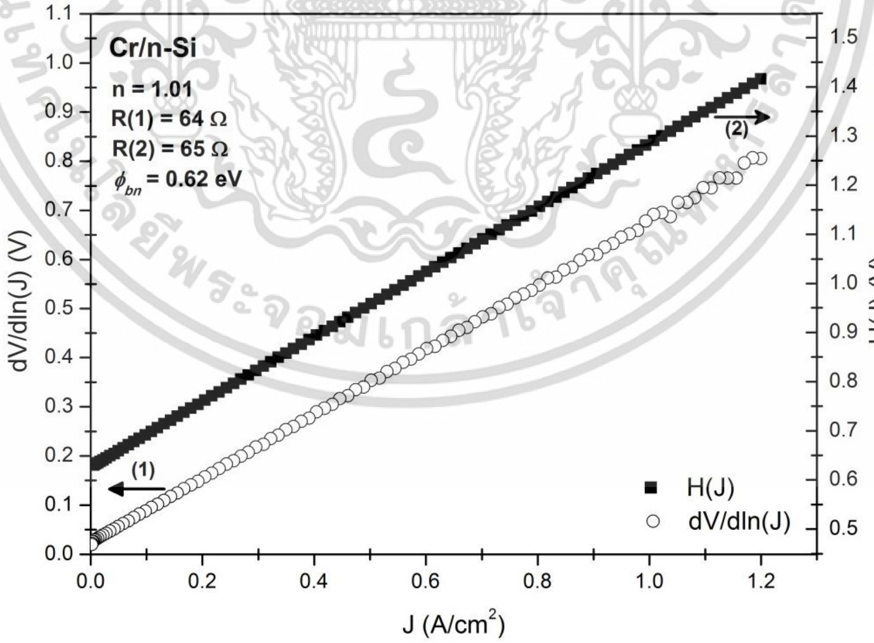
$n$ คือ แฟคเตอร์อุดมคติ

$R_S$ คือ ความต้านทานอนุกรม (Ω)

$A$ คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm$^2$)

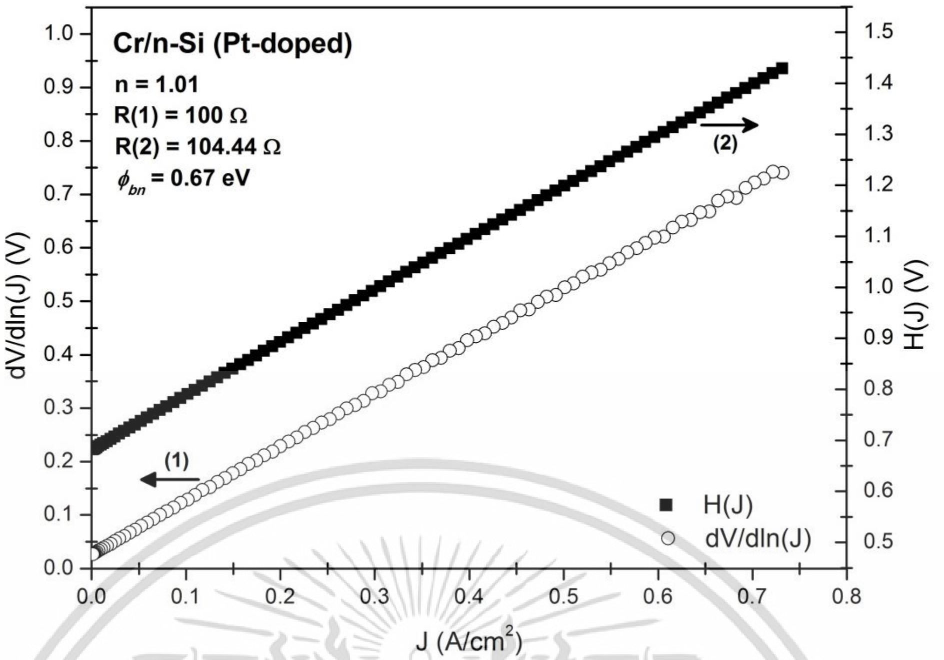
$J$ คือ ความหนาแน่นกระแส (A/cm$^2$)

เทคนิคการวิเคราะห์ของ Cheung แสดงได้ดังรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ

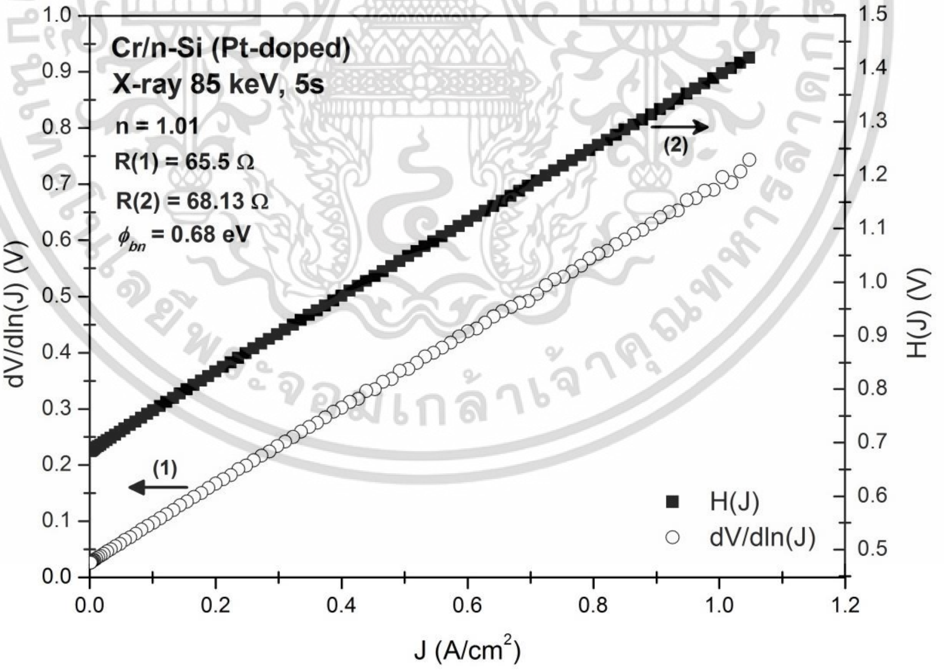



**รูปที่ 4.13** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันจากการให้ไบอัสตรงในเทอมของ $d(V)/d(\ln J)$ กับ $J$ และ $H(J)$ กับ $J$ ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมเพื่อใช้หาค่า $n$, $R$ และ $\phi_{bn}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.14** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันจากการให้ไบอัสตรงในเทอมของ $d(V)/d(\ln J)$ กับ $J$ และ $H(J)$ กับ $J$ ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมเพื่อใช้หาค่า $n$ , $R$ และ $\phi_{bn}$




**รูปที่ 4.15** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันจากการให้ไบอัสตรงในเทอมของ $d(V)/d(\ln J)$ กับ $J$ และ $H(J)$ กับ $J$ ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังการฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 85 keV ที่เวลา 5 วินาที เพื่อใช้หาค่า $n$ , $R$ และ $\phi_{bn}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์สามารถคำนวณค่า $n$ = 1.01 เท่ากัน ค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์มีค่า 0.62, 0.67 และ 0.68 eV ตามลำดับ ค่าความต้านทานอนุกรม R(1) = 64, 100 และ 65.5 $\Omega$ ตามลำดับ และค่าความต้านทานอนุกรม R(2) = 65, 104.44 และ 68.13 $\Omega$ ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าค่าความต้านทานอนุกรมที่หาได้มีอยู่ 2 ค่า คือ ค่า R(1) ซึ่งเป็นค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้จากความชันกราฟของ $\frac{d(V)}{d(lnJ)}$ กับ $J$ และ R(2) เป็นค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้จากความชันกราฟ $H(J)$ กับ $J$ ซึ่งค่าความต้านทานที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกค่าความต้านทานอนุกรมจากความชันกราฟของ $\frac{d(V)}{d(lnJ)}$ กับ $J$ มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ จากผลการทดลองสามารถสรุปค่าตัวแปลได้ดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากเทคนิคของ Cheung

| Schottky diode | Ideality factor ( $n$ ) | $R_s^{(1)}$ ($\Omega$) | $R_s^{(2)}$ ($\Omega$) | $\phi_{bn}$ (eV) |
|---|---|---|---|---|
| Undoped | 1.01 | 64 | 65 | 0.62 |
| Pt doped | 1.01 | 100 | 104.44 | 0.67 |
| X-ray Pt doped | 1.01 | 65.5 | 68.13 | 0.68 |

**หมายเหตุ** $R_s^{(1)}$ จากกราฟ $d(V)/d(\ln J)$ กับ $J$ และ $R_s^{(2)}$ จากกราฟ $H(J)$ กับ $J$

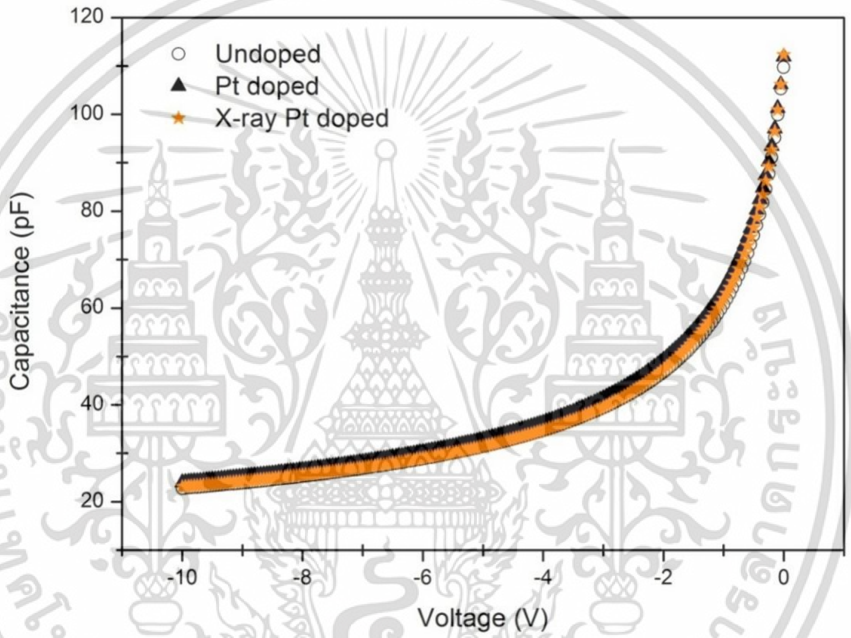
จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 4.3 ค่า $n$ = 1.01 เท่ากันทั้งสามเงื่อนไขซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไดโอดในอุดมคติแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรงดันต่ำๆ กระแสการเกิดพาหะและการรวมตัวของพาหะมีปริมาณน้อย ส่วนค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์มีค่าใกล้เคียงกับการหาในวิธีแรก ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมจะมีค่ากำแพงศักย์ต่ำที่สุด เมื่อแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์เพิ่มขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนข้ามผ่านรอยสัมผัสทำได้ยากมากขึ้น อีกทั้งยังถูกดักจับจากแถบพลังงานผู้รับของแพลตทินัมและแถบพลังงานที่เกิดจากจุดบกพร่องต่างๆ ทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่ากระแสไบอัสตรงและไบอัสกลับที่มีค่าลดลง เมื่อนำช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมไปฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที พบว่าค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์มีค่าใกล้เคียงกับช็อตต์กีย์ไดโอดก่อนฉายรังสีแต่ความต้านอนุกรมนั้นมีค่าลดลงใกล้เคียงกับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมแสดงให้เห็นว่าพลังงานและเวลาการฉายรังสีเอกซ์นี้ส่งผลต่อค่าความต้านทานอนุกรมเพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์เข้าไปจะช่วยทำให้จุดบกพร่องเดิมที่มีอยู่แล้วภายในเนื้อซิลิคอนและจุดบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการสร้าง เช่น การไอออนอิมแพลนเทชัน การแพร่อะตอมสารเจือ เป็นต้น มีจำนวนลดลง โครงสร้างผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้นความต้านทานจึงมีค่าลดต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้นค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงจึงเพิ่มขึ้นและทำให้กระแสทางด้านไบอัสกลับลดลงอีกด้วยเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนขึ้นจะทำการศึกษาผลของลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันต่อไป

**4.4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาทีเปรียบเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม**

การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันเป็นการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ($W$), ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ($N_D$) และยังสามารถหาค่าแรงดันภายใน ($V_{bi}$) ได้อีกด้วยค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 4.16




**รูปที่ 4.16** ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที

จากรูปที่ 4.16 เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากแรงดันไบอัสที่มากขึ้นทำให้เกิดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงจะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที มีค่าใกล้เคียงกันโดยที่แรงดัน 0 V มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 110, 112 และ 112 pF ตามลำดับ ส่วนความกว้างบริเวณปลอดพาหะสามารถหาได้จากสมการที่ 4.10 และแสดงได้ดังรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (4.10)$$

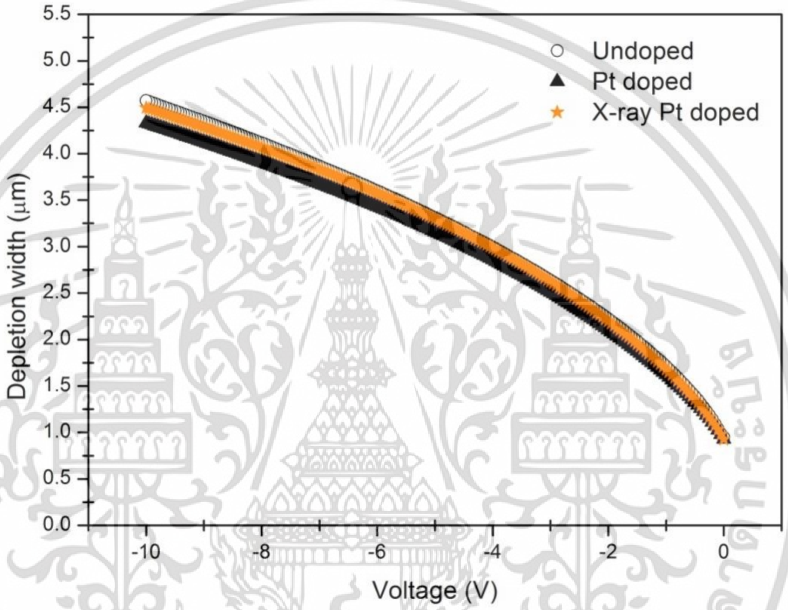
โดยที่ $\varepsilon_S$ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

$q$ คือ ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C

$N_D$ คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

$V_{bi}$ คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ (V)

$V_A$ คือ แรงดันไบอัส (V)



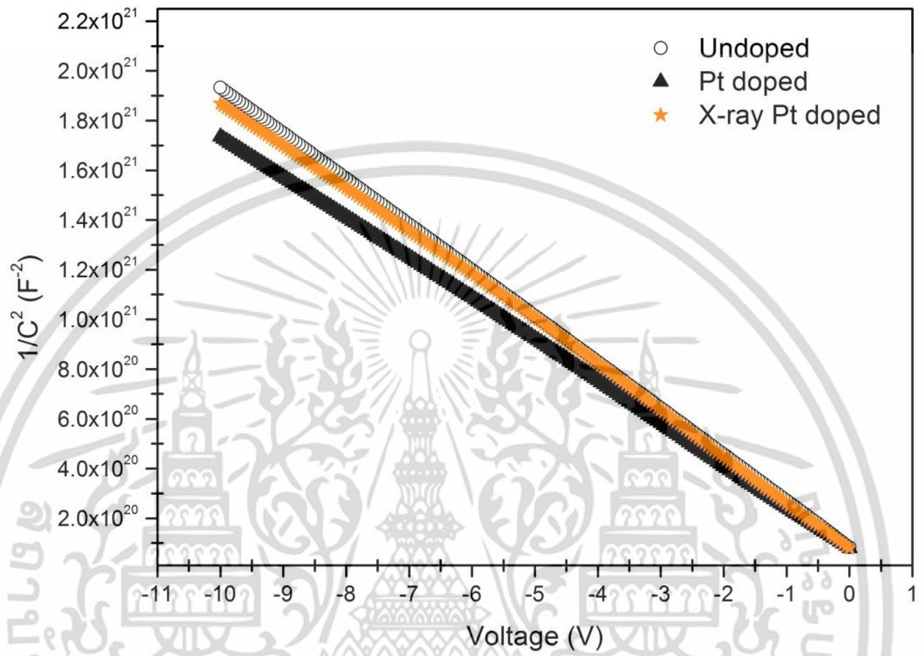

**รูปที่ 4.17** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความกว้างบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับมากขึ้นจะส่งผลให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะทั้งสามเงื่อนไขไม่แตกต่างกันมากนักโดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันไบอัส -10 V ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมมีค่าประมาณ 4.57 μm ส่วนช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม มีค่าประมาณ 4.33 μm และสุดท้ายช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังฉายรังสีเอกซ์มีค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะประมาณ 4.5 μm

จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันตามสมการที่ 4.1 เมื่อเขียนให้อยู่ในรูป $1/C^2$ ดังสมการที่ 4.2 จะสามารถวิเคราะห์เพื่อหาค่าแรงดันภายใน ($V_{bi}$) ของช็อตต์กีย์ไดโอดได้จากจุดตัดแกนแรงดัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ค่าแรงดันภายในของรอยของช็อตต์กีย์ไดโอดไม่ถูกแพร่อะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.4 V ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ทั่วไปที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.2-0.4 V แสดงให้เห็นว่ารอยสัมผัสระหว่างโครเมียมและซิลิคอนมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ และพลังงานจากการฉายรังสีไม่ทำให้รอยสัมผัสนั้นเปลี่ยนแปลงไป



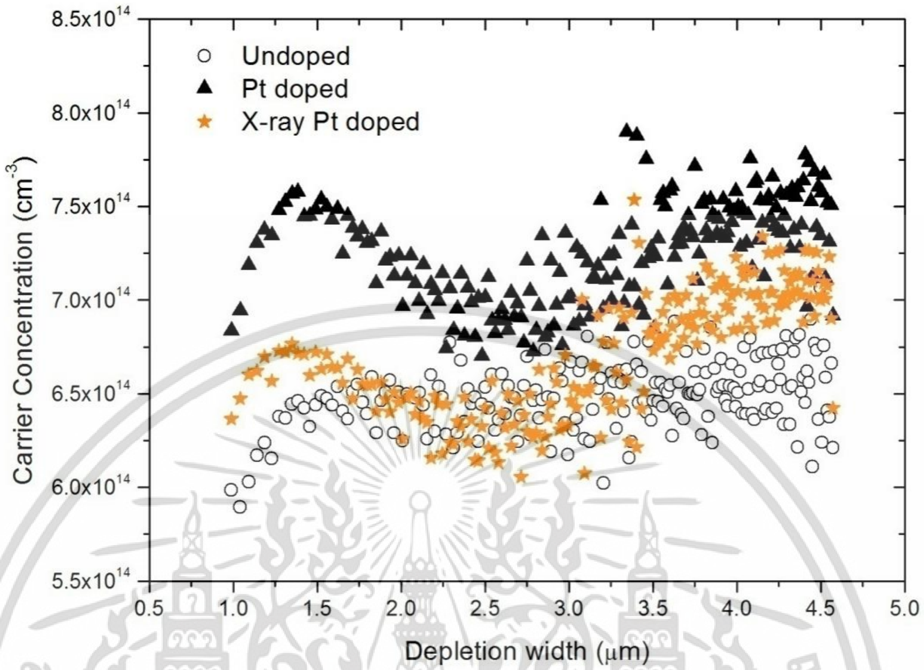

**รูปที่ 4.18** ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที

**4.4.3 การศึกษาความหนาแน่นพาหะเปรียบเทียบระหว่างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาทีและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม**

จากผลของลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที กับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นมีค่าความจุไฟฟ้าใกล้เคียงกัน แสดงว่ารังสีเอกซ์ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความจุไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดดังนั้นต่อไปจะทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นพาหะ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความจุไฟฟ้าตามสมการที่ (4.2) จะสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นพาหะได้จากความชัน $(slope = 2 / A^2 q \varepsilon_S N_D)$ ของกราฟรูปที่ 4.18 ความหนาแน่นพาหะของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $6.5 \times 10^{14}$ $cm^{-3}$ ความหนาแน่นพาหะของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์จะอยู่ที่ $7.2 \times 10^{14}$ และ $6.7 \times 10^{14}$ $cm^{-3}$ ตามลำดับ จะเห็นว่าหลังแพร่แพลตทินัมพาหะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่เมื่อทำการฉายรังสีแล้วพาหะจะลดลงเล็กน้อย เมื่อทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นพาหะกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ จะได้ดังกราฟรูปที่ 4.19




**รูปที่ 4.19** ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพาหะกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที

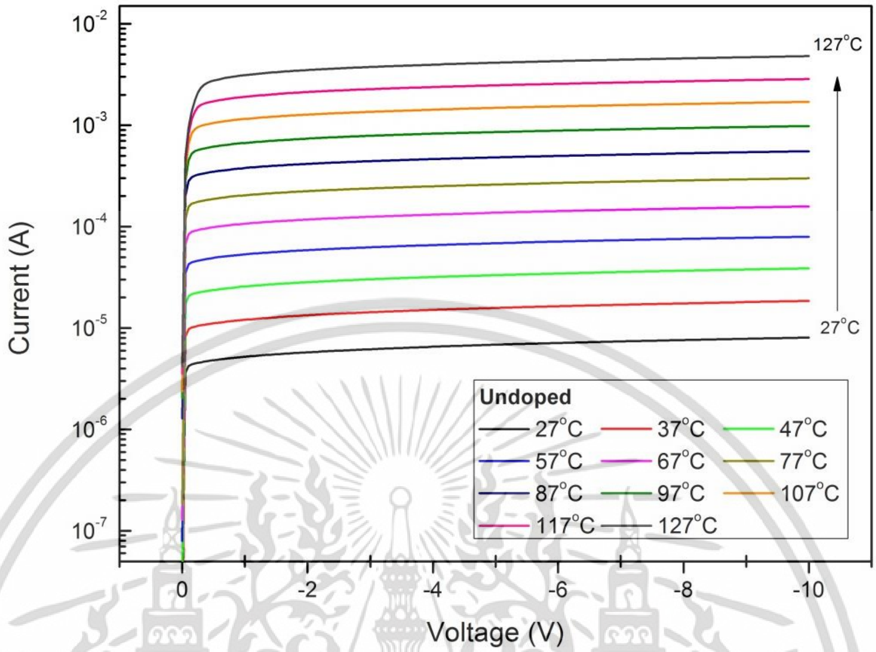
จากรูปจะเห็นว่าช็อตต์กีย์ไดโอดเมื่อแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมเข้าไปทำให้พาหะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเมื่อนำช็อตต์กีย์ไดโอดที่แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมไปทำการฉายรังสีเอกซ์พบว่าความหนาแน่นของพาหะหลังฉายรังสีจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเช่นกัน จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าพลังงานจากรังสีเอกซ์สามารถลดจำนวนพาหะที่เกิดจากการแพร่แพลตทินัมหรือพาหะในโครงสร้างผลึกลงได้บางส่วน โดยรังสีเอกซ์ที่ฉายนั้นจะเข้าไปสั่นอะตอมที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างผลึกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะช่วยทำให้โครสร้างอะตอมในผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้น ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าจึงดีขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสี

**4.4.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาทีและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม**

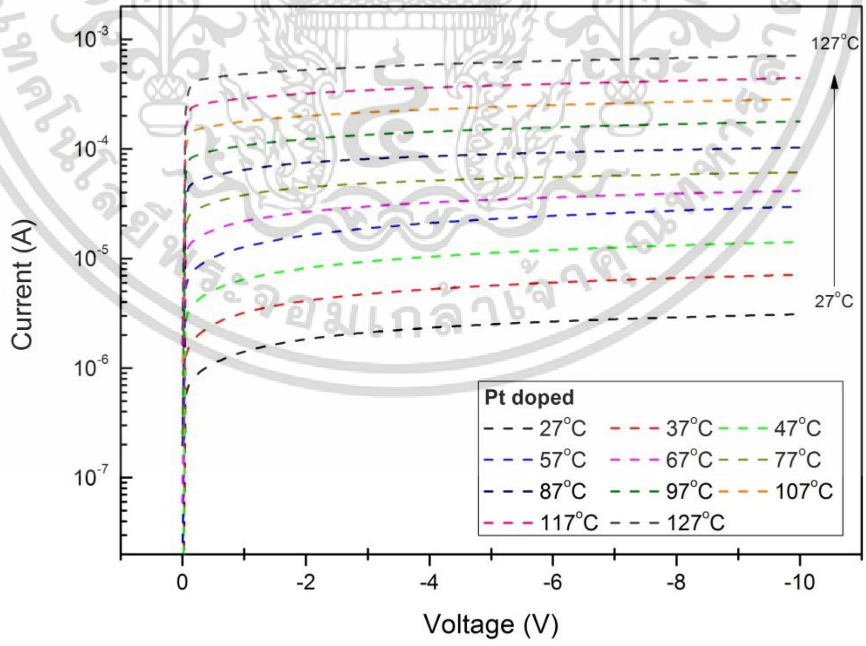
อุณหภูมินับว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อตัวลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์โดยเฉพาะกระแสรั่วไหล ซึ่งปกติในอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพที่ดีจะต้องมีค่ากระแสรั่วไหลที่ต่ำด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิตั้งแต่ 27°C ถึง 127°C เปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ

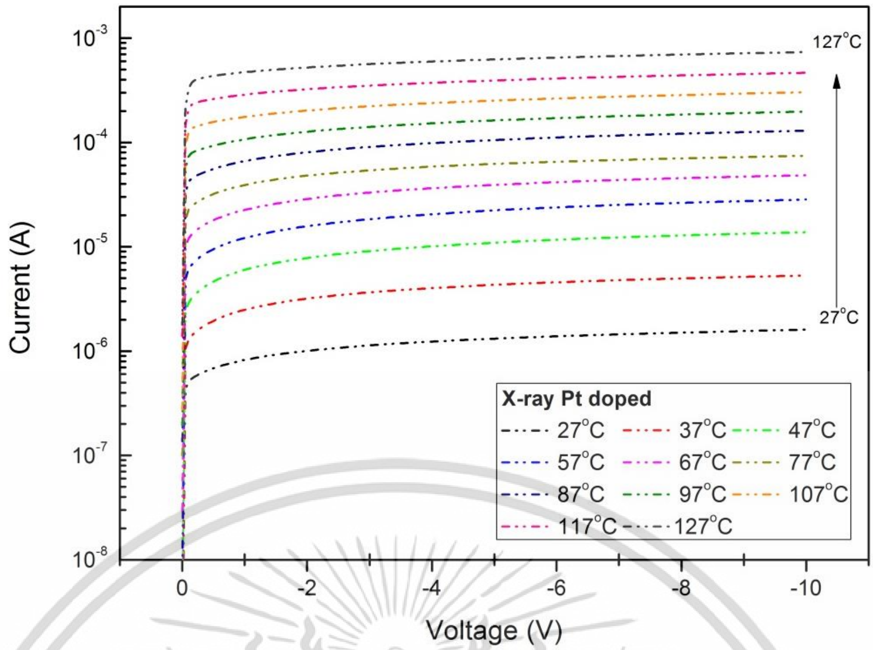



**รูปที่ 4.20** ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมภายใต้อุณหภูมิการวัด 27°C ถึง 127°C




**รูปที่ 4.21** ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนฉายรังสีเอกซ์ภายใต้อุณหภูมิการวัด 27°C ถึง 127°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.22** ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับแรงดันไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังฉายรังสีเอกซ์ภายใต้อุณหภูมิการวัด 27°C ถึง 127°C

จากรูปจะสังเกตเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดทั้งสามเงื่อนไขเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่กระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นจะมีปริมาณกระแสรั่วไหลที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม แสดงให้เห็นว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมเข้าไปจะมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดีกว่าเพราะขนาดของอะตอมแพลตทินัมที่มีขนาดใหญ่สามารถดูดซับพลังงานความร้อนได้ดีกว่า ส่วนช็อตต์กีย์ไดโอดที่แพร่อะตอมแพลตทินัมเมื่อทำการฉายรังสีเอกซ์แล้วพบว่ากระแสรั่วไหลที่เพิ่มตามอุณหภูมิจะมีปริมาณที่ใกล้เคียงกับก่อนฉายรังสีแสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีไม่มีผลต่อพฤติกรรมของกระแสรั่วไหลที่เพิ่มตามอุณหภูมิ จึงเป็นเพียงผลจากอะตอมสารเจือแพลตทินัมเท่านั้น

### 4.4.5 การศึกษาระดับพลังงานกระตุ้นของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม

ในการวิเคราะห์หรืออธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะและการนำกระแสไฟฟ้า (Transport phenomena) จะทำการวัดกระแสของช็อตต์กีย์ไดโอดที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นจะนำมาศึกษาลักษณะของระดับพลังงานกระตุ้น (Activation energy : $E_a$) ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ ในการวิเคราะห์หาระดับพลังงานกระตุ้นของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.11 กราฟที่ได้จะเป็นการพล็อตแบบ Arrhenius ระหว่างกระแสอิ่มตัวย้อนกลับกับผลของรอยสัมผัสอุณหภูมิตั้งแต่ 27°C ถึง 127°C แสดงดังรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = I_0 \exp(\frac{-E_a}{kT}) \tag{4.11}$$

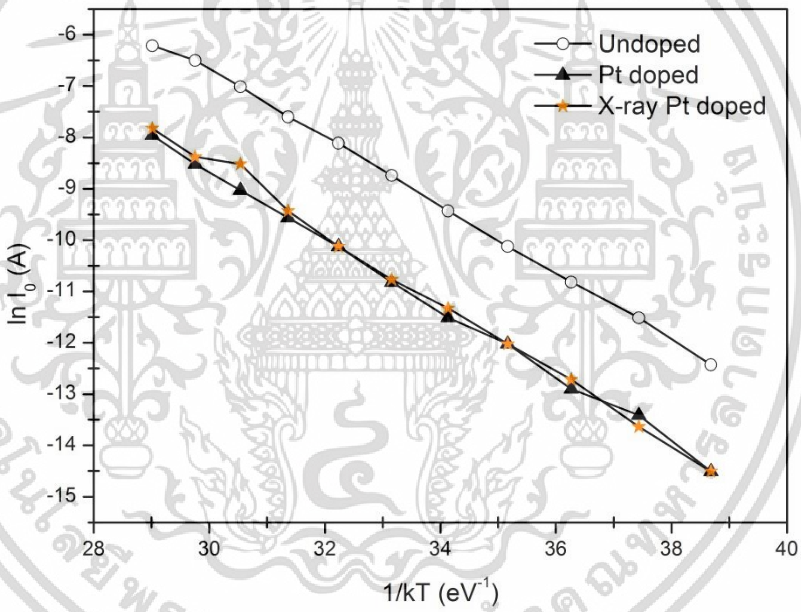
โดยที่ $I$ คือ กระแสรวมของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์

$I_0$ คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

$k$ คือ ค่าคงที่ของโบลต์มันน์

$T$ คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากรูปพบว่าระดับพลังงานที่หาได้จากความชันของกราฟของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับ 0.65, 0.66 และ 0.69 eV ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าหลังการฉายรังสีเอกซ์ระดับพลังงานกระตุ้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้นถือได้ว่าพลังงานจากการฉายรังสีไม่มีผลต่อระดับพลังงานกระตุ้นของผลึกซิลิคอน




**รูปที่ 4.23** ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิ่มตัวย้อนกลับกับอุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ภายใต้อุณหภูมิการวัดตั้งแต่ 27°C ถึง 127°C

**4.4.6 สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม**

ปริมาณกระแสรั่วไหลที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้น สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 27-127°C ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและถูกแพร่อะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

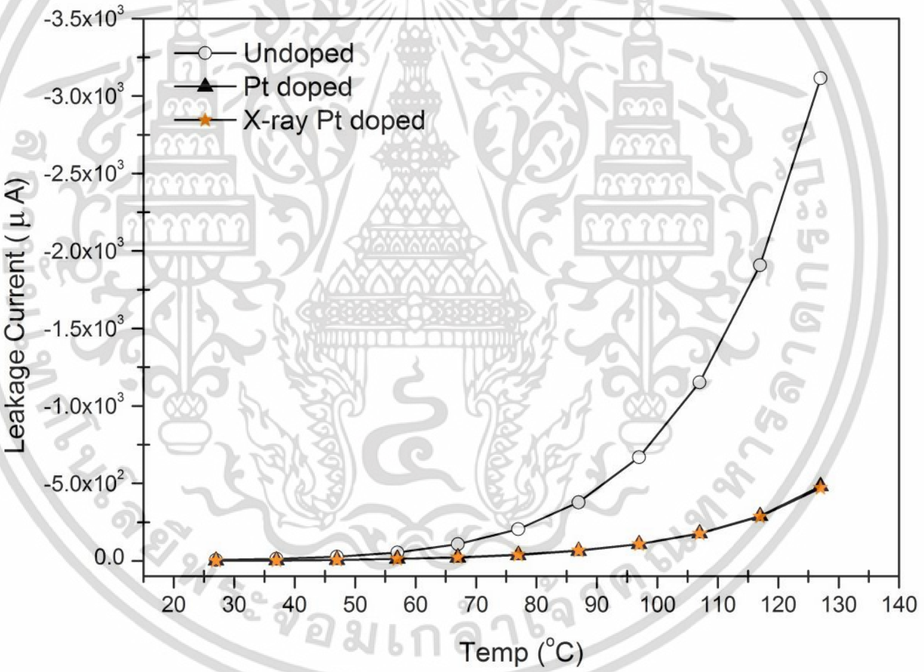
สารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที ได้จากสมการที่ 4.12

$$\textbf{สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ} = \frac{\Delta I_{leak}}{\Delta T} \qquad (4.12)$$

โดยที่ $\Delta I_{leak}$ คือ ผลต่างของกระแสรั่วไหลที่อุณหภูมิใดๆ (µA)

$\Delta T$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (°C)

จากสมการสามารถหาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิที่แรงดันไบอัส -1 V ในช่วงอุณหภูมิ 27-127°C ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที ได้เท่ากับ 31.15, 4.8 และ 4.7 µA/°C ตามลำดับ เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างอุณหภูมิกับกระแสรั่วไหลจะได้ดังรูปที่ 4.24




**รูปที่ 4.24** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระแสรั่วของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่แพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่แรงดันไบอัส -1 V ในช่วงอุณหภูมิ 27-127°C

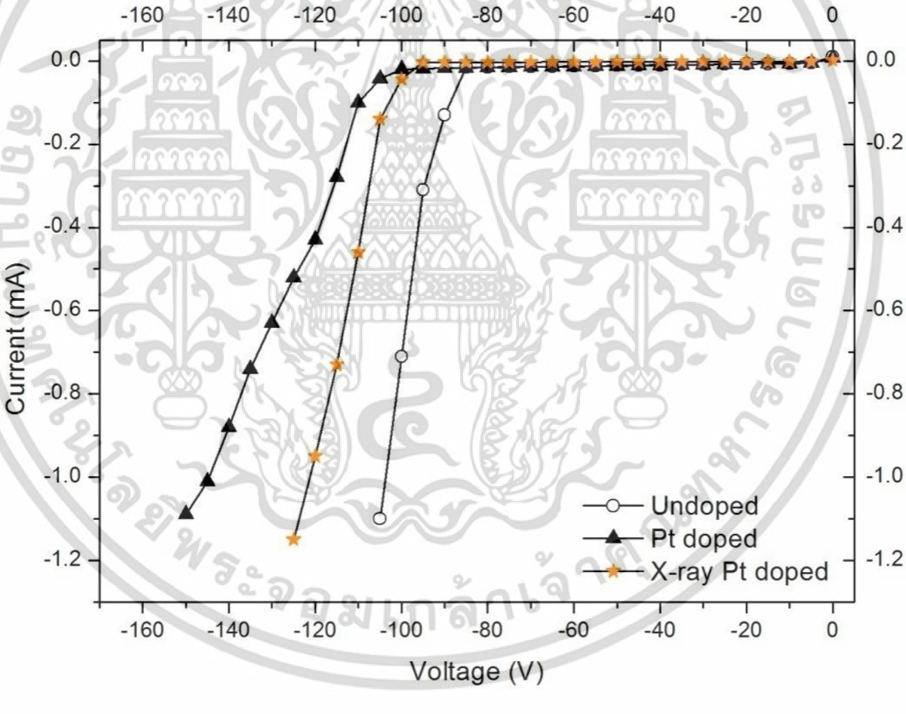
จากรูปจะเห็นว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมโดยมีอัตราการเพิ่มของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิลดลงประมาณ 6.5 เท่า แสดงให้เห็นว่าแพลตทินัมที่แพร่เข้าไปช่วยให้เสถียรภาพทางอุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดดียิ่งขึ้น เนื่องจากแพลตทินัมเป็นธาตุที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงกว่าซิลิคอน เมื่อแพร่เข้าสู่ซิลิคอนจึงทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เสถียรภาพทางอุณหภูมิของซิลิคอนดีขึ้นจึงเป็นผลดีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ ในส่วนของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังการฉายรังสีเอกซ์มีอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิใกล้เคียงกับก่อนฉายรังสีแสดงว่าการฉายรังสีเอกซ์ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางอุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม

**4.4.7 การศึกษาแรงดันพังทลายของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม**

แรงดันพังทลาย (Breakdown voltage) เป็นคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ต้องทำการศึกษา เนื่องจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิดมีขีดจำกัดในการทนแรงดันด้านไบอัสย้อนกลับที่แรงดันหนึ่งก่อนจะถึงจุดพังทลายที่มีกระแสไหลจำนวนมากและอาจทำให้เกิดความร้อนหรือเกิดการไหม้เสียหายได้ จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไบอัสกลับจะได้กราฟแรงดันพังทลายดังรูปที่ 4.25




**รูปที่ 4.25** แรงดันพังทลายของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่แพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที

การพังทลายของช็อตต์กีย์ไดโอดโดยทั่วไปจะเกิดในลักษณะการพังทลายแบบอะวาลันซ์ (Avalanche breakdown) ซึ่งเกิดจากพาหะในที่นี้คืออิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งให้เคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์และเกิดการชนอะตอมอยู่ตลอดเวลา เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจึงเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั้งมากพอที่จะชนอะตอมแล้วเกิดการไอออไนซ์เป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มเป็นทวีคูณทำให้กระแสไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมากมายในที่สุด โดยแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าๆ หนึ่งที่ทำให้เกิดการพังทลายนั้นเรียกว่า "แรงดันพังทลาย"

จากรูปที่ 4.25 พบว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมมีแรงดันพังทลายประมาณ -90 V ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนฉายรังสีเอกซ์มีแรงดันพังทลายเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ที่ประมาณ -100 V ซึ่งอาจเกิดจากแถบพลังงานผู้รับของแพลตทินัมในซิลิคอนที่ทำหน้าที่ดักจับอิเล็กตรอนทำให้จำนวนอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าลดลงพลังงานจลน์รวมที่เกิดจากการชนอะตอมจึงมีค่าลดลงเช่นเดียวกันการพังทลายจึงไม่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าเท่าเดิม ดังนั้นแรงดันที่ทำให้เกิดการพังทลายจึงเพิ่มขึ้นสนามไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้นเพื่อเป็นการเร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์รวมเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ทำให้เกิดการพังทลายได้นั่นเองส่วนช็อตต์กีย์ไดโอดหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที พบว่าแรงดันพังทลายมีค่าใกล้เคียงกับก่อนการฉายรังสี แต่ลักษณะของกราฟมีความชันมากกว่าเนื่องจากพลังงานจากการฉายรังสีเอกซ์ช่วยลดจุดบกพร่องภายในเนื้อของซิลิคอนทำให้ความต้านทานอนุกรมลดลงกระแสที่ได้จึงเพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงดันเท่าเดิม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากสมมติฐานและวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้คือการศึกษาผลของการฉายรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยมุ่งหวังว่าเทคนิควิธีการฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงานและเวลาที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดความต้านทานอนุกรมทำให้กระแสทางด้านไบอัสตรงเพิ่มขึ้น และสามารถลดกระแสรั่วไหลลงของไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมลงได้อีก ซึ่งผลการศึกษาออกมาเป็นที่น่าพอใจตามวัตถุประสงค์และสมมติฐานที่ตั้งไว้โดยรายละเอียดผลการศึกษามีลำดับขั้นตอนดังนี้

เริ่มจากทำการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) สภาพต้านทานแผ่น 5 Ω.cm หนา 625 µm มีขนาดของขั้วไฟฟ้าโครเมียมเท่ากับ 1 $mm^2$ จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่และไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลเบื้องต้นก่อนการฉายรังสีเอกซ์ จากผลการทดลองพบว่ารอยสัมผัสระหว่างโครเมียมและซิลิคอนชนิดเอ็นที่ถูกแพร่และไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีลักษณะเป็นแบบเรคติไฟร์ หรือเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตต์กีย์และช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นจะมีค่ากระแสที่แรงดันไบอัสตรงต่ำกว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมโดยที่แรงดันไบอัส 1 V ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีค่ากระแสอยู่ที่ 8.11 mA ส่วนช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นจะมีค่ากระแสอยู่ที่ 11.12 mA เมื่อมาดูทางด้านแรงดันไบอัสกลับพบว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมมีค่ากระแสรั่วลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยที่แรงดันไบอัส -1 V มีค่ากระแสรั่วไหลลดลงจาก 5.21 µA เป็น 1.41 µA สาเหตุนั้นเกิดจากอะตอมสารเจือแพลตทินัมที่แพร่เข้าไปจะเข้าไปจะสร้างระดับผู้รับในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำหน้าที่ดักจับอิเล็กตรอน ดังนั้นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากโลหะไปสารกึ่งตัวนำจึงมีค่าลดลงทำให้กระแสทั้งด้านไบอัสตรงและไบอัสกลับมีค่าลดลง

การศึกษาผลของการฉายรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมเริ่มจากการหาค่าพลังงานการฉายที่เหมาะสมซึ่งในการทดลองได้แบ่งค่าพลังงานการฉายรังสีเป็น 4 พลังงาน ได้แก่ 40, 55, 70 และ 85 keV ใช้เวลาการฉายที่ 55 วินาที เท่ากัน พบว่าที่แรงดันไบอัส 1 V พลังงานการฉายรังสีที่ 40 และ 55 keV มีค่ากระแสอยู่ที่ 6.93 และ 7.85 mA ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากระแสลดลงเมื่อเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอดก่อนการฉายรังสีแต่ที่พลังงาน 70 และ 85 keV มีค่ากระแส 8.19 และ 8.45 mA ตามลำดับซึ่งมากกว่าก่อนฉายรังสีเล็กน้อย ส่วนทางด้านแรงดันไบอัสย้อนกลับพบว่าที่แรงดันไบอัส -1 V กระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ฉายรังสีด้วยพลังงาน 40, 55, 70 และ 85 keV คือ 1.78, 1.74, 2.17 และ 1.56 µA ตามลำดับ ทุกค่าพลังงานมีกระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนฉายรังสีแต่ที่พลังงานการฉายรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

85 keV เป็นการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าพลังงานการฉายรังสีที่พลังงานอื่น ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกพลังงานการฉายรังสีที่ 85 keV ไปใช้ในการศึกษาหาเวลาการฉายรังสีต่อไปซึ่งในการทดลองหาเวลาการฉายรังสีนั้น ได้แบ่งเวลาการฉายออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 5, 55 และ 105 วินาที ตามลำดับ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังการฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 85 keV ที่แรงดันไบอัส 1 V เวลาการฉายรังสี 105 วินาที มีค่ากระแสเท่ากับ 6.05 mA ซึ่งลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสี ส่วนที่เวลาการฉายรังสีที่ 5, 55 วินาที มีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนฉาย โดยมีค่ากระแสอยู่ที่ 10.27 mA และ 8.45 mA ตามลำดับ ส่วนทางด้านแรงดันไบอัสย้อนกลับพบว่าที่แรงดันไบอัส -1 V มีค่ากระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดที่เวลาการฉายรังสี 5, 55 และ 105 วินาที อยู่ที่ 0.82, 1.56 และ 2.27 μA จะเห็นว่าในเงื่อนไขการฉายรังสีที่พลังงาน 85 keV เวลา 5 วินาที ซึ่งมีความเข้มรังสี $6.26 \times 10^6$ R มีกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงเพิ่มขึ้น และกระแสรั่วไหลลดลงเมื่อเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนการฉายรังสี ดังนั้นจึงเลือกค่าพลังงานและเวลาการฉายรังสีนี้ไปทำการศึกษาหาตัวแปรที่ได้รับอิทธิพลจากการฉายรังสีเอกซ์ดังต่อไปนี้

ค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ซึ่งได้ทำการหาค่าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัส จากกราฟสามารถหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV ด้วยเวลา 5 วินาที ได้ 4, 0.5 และ 0.5 μA ตามลำดับ จากนั้นจะทำการคำนวณหาค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ได้ 0.62, 0.67 และ 0.67 eV ตามลำดับ นอกจากวิธีการวิเคราะห์หาค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ที่ได้นำเสนอไปข้างต้นยังมีอีกวิธีหนึ่งที่มีความแม่นยำในการหาค่าตัวแปรมากกว่าคือการใช้เทคนิคของ Cheung ซึ่งวิธีนี้นอกจากจะหาค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ได้แล้วยังสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมที่ต้องการศึกษาผลกระทบจากการฉายรังสีเอกซ์และค่าแฟคเตอร์อุดมคติได้ในคราวเดียวกัน จากวิธีนี้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV ด้วยเวลา 5 วินาที ได้ดังนี้ค่า $n$ มีค่าเท่ากันทั้งสามเงื่อนไข คือ 1.01 ค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์มีค่าใกล้เคียงกับการหาในวิธีแรก คือ 0.62, 0.67 และ 0.68 eV ตามลำดับและค่าความต้านทานอนุกรม 64, 100 และ 65.5 $\Omega$ ตามลำดับ ค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะสามารถทำได้ยากมากขึ้นทำให้กระแสทางด้านไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับน้อยลง ส่วนค่าความต้านทานอนุกรมเมื่อแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมลงไปจะทำให้ค่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลทำให้ค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงมีค่าน้อยลง แต่เมื่อนำช็อตต์กีย์ไดโอดไปฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที ความต้านทานอนุกรมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนฉายรังสี ซึ่งใกล้เคียงกับไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมแสดงให้เห็นว่าพลังงานจากรังสีเอกซ์สามารถเข้าไปช่วยลดจุดบกพร่องที่เกิดจากการแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพลตทินัมหรือจุดบกพร่องเดิมที่มีอยู่แล้วภายในเนื้อซิลิคอนให้ลดลง โครงสร้างผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้น จึงทำให้ค่ากระแสทางด้านไบอัสตรงกลับเพิ่มขึ้นและกระแสรั่วไหลลดลง

การศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันเป็นการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ คือความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ($W$), ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ($N_D$) และยังสามารถหาค่าแรงดันภายใน ($V_{bi}$) ได้อีกด้วย โดยค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV 5 วินาที มีค่าใกล้เคียงกัน ที่แรงดัน 0 V มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 110, 112 และ 112 pF ตามลำดับ ส่วนค่าแรงดันภายในของทั้งสามเงื่อนไขมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.4 V ค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะทั้งสามเงื่อนไขไม่ต่างกันมากนักโดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันไบอัส -10 V ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมมีค่าประมาณ 4.57 μm ส่วนช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมมีค่าประมาณ 4.33 μm และสุดท้ายช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังฉายรังสีเอกซ์มีค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะประมาณ 4.5 μm จากผลของลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันแสดงว่ารังสีเอกซ์ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความจุไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดแต่ส่งผลต่อบริเวณปลอดพาหะเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นพาหะ

ความหนาแน่นพาหะสามารถคำนวณจากกราฟลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ซึ่งของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมจะมีความหนาแน่นพาหะเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ $6.5\times10^{-14}$ $cm^{-3}$ ความหนาแน่นพาหะของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์จะอยู่ที่ $7.2\times10^{-14}$ และ $6.7\times10^{-14}$ $cm^{-3}$ ตามลำดับ จะเห็นว่าหลังแพร่แพลตทินัมพาหะมีแน้วโน้มเพิ่มขึ้นแต่เมื่อทำการฉายรังสีแล้วพาหะจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพาหะกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ พบว่าช็อตต์กีย์ไดโอดเมื่อแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมเข้าไปทำให้พาหะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเมื่อนำไดโอดไปทำการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เวลา 5 วินาที พบว่าความหนาแน่นพาหะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าพลังงานจากรังสีเอกซ์สามารถลดจำนวนพาหะที่เกิดจากการแพร่แพลตทินัมหรือพาหะในโครงสร้างผลึกลงได้บางส่วน โดยรังสีเอกซ์ที่ฉายนั้นจะเข้าไปสั่นอะตอมที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างผลึกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะช่วยทำให้โครสร้างอะตอมในผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้น ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าจึงดีขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสี

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอด ในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิตั้งแต่ 27°C ถึง 127°C เปรียบเทียบกันระหว่างช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดทั้งสามเงื่อนไขเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่กระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นจะมีปริมาณกระแสรั่วไหลที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมส่วนช็อตต์กีย์ไดโอดหลังฉาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีพบว่ากระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและมีปริมาณที่ใกล้เคียงกับก่อนฉายรังสีและเมื่อทำการหาสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิพบว่าที่แรงดันไบอัส -1 V ในช่วงอุณหภูมิ 27-127°C ของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที ได้เท่ากับ 31.15, 4.8 และ 4.7 μA/°C ตามลำดับ ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมซึ่งลดลงประมาณ 6.5 เท่า แสดงให้เห็นว่าแพลตทินัมที่แพร่เข้าไปช่วยให้เสถียรภาพทางอุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดดียิ่งขึ้น ส่วนของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังการฉายรังสีเอกซ์มีอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิใกล้เคียงกับก่อนฉายรังสี แสดงว่าการฉายรังสีเอกซ์ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางอุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมแต่เป็นเพียงผลจากอะตอมสารเจือแพลตทินัมที่เติมเข้าไปเท่านั้น

ระดับพลังงานกระตุ้นของช็อตต์กีย์ไดโอดหาได้จากการวัดกระแสของช็อตต์กีย์ไดโอดที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์นั่นมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 0.65, 0.66 และ 0.69 eV ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าหลังการฉายรังสีเอกซ์ระดับพลังงานกระตุ้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ถือได้ว่าพลังงานจากการฉายรังสีไม่มีผลต่อระดับพลังงานกระตุ้นของผลึกซิลิคอน

การพังทลายของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมมีแรงดันพังทลายประมาณ -90 V ช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนฉายรังสีเอกซ์มีแรงดันพังทลายเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ที่ประมาณ -100 V ส่วนช็อตต์กีย์ไดโอดหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที พบว่าแรงดันพังทลายมีค่าใกล้เคียงกับก่อนการฉายรังสีแต่ลักษณะของกราฟมีความชันมากกว่าเนื่องจากพลังงานจากการฉายรังสีเอกซ์ช่วยลดจุดบกพร่องภายในเนื้อของซิลิคอนทำให้ความต้านทานอนุกรมลดลงกระแสที่ได้จึงเพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงดันเท่าเดิม

จากผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่ารังสีเอกซ์สามารถช่วยเพิ่มกระแสทางด้านไบอัสตรงและยังสามารถลดกระแสรั่วของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยทำให้ความต้านทานอนุกรมลดลง เนื่องจากการใช้พลังงานและเวลาการฉายรังสีที่เหมาะสมจะช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในตัวช็อตต์กีย์ไดโอด ลดจุบกพร่อง (Defect) ที่เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือ หรือจุดบกพร่องในเนื้อซิลิคอน ด้วยเหตุนี้จึงถือได้ว่าการฉายรังสีเอกซ์เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมและอาจจะสามารถปรับปรุงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆทำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


[1] Spaziani S.M., Vaccaro K., Wohlmuth W.A., Martin E.A., Lorenzo J.P. “Inverted, substrate-removed vertical Schottky diode optical detectors”, **Indium Phosphide and Related Materials**, 1997, pp. 284-287

[2] Hudeish A.Y., Abdul Aziz A., Hassan Z. “High-temperature PdSchottky diode gas sensor on p-type GaN”, **Semiconductor Electronics**, ICSE 2004.

[3] Miller E.J., Schaadt D.M., Yu E.T., Waltereit P., Poblenz C., Speck J.S. “Reverse-bias leakage current reduction in GaNSchottky diodes by electrochemical surface treatment”, **Applied Physics Letters**, Vol.82, No.8, 2003, pp.1293-1295

[4] Lu Wei, (Dennis) Wang, Lingquan, Siyuan Gu, Aplin D.P.R., Estrada D.M., Yu P.K.L., Asbeck P.M. “Analysis of Reverse Leakage Current and Breakdown Voltage in GaN and InGaN/GaN Schottky Barriers”, **Electron Devices**, Vol. 58, No.7, 2011, pp. 1986-1994

[5] S. D. Brotherton, P. Bradley, and J. Bicknell. “Electrical properties of platinum in silicon”, **Applied Physics**, Vol. 50, No. 5, 1979, pp. 3396-3403

[6] M. Jacob, P. Pichler, H. Ryssel, and R. Falster. “Determination of vacancy concentrations in the bulk of silicon wafers by platinum diffusion experiments”, **Applied Physics**, Vol. 82, No. 1, 1997, pp. 182-191

[7] Valdinoci M., Colalongo L., Coffa S., Rudan M. “A Dynamic Model of Gold/ Platinum Doped Devices”, **Solid State Device Research Conference**, ESSDERC '95. 1995, pp. 71-74

[8] ศนิ กลิ่นสนิท. “**การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนช็อตกีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม**”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.

[9] T. Kuchimaru, F. Sato, Y. Higashino, K. Shimizu, Y. Kato, T. Iida, “Microdosimetric Characteristics of Micro X-Ray Beam for Single Cell Irradiation” **IEEE Trans. Nucl. Sci.,** Vol. 53, No. 3, 2006, pp. 1363-1366.

[10] Oliver Hupe, Ulrike Ankerhold, “X-ray security scanners for personnel and vehicle control: Dose quantities and dose values” **Eur. J. Radiol.** Vol. 63, 2007, pp. 237-241.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Reyer Zwiggelaar, Christine R. Bull, Michael J. Mooney, "X-Ray Simulations for Imaging Application in the Agriculture and Food Industries" **J. agric. Engng Res.** Vol.63, 1990, pp. 161-170.

[12] Francois Renard, Dominique Bernard, Jacques Desrues, Audrey Ougier-Simonin "3D imaging of fracture propagation using synchrotron X-ray microtomography," **Earth Planet. Sci. Lett.** Vol. 286, 2009, pp. 285-291.

[13] M. A. Krivov and S. V. Malyanov. "Effect of X-ray and Electron radiation on P-N Junction in Gallium Arsenide", **Izvestiya VUZ.Fizika**, No. 6, 1966, pp. 135-136

[14] M. A. Krivov, S. V. Malyanov and L. S. Smirnov. "Effect of X-ray Radiation on The Reverse Current of Silicon P-N Junctions", **Izvestiya VUZ. Fizika**, No. 8, 1969, pp. 70-74

[15] Surada Ueamanapong, Itsara Srithanachai, Ai-lada Suwanchatree, Surasak Niemcharoen, Nipapan Klunngien, Amporn Poyai, "Improving the Forward Current of P-N Diode Using Soft X-ray Annealing Method", **Communications and Information Technologies (ISCIT)**, 2013, pp. 330-333

[16] Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai, Surasak Niemcharoen, "New Method for Improve the Electrical Characteristics of P-N Diode", **Applied Materials and Electronics Engineering (AMEE 2013)**, 2013

[17] Surasak Niemcharoen, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai, "Improve Forward Current Characteristics of Diode by X-ray Irradiation" **International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)**, 2011

[18] Poopol Rujanapich, Amporn Poyai, ItsaraSri thanachai, Putapon Pengpad, Charndet Hruanan, Suwat Sophitpan, Wisut Titiroongruang, "Generation lifetime analysis of p-n junction X-ray detector", **Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON),** 2010, pp. 780-783

[19] Yuwadee Sundarasaradula, Itsara Srithanachai, Surasak Niemcharoen, Wisut Titiroongruang, Amporn Poyai, Nipapan Klunngien, "Study of X-ray annealed lowering series resistance of pn junction power diode", **EECON-34** ,2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[20] Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai, Surasak Niemcharoen, Preecha P. Yupapin, “An experimental investigation of P-N diode electrical characteristics by soft X-ray annealing method”, **Optics & Laser Technology**, Vol. 44, No. 3, April 2012, pp. 635-639

[21] Poopol Rujanapich, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai, Surasak Niemcharoen, Wisut Titiroongruang, “An improvement of forward current of P-N diode using soft X-ray method”, **International Conference on Advance in Materials Science and Engineering (AMSE 2012)**, 2012

[22] MatthewD. Miller. “Differences Between Platinum and Gold-Doped Silicon Power Devices”, **IEEE Transactions on Electron Devices**, Vol.23, 1976, pp.1279-1283

[23] สุรดา เอื้อมานพงษ์, บุศรา นรารักษ์, อิสระ ศรีธนชัย, ศนิ กลิ่นสนิท, ศุภกร จันทร์ประภา, นิภาพรรณ กลั่นเงิน, อัมพร โพธิ์ใย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาระดับพลังงานกระตุ้นของซิลิคอนไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกแพร่ด้วยแพลตทินัม” **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35**, Volume II, 12-14 ธ.ค. 2555, หน้า 1029-1032

[24] Jirawat Prabket, Montree Saenlamool, Wittawat Yamwong, Udom Techakijkajorn, Amporn Poyai, Wisut Titiroongruang, “Temperature Dependence of Current-Voltage Characteristics of Al/Pt-Doped Si Schottky Diodes,” **ICET-2011**, May 2-3, 2011.

[25] Arthur H. Compton. “**X-ray and electron: An outline of recent X-ray theory**”, D. Van NostrandCopany, 1926

[26] บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, “**Roentgen กับรังสีเอกซ์ยุคแรก**”, เข้าถึงได้จาก : www.nst.or.th/article/article491/article4901.html

[27] ดร. จารุณีย์ ทองผมสุก, ดร. สมพร จองคำ, สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, “**อันตรายจากรังสี**”, เข้าถึงได้จาก : www.nst.or.th/jnal/nst-rad-danger.pdf. 2544.

[28] H. Norde, “A Modified Forward I-V Plot of Schottky Diode with High Series Resistance”, **Journal of Applied Physics**, Vol. 50, No. 7, 1979, pp. 5052

[29] K. Sato and Y. Yasumura, “Study of forward I-V Plot for Schottky Diode with High Series Resistance”, **Journal of Applied Physics**, Vol. 58, No. 9, 1985, pp. 3655-3657

[30] S. K. Cheung and N. W. Cheung, “Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics”, **Applied Physicsletter**, Vol. 49, No. 2, 1986, pp. 85-87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[31] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 4, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

[32] Lukáš Válekand Jan Šik, "**Defect Engineering During Czochralski Crystal Growth and Silicon Wafer Manufacturing**", Semiconductor Czech Republic, Institute of Physical Engineering, Brno University of Technology, Czech RepublicJanuary 13, 2012

[33] "**Platinum (Pt)**." Encyclopædia Britannica Online. Encyclopædia Britannica Inc., 2012, Web. 24 April 2012

[34] W.Lerch, N.A.Stolwijk, H.Mehrer, C.Poisson. "Diffusion of platinum into dislocated and non-dislocated silicon", **Semiconductor Science and Technology**, Vol. 10, No. 9, 1995, pp. 1257-1263

[35] ชาญณรงค์ สมทอง, ประภากร ขันทองดี. "**ผลของอะตอมทองคำในรอยต่อ พี-เอ็น**" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.

[36] A. G. MILNES. **Deep Impurities in Semiconductors**. A Wiley-Interscience publication Company, Inc. 1973.

[37] Marina Valdinoci, Luigi Colalongo, etc. "Analysis of Conductivity Degradation in Gold platinum-Doped Silicon", **Electron Devices, IEEE Transactions on**, Vol. 43, No. 12, 1996, pp. 2269-2275

[38] Hazdra. P, and Komarnitskyy, V. "Lifetime contro; in Silicon power p-i-n diode by ion irradiation: Suppression of undesired leakage", **Microelectronics Journal**, Vol. 37 No. 3, 2006, pp. 197-203

[39] D.K.Schroder. "Carrier lifetimes in silicon", **IEEE Trans. Electron Devices**, ED-44, 1997, pp. 160

[40] N2 Biomedical, "**Ion Implantation**", [online]. Avaliable : http://www.n2bio.com/surface-modification-technology/ion-implantation.php. 2014.

[41] Semiconductor Fabrication, "**Photolithography**", [online]. Available : http://britneyspears.ac/physics/fabrication/photolithography.htm

[42] สุรดา เอื้อมานะพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ "ผลกระทบจากการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงต่อลักษณะสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น", **วิศวสารลาดกระบัง**, ฉบับที่ 1, 2554, หน้า 31-36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[43] Jirawat Prabket, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai, Wisut Titiroongruang, Surasak Niemcharoen and Preecha P. Yupapin, "An improvement of electrical characteristics of P-N diode by X-ray Irradiation method", **Scientific Research and Essays,** Vol 7, 2012, pp. 1230-1236

[44] ศุภกร จันทร์ประภา, สุรดา เอื้อมานะพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย, ไอลดา สุวรรณชาตรี, บุศรา นรารักษ์, ธนวัฒน์  ทองหนัก, วิทวัส แย้มวงษ์ และ สุรศักดิ์เนียมเจริญ. "การศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด", **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 36**, Vol 2, 2556, pp. 357-360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก.

# ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

**ตารางที่ ก.1** ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

| ชื่อตัวแปร | สัญลักษณ์ | ค่า/หน่วย |
|---|---|---|
| ประจุอิเล็กตรอน (Electron charge) | $q$ | $1.602\times10^{-19}$ C |
| มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (Rest mass of an electron) | $m_e$ | $9.109\times10^{-31}$ kg |
| ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์(Boltzmann,s constant) | $k$ | $1.381\times10^{-23}$ j/K<br>$8.617\times10^{-5}$ eV/K |
| ค่าคงที่ริทชาร์ดสัน (Richardson's constant) | $R$ | 110 A.cm$^{-2}$.K$^{-2}$ (n-Si) |
| ค่าเปอร์มิตติวิตี้ในสุญญากาศ<br>(Permittivity of free space) | $\varepsilon_0$ | $8.85\times10^{-14}$ F/cm |
| ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของซิลิคอน<br>(Dielectric constant of Silicon) | $\varepsilon_S$ | 11.8<br>$1.04\times10^{-12}$ F/cm |
| ความหนาแน่นอินทรินซิคของซิลิคอนที่ 300 K | $n_i$ | $1.5\times10^{10}$ cm$^{-3}$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

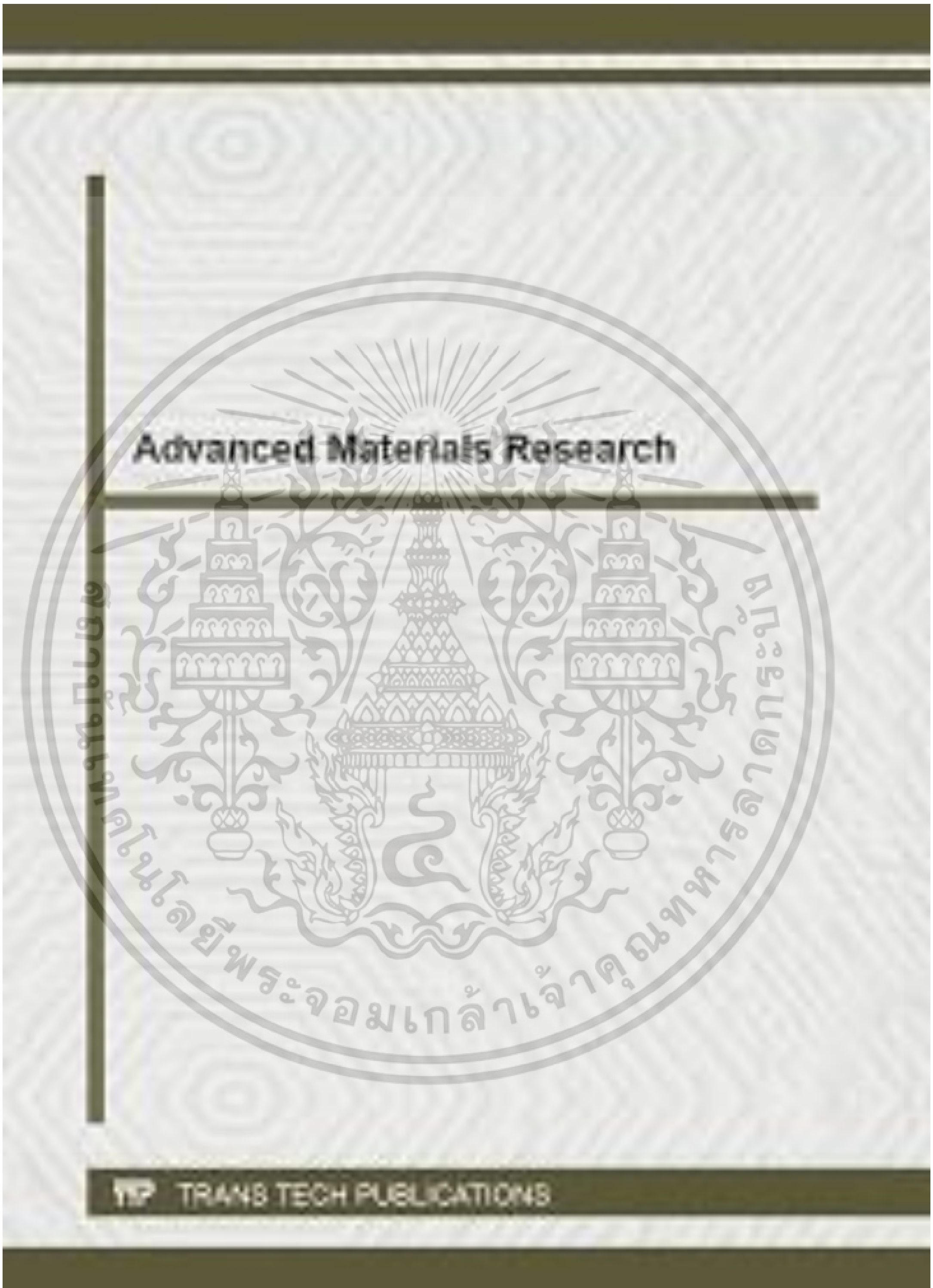
# ภาคผนวก ข.

# ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

[1] **Supakorn Janprapha**, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Sunya Khunkhao, Thanawat Thongnak, Sani Klinsanit, Surasak Niemcharoen. "**The Effect of X-ray Irradiation on The Electrical Properties of Pt-Doped P-N Diode**", Advance Material Research, Vol. 717, 2013, pp. 121-124

[2] **ศุภกร จันทร์ประภา**, สุรดา เอื้อมานะพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย, ไอลดา สุวรรณชาตรี, บุศรา นรารักษ์, ธนวัฒน์ ทองหนัก, วิทวัส แย้มวงษ์ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ"**การศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด**" การประชุมวิชาการทาวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36, Volume II, 11-13 ธ.ค. 2556, หน้า357-360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Advanced Materials Research Vol. 717 (2013) pp 121-124*
*Online available since 2013/Jul/15 at www.scientific.net*
*© (2013) Trans Tech Publications, Switzerland*
*doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.717.121*

# The Effect of X-ray Irradiation on The Electrical Properties of Pt-Doped P-N Diode

Supakorn Janprapha[1, a], Itsara Srithanachai[1, b], Surada Ueamanapong[1, c], Sunya Khunkhao[2], Thanawat Thongnak[1], Sani Klinsanit[1], Surasak Niemcharoen[1]

[1] Department of Electronics, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

[2]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum University, 61 Phahonyothin Road, Saenanikhom, Jatujak, Bangkok, 10900 Thailand

[a]s.janprapha@gmail.com, [b]srithanachai@gmail.com, [c]usurada@gmail.com

**Keywords:** Soft X-ray annealing method, P-N diode, forward current, Pt-doped P-N diode.

**Abstract.** This paper presents the effect of X-ray irradiation on the electrical properties of Pt-doped P-N diode with X-ray energy 70 keV for 205 seconds. The results show that the radiation affected both reverse and forward current characteristics of P-N diode. The forward current is increased about 3 orders after radiation, while the leakage current is increased slightly after irradiation. Moreover, build-in voltage value is also changed after irradiation. The cause of parameters changing can be analyzed from carrier lifetime and series resistance. It can be seen clearly that X-ray irradiation technique are significant and can be used to improving electronic devices.

## Introduction

Presently, the radiation began to role in a many works for example proton radiation[1], electron radiation[2], neutron radiation[3] and X-ray radiation[4]. Especially X-ray irradiation are widely used in many applications, such as medical, security, aerospace, agriculture communication and including can improve certain electrical properties of P-N junction diodes when use suitable time and energy therefore it is of interest to be studied in this paper, however in semiconductor research which used X-ray irradiation are not more interested.

The P–N junction diodes are most important devices in the solid-state electronics present electronic circuit is required to develop properties for many more applications such as rectifiers, waveform shapers, variable capacitors, detector, etc. Diodes with excellent features will have low leakage current and high forward current[5], however P-N diodes can produce high leakage and low forward current due to defects during fabrication process such as high ion implantation. In additional, ion implantation is the cause to induce defect in silicon bulk. Commonly, the leakage current of a P–N junction diode is one of the main parameters that affect the device performance where the leakage current is caused by defects which exist in the semiconductor bulk so this paper studying a new technique for improving forward current characteristics of P-N diode with X-ray annealing process was used for improving electrical characteristics of diodes[6].

## Experimental

The processes of P-N diode were show in the picture. The wafer was cleaned with an ultra-sonic wash to remove organic contaminants. The diode process module consists of (i) the deposition of the oxide covered substrate and the dry-etching oxide of the active area, (ii) the implantation of phosphorus at an energy of 120 kV and dosage of $1x10^{16}$ $cm^{-2}$ for ohmic contact on the backside wafer, (iii) the implantation of boron at the same energy (iv) create platinum layer on the backside and diffusion at 850°C for 6 hours (v) create 1 μm thickness of Aluminum layer at both side and anneal at 400°C for 30 min. Finally, the fully assembled chip was installed onto a prototype circuit board (PCB) before the finishing. After fabrication process the diodes were irradiated by X-ray for energy 70 keV with exposure time of 205 second. The current-voltage (I-V) characteristics of the P-N diode were measured at room temperature.

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of TTP, www.ttp.net. (ID: 161.246.242.3-01/10/13,11:55:28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

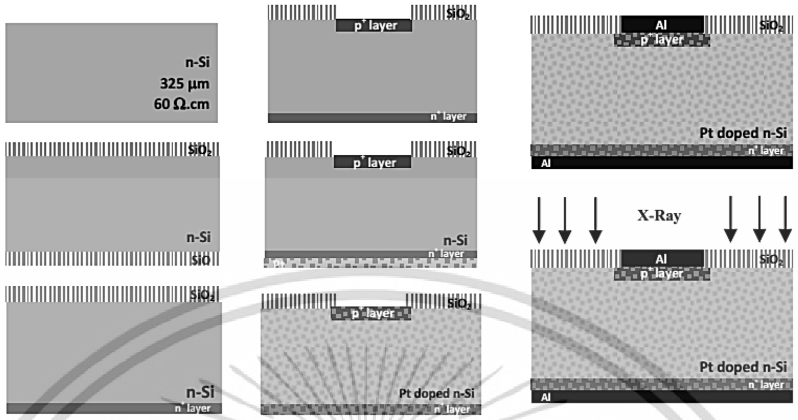



Figure 1. Structure of P-N junction diode.

**Results and discussion**

The experimental semi-log forward and reverse-bias characteristics before and after X-ray of the P-N diode shown in Fig 2. The diode parameters are determined from the I-V characteristics, which is usually described by the thermionic emission theory.

$$I = I_0.\exp(qV/nkT) \quad (1)$$

Here I is the current, q is the electron charge, V the applied voltage, T the absolute temperature, k the Boltzmann constant, n the ideality factor of P-N diode, and $I_0$ is the saturation current. From values of V greater than nkT/q.

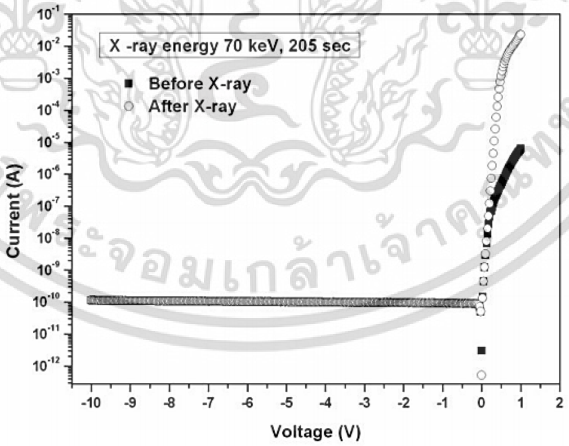



Figure 2. The forward and reverse bias characteristics of P-N diode.

From the picture, forward current after irradiation are increased. The leakage current compare between before and after X-ray exposure are hardly changes. Therefore, X-ray irradiation is annealing technique for improve the diode performance in part of forward current.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

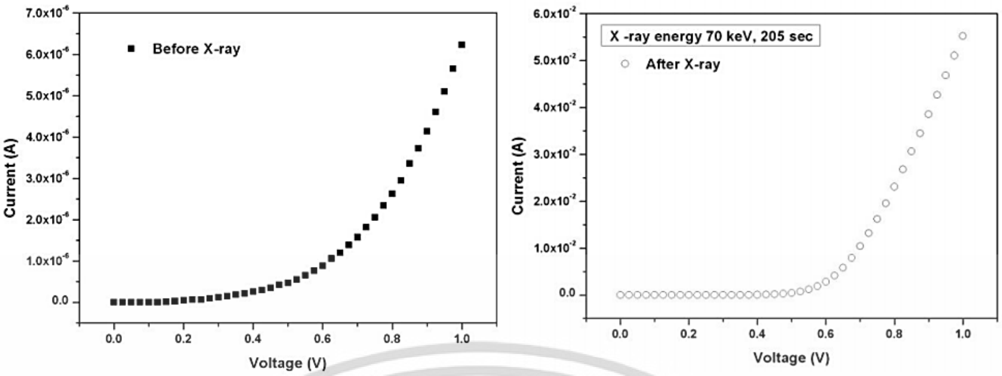



Figure 3. The forward current before and after irradiation at 70 keV,205 seconds.

The change of build-in voltage before and after irradiation are shown in Fig 3. After irradiation build-in voltage is decreased when compare with before irradiation, the energy of irradiation may cause changing of the defect between Silicon and Aluminum.

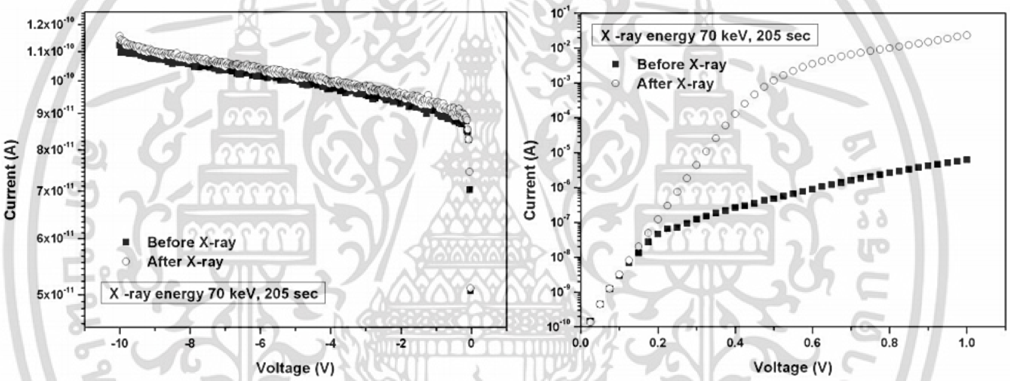



Figure 4. Semi-log forward and reverse current of the diode irradiation by X-ray.

Figure 4 shows the semi-log scale of forward and reverse current characteristics of P-N diode before and after irradiation. The reverse current slightly increases after irradiation. The forward current increases about 3 orders after irradiation. The changing of forward current is due to several reasons, and one of many parameter is series resistance. In this case, the series resistance of diode is decreased and X-ray could remove trapping centre in silicon bulk and surface.

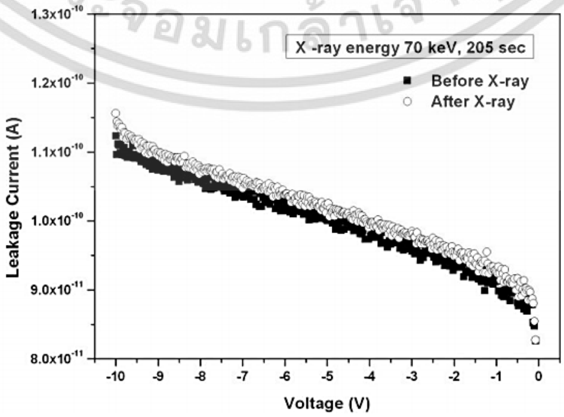



Figure 5. Leakage current of diode before and after irradiation by X-ray.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From the Figure 5. The leakage current after exposure is slightly increased compare with before exposure. It obviously that the electrical conductivity is degenerated that could be caused by X-ray.

## Conclusions

The effect of X-ray irradiation method was used to investigate the semiconductor fabricated samples and discussed. Results have shown that after irradiation the forward current increased about 3 orders of magnitude and build in voltage is decrease which is cause may energy of irradiation change the defect, remove trapping centre in silicon bulk and surface while the leakage current is slightly increased which may be causes X-ray degradation electrical conductivity. This result is new technique for improving electrical characteristics of diodes and important to the improvement of semiconductor.

## Acknowledgment

The authors would like to acknowledge Thai Microelectronics Center (TMEC) for fabrication and testing facilities, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMTNB) for providing the X-ray exposure equipment for this experiment and Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST).

## References

[1] Richard D. Harris, Member, IEEE, and Albert J. Frasca: IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 53, NO. 4, AUGUST 2006.

[2] A. Y. C. Yu and E. H. Snowt: IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 16, NO. 6, DECEMBER 1969.

[3] I. Akkurt, H. Akyildirim, A.F. Özdemir, D.A. Aldemir: Neutron irradiation effects on *I–V* characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes (Radiation Measurements)

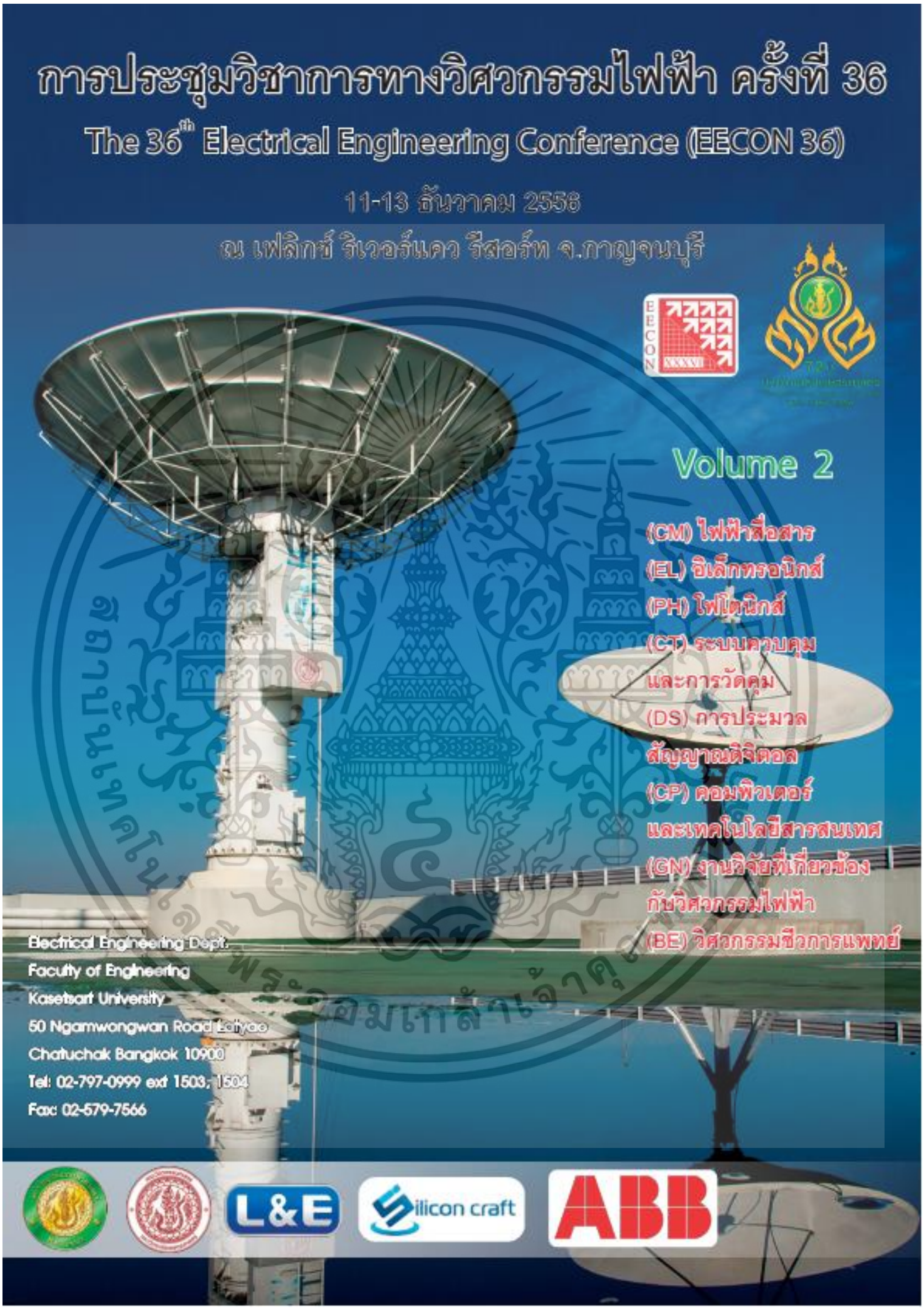
[4] Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai and Surasak Niemcharoen : New Method for Improving the Electrical Characteristics of P-N Junction Diode (Trans Tech Publications, Switzerland 2012.)

[5] Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai,Wisut Titiroongruang, Surasak Niemcharoen and Preecha P. Yupapin: Optics & Laser Technology Vol.44 (2012) p.635-639

[6] Jirawat Prabket, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai,Wisut Titiroongruang, Surasak Niemcharoen and Preecha P. Yupapin: Scientific Research and Essays Vol. 7(11), pp. 1230-1236

จอมเกล้าเจ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PE011

# การศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด

## Study Effect of X-ray radiation on Electrical Characteristics of Zener diode

ศุภกร จันทร์ประภา[1] สุรดา เอื้อมานะพงษ์[1] อิสระ ศรีธนชัย[1] ไอลดา สุวรรณชาตรี[1] บุศรา นรารักษ์[1] ธนวัฒน์ ทองหนัก[1]
วิทวัส แย้มวงษ์[2] และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ[1]

[1]สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ. ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์: 0-27390643 E-mail: s.janprapha@gmail.com
[2]ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ถ.สุวินทวงศ์ ต.วังตะเคียน อ.เมือง จ. ฉะเชิงเทรา 24000

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด [1, 3] โดยเริ่มจากการสร้างซีเนอร์ไดโอด เสร็จแล้วนำไปฉายรังสีเอกซ์ [6, 7] ที่พลังงาน 70 keV เป็นเวลา 15, 30, 55 และ60 วินาที จากนั้นจะทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไดโอดก่อนและหลังฉายรังสี ได้แก่ ลักษณะสมบัติของกระแส – แรงดัน เพื่อดูค่า แรงดันขีดเริ่มหรือแรงดันภายใน ($V_{bi}$), แรงดันตกคร่อมซีเนอร์ด้านไบอัสตรง ($V_F$), ความต้านทานอนุกรม ($R_s$), กระแสรั่วไหล ( $I_{leak}$), แรงดันซีเนอร์ ($V_Z$) และซีเนอร์อิมพีแดนซ์ ($Z_{ZT}$) นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ถึงลักษณะสมบัติของความจุไฟฟ้า – แรงดัน (C-V) อีกด้วย จากผลการทดสอบพบว่า หลังการฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV ที่เวลา 15 วินาที พบว่าค่ากระแสที่ได้ลดต่ำลงกว่าก่อนการฉาย เมื่อเพิ่มเวลาการฉายเป็น 30 วินาที ค่ากระแสมีลักษณะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อฉายรังสีที่เวลา 55 วินาที พบว่าซีเนอร์ไดโอดมีค่ากระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อฉายรังสีที่เวลา 60 วินาที ค่ากระแสและแรงดันกลับลดลงเท่ากับก่อนฉายรังสี

คำสำคัญ: ซีเนอร์ไดโอด, รอยต่อ p-n, รังสีเอกซ์

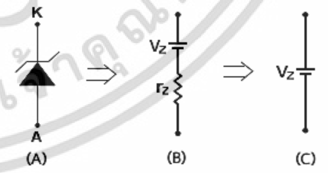
**Abstract**

This paper is a research studied the effects of radiation on the electrical characteristics of Zener diode. Start fabrication a Zener diode. Then the diodes were irradiated by X-ray for energy 70 keV with exposure time of 15, 30, 55 and 60 seconds. After that study the electrical properties of the diodes before and after irradiation such as Characteristics of the current – voltage (I-V) to the threshold voltage ($V_{bi}$), forward voltage ($V_F$), series resistance ($R_s$), Leakage Current ($I_{leak}$), Zener voltage ($V_Z$) and Zener impedance ($Z_{ZT}$) and analyzes the characteristics of capacitance - voltage (C-V) as well. The results showed that after the X-ray irradiation with energy 70 keV exposure time of 15 seconds forward current is lower than the previous. When increase exposure time to 30 seconds, the forward current are slightly increased with the previous radiation. However, when the irradiation time of 55 seconds, the Zener diode current value while the bias voltage was increased significantly. And irradiation time of 60 seconds, the current and voltage is dropped before irradiation.

Keyword: Zener diode, p-n junction, X-ray radiation

## 1. บทนำ

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิดหนึ่งในนั้นคือ ซีเนอร์ไดโอด ซึ่งเป็นไดโอดที่มีการนำมาใช้งานกันมากทางด้านการควบคุมแรงดันที่โหลดหรือใช้ในวงจรที่ต้องการแรงดันคงที่ ซึ่งถ้าเราสามารถพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวซีเนอร์ไดโอดนี้ได้ จะทำให้วงจรที่ใช้ตัวซีเนอร์ไดโอดมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวแปรที่สำคัญของซีเนอร์ไดโอดคือ ค่าแรงดันซีเนอร์ และความต้านทานซีเนอร์ ซึ่งแสดงวงจรสมมูลของซีเนอร์ไดโอดได้ดังรูปที่ 1




**รูปที่ 1** วงจรสมมูลซีเนอร์ไดโอด (A)สัญลักษณ์ซีเนอร์ไดโอด, (B) วงจรสมมูล และ (C) วงจรโดยประมาณ

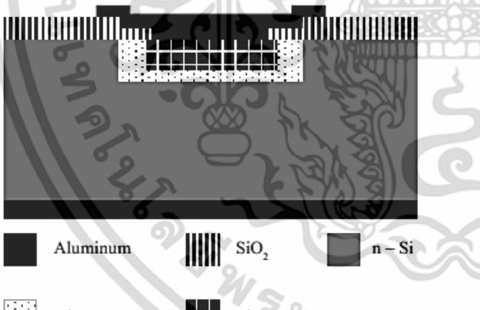


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานด้านรังสีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตของเรา โดยเฉพาะรังสีเอกซ์ที่มีการนำมาใช้งานหลากหลายด้าน ดังเช่น ด้านการแพทย์, ด้านความปลอดภัย, ด้านเกษตรกรรม เป็นต้น แต่ด้านสารกึ่งตัวนำยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้งานด้านรังสีเอกซ์นั้นยังไม่แพร่หลาย ดังนั้นในบทความนี้จึงมีความสนใจที่จะนำรังสีเอกซ์มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของซีเนอร์ไดโอด โดยจะทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอดเปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังฉายรังสีที่เวลาต่างกัน

## 2. กระบวนการสร้าง

ซีเนอร์ไดโอดถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ (111) สภาพต้านทานแผ่น 0.1 Ω·cm ความหนา 625 μm ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 9000 Å ที่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นเสร็จแล้วทำการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านบนแผ่นเพื่อสร้างพื้นที่ใช้งาน (active area) ขนาด $0.72 \times 10^{-2}$ $cm^2$ จากนั้นทำการยิงอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเป็นชั้นเอ็นบวก ( $n^+$ layer) ที่ด้านบนแผ่นด้วย ปริมาณสารเจือเท่ากับ $1.15 \times 10^{19}$ $cm^{3}$ แล้วยิงอะตอมสารเจือโบรอนด้วยพลังงาน 40 keV ปริมาณสารเจือเท่ากับ $3.3 \times 10^{20}$ $cm^3$ เพื่อสร้างเป็นชั้นพีบวก ( $p^+$ layer) ที่ด้านบนของแผ่นเช่นกัน จากนั้นทำการสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมทั้งสองด้านด้วยเทคนิคการ Sputter เพื่อใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส – แรงดัน ก่อนฉายรังสีเอกซ์ เสร็จแล้วนำตัวซีเนอร์ไดโอดไปทำการฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV ที่เวลา 15, 30, 55 และ 60 วินาที ตามลำดับ




รูปที่ 2 โครงสร้างของซีเนอร์ไดโอด

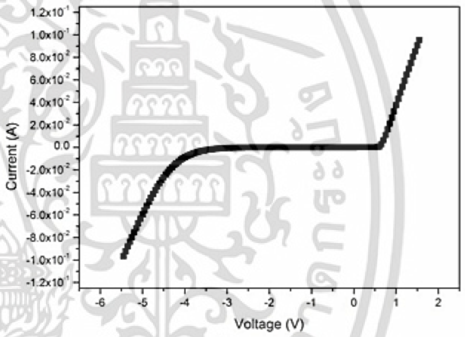
โดยในการวัดคุณสมบัติกระแส – แรงดัน นั้นจะทำการวัดที่แรงดันตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V และการวัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดัน จะทำการวัดโดยใช้ความถี่ 100 kHz และใช้แรงดันตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V เช่นกัน

## 3. ผลการทดลอง

หลังจากสร้างเสร็จแล้วจะนำมาทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Cascade Microtech M150 Probe Station พบว่าลักษณะสมบัติกระแส–แรงดันของซีเนอร์ไดโอดก่อนการฉายรังสีเอกซ์มีคุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าด้านเดียวดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นคุณสมบัติของรอยสัมผัสพี-เอ็น [2, 3, 5] โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1)

$$I = I_0 \left\{ exp\left[ \frac{q(V - IR_S)}{\eta kT} \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

โดยที่ I คือ กระแสรวม, $I_0$ คือ กระแสอิ่มตัว (saturation current), V คือ แรงดันไบอัส, $R_S$ คือ ความต้านทานอนุกรม (series resistance), η คือ แฟคเตอร์อุดมคติ (ideality factor), k คือ ค่าคงที่โบลต์มันส์, และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์




รูปที่ 3 ลักษณะสมบัติกระแส–แรงดันของซีเนอร์ไดโอดก่อนการฉายรังสีเอกซ์

ในกรณีของลักษณะสมบัติของความจุไฟฟ้า – แรงดันของซีเนอร์ไดโอดทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์จะแสดงดังรูปที่ 4 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าหลังการฉายรังสีเอกซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์หาค่าแรงดันภายในของซีเนอร์ไดโอด จะพบว่าก่อนและหลังการฉายรังสีแรงดันภายในมีค่าเท่ากันคือ 0.65 eV แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2)

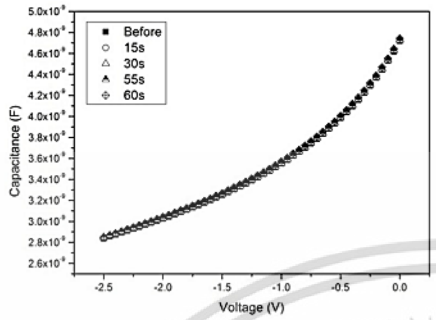
$$C_j = \left(\frac{A}{2}\right) \sqrt{\frac{2q\varepsilon_{si} N_D}{(V_{bi} + V_R)}} \quad (2)$$

โดยที่ $C_j$ คือ ความจุไฟฟ้ารอยต่อ, A คือ พื้นที่รอยต่อพี-เอ็น, $\varepsilon_{si}$ คือ ค่า permittivity ของซิลิคอน, W คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ, $N_A$

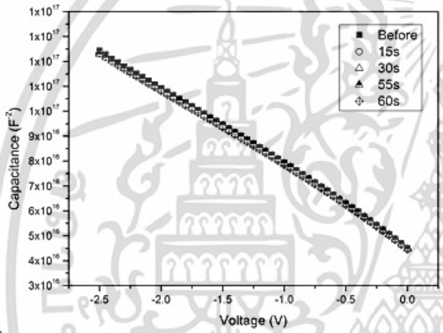


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ, $N_D$ คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้, $V_{bi}$ คือ แรงดันภายใน, และ $V_R$ คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ




**รูปที่ 4** ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ก่อนและหลังฉายรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 70 keV ที่เวลา 15, 30, 55 และ 60 วินาที



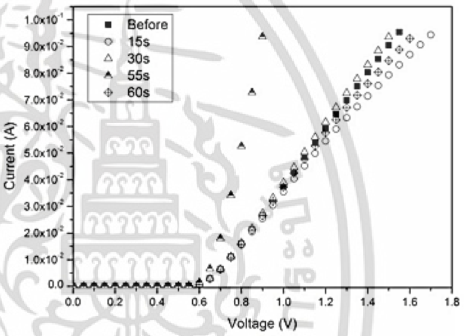

**รูปที่ 5** การหาค่าแรงดันภายในของซีเนอร์ไดโอดจากลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า–แรงดัน ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์

จากนั้นจะทำการศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อซีเนอร์ไดโอดโดยนำไดโอดไปฉายรังสีด้วยพลังงาน 70 keV ที่เวลาต่างกันแล้วทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังการฉาย ได้ดังรูปที่ 6 เป็นการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรง พบว่า ที่เวลาในการฉายรังสี 15 วินาที กระแสที่ได้จากการให้แรงดันช่วงแรกจะไม่แตกต่างจากก่อนการฉายรังสี แต่เมื่อให้แรงดันเพิ่มขึ้นกระแสที่ได้จะมีค่าลดลงจากเดิม ที่เวลา 30 วินาที ค่ากระแสมีลักษณะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเป็นไปได้ว่าพลังงานจากรังสีที่เวลาการฉาย 30 วินาทีเริ่มทำให้โครงสร้างภายในของไดโอดมีการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้น และที่เวลาการฉายรังสี 55 วินาที ปริมาณกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อาจเป็นเพราะพลังงานจากรังสีเอกซ์ทำให้จุดบกพร่องภายใน [4] โครงสร้างภายของซีเนอร์ไดโอดลดลง แต่ที่เวลาการฉายรังสี 60 วินาที จะเห็นว่าค่ากระแสที่ได้มีแนวโน้มลดต่ำลง อาจเนื่องมาจากไดโอดได้รับพลังงานจากการฉายรังสีมากเกินไปจนเริ่มทำลายโครงสร้างภายใน โดยเมื่อวิเคราะห์ค่าความต้านทานอนุกรมจากสมการที่ (3)

$$R_s = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F} \quad (3)$$

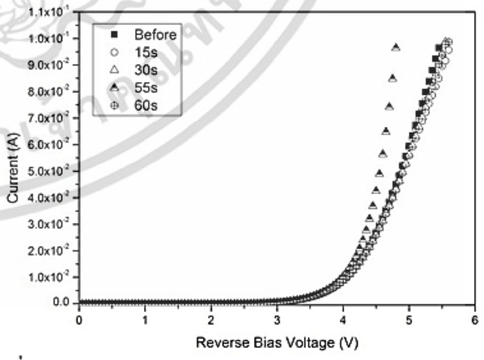
เมื่อ $\Delta V_F$ คือ ผลต่างของแรงดันไบอัสตรง และ $\Delta I_F$ คือ ผลต่างของกระแสไบอัสตรง

จะเห็นว่า ไดโอดที่ไม่ได้ฉายรังสีที่กระแสทดสอบ (Zener Testing Current) 35 mA แรงดันตกคร่อมของซีเนอร์ไดโอดอยู่ที่ 1 V จะมีค่าความต้านทานอนุกรมอยู่ที่ 9.33 Ω หลังการฉายรังสีที่ 15, 30, 55 และ 60 วินาที ที่กระแสทดสอบเดียวกัน มีแรงดันตกคร่อมซีเนอร์อยู่ที่ 1 V, 1 V, 0.95 V, 0.75 V และ 1 V ตามลำดับ และมีค่าความต้านทานอนุกรมอยู่ที่ 10.38 Ω, 9.06 Ω, 3.25 Ω และ 9.68 Ω ตามลำดับ ซึ่งเวลาในการฉายรังสีที่ 30 และ 55 วินาที มีค่าความต้านทานอนุกรมลดลงจากก่อนฉายรังสี โดยเฉพาะที่เวลา 55 วินาทีซึ่งลดลงจากก่อนการฉายประมาณ 65 %




**รูปที่ 6** ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันไบอัสตรง ก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV ที่เวลา 15, 30, 55 และ 60 วินาที

การทดสอบทางด้านแรงดันไบอัสกลับของซีเนอร์ไดโอด แสดงได้ดังรูปที่ 7




**รูปที่ 7** ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันไบอัสย้อนกลับ ก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV ที่เวลา 15, 30, 55 และ 60 วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเป็นการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับระหว่างก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ เมื่อพิจารณากระแสรั่วของซีเนอร์ไดโอดที่แรงดัน 3 V พบว่าไดโอดก่อนฉายรังสีมีกระแสรั่วไหล 0.56 mA ที่เวลาการฉายรังสีที่ 15, 30, 55 และ 60 วินาที มีกระแสรั่วไหล 0.56 mA, 0.56 mA, 0.57 mA และ 0.58 mA ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อทำการทดสอบค่าแรงดันซีเนอร์ และหาซีเนอร์อิมพีแดนซ์ พบว่าไดโอดก่อนการฉายรังสีมีที่กระแสทดสอบ 35 mA วัดค่าแรงดันซีเนอร์ได้ 4.65 V หลังจากการฉายรังสีที่เวลา 15, 30, 55 และ 60 วินาที ที่กระแสทดสอบเท่ากัน วัดค่าแรงดันซีเนอร์ได้ 4.7 V, 4.65 V, 4.45 V และ 4.65 V ตามลำดับ ซีเนอร์อิมพีแดนซ์ของไดโอดก่อนฉายรังสีเอกซ์มีค่า 0.06 $\Omega^{-1}$ และหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่เวลา 15, 30, 55 และ 60 วินาที อยู่ที่ 0.058 $\Omega^{-1}$, 0.056 $\Omega^{-1}$, 0.112 $\Omega^{-1}$ และ 0.059 $\Omega^{-1}$ ตามลำดับ โดยซีเนอร์อิมพีแดนซ์ของซีเนอร์ไดโอดหลังการฉายรังสีที่ 55 วินาที เพิ่มขึ้นจากก่อนฉายรังสีประมาณ 46% ซึ่งสามารถหาค่าซีเนอร์อิมพีแดนซ์ได้จากสมการที่ (4)

$$Z = \frac{\Delta I_z}{\Delta V_z} \quad (4)$$

เมื่อ $\Delta V_Z$ คือ ผลต่างของแรงดันซีเนอร์ และ $\Delta I_Z$ คือ ผลต่างของกระแสซีเนอร์

การที่แรงดันอิมพีแดนซ์ของซีเนอร์ไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นหลังการฉายรังสีเอกซ์ที่เวลา 55 วินาที แสดงให้เห็นว่าความนำไฟฟ้าของไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสที่ได้เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

## 4. สรุปผลการทดลอง

ซีเนอร์ไดโอดที่ถูกสร้างขึ้น ได้มีการนำมาวัดคุณสมบัติรอยสัมผัส พบว่ามีแรงดันขีดเริ่มที่ 0.65 eV ซึ่งเป็นไปตามลักษณะของรอยสัมผัสพี-เอ็น จากนั้นได้ซีเนอร์ไดโอดไปฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV ที่เวลา 15, 30, 55 และ 60 วินาที แล้วทำการวิเคราะห์คุณลักษณะกระแส-แรงดันเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลัง พบว่าเมื่อพิจารณาที่ฝั่งแรงดันไบอัสตรงที่เวลา 30 และ 55 วินาที ค่ากระแสขณะไบอัสตรงเพิ่มขึ้นจากซีเนอร์ไดโอดที่ไม่ได้รับการฉายรังสี โดยเฉพาะที่เวลา 55 วินาทีจะเห็นได้อย่างชัดเจน ส่วนที่เวลา 15 และ 60 วินาที ค่ากระแสลดต่ำลง เมื่อคำนวณค่าความต้านทานอนุกรมพบว่า ที่เวลาการฉายรังสี 55 วินาที มีค่าต่ำที่สุดที่ 3.25 Ω ซึ่งลดลงจากก่อนการฉายประมาณ 65% เมื่อพิจารณาทางด้านไบอัสย้อนกลับ กระแสรั่วไหลที่แรงดัน 3 V มีค่าใกล้เคียงกันส่วน เมื่อทำการทดสอบค่าแรงดันซีเนอร์ และหาซีเนอร์อิมพีแดนซ์ พบว่าที่กระแสทดสอบ 35 mA ซีเนอร์ที่ไม่ได้รับการฉายรังสีมีค่าแรงดันซีเนอร์ 4.65 V หลังจากการฉายรังสีที่เวลา 15, 30, 55 และ 60 วินาที ที่กระแสทดสอบเท่ากัน วัดค่าแรงดันซีเนอร์ได้ 4.7 V, 4.65 V, 4.45 V และ 4.65 V ตามลำดับ สำหรับค่าซีเนอร์อิมพีแดนซ์ของไดโอดหลังการฉายรังสีที่ 55 วินาที เพิ่มขึ้นจากก่อนฉายรังสีประมาณ 46% ส่วนที่การฉายที่เวลาอื่นมีค่าใกล้เคียงกัน

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนและเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างจากโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) หน่วยงานของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และแห่งชาติ (NSTDA) ขอขอบคุณอาจารย์ รวมถึงนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยทุกท่านที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

[1] S.M. Sze, "Physics of semiconductor devices", John Wiley & Sons, New York, 1981.

[2] Gerold W. Neudeck, "The pn junction diode", 2nd Modular series on solid state devices, Eds Gerold W. Neudeck and Robert F. Pierret, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

[3] สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ ลาดกระบัง. 2545.

[4] A. Poyai, Editor, Defect assessment in advanced semiconductor materials and devices, IMEC, Belgium 2002.

[5] Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai and Surasak Niemcharoen : New Method for Improving the Electrical Characteristics of P-N Junction Diode Trans Tech Publications, Switzerland 2012.

[6] สุรดา เอื้อมานะพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, อัมพร โพธิ์ใย, "ผลกระทบของการฉายรังสีเอ็กซ์โดยตรงต่อลักษณะสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น", วิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 28 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2554.

[7] Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai and Surasak Niemcharoen : New Method for Improving the Electrical Characteristics of P-N Junction Diode Trans Tech Publications, Switzerland 2012.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิชาการ
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6
*Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)*

# การปรับปรุงคุณสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมด้วยการฉายรังสีเอ็กซ์

# Improving Current-Voltage Characteristics of Platinum Doped Schottky Diode by X-ray Irradiation

ไอลดา สุวรรณชาตรี*,ศุภกร จันทร์ประภา, สุรดา เอื้อมานะพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์: +66-9104-1940-1 E-mail: swct.ailada@gmail.com

***บทคัดย่อ***

*ในงานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมลงบนฐานรองซิลิคอนและด้วยวิธีการฉายรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากคุณสมบัติของแพลตทินัมสามารถสร้างระดับพลังงานใหม่ในแถบพลังงานของซิลิคอน จึงส่งผลให้กระแสรั่วไหลของอุปกรณ์มีค่าลดลงซึ่งเป็นคุณสมบัติอันพึงประสงค์ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการแพร่แพลตทินัมนี้ ยังส่งผลให้กระแสขณะได้รับไบอัสตรงมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีการฉายรังสีเอ็กซ์เพื่อปรับปรุงให้กระแสขณะได้รับไบอัสตรงของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยรังสีเอ็กซ์จะทำให้อะตอมของซิลิคอนมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น เป็นเหตุให้จุดบกพร่องในเนื้อสารซิลิคอนลดลง ส่งผลให้พาหะที่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลลดลงและสามารถช่วยเพิ่มค่ากระแสขณะได้รับไบอัสตรงได้ จากผลการทดลอง พบว่าค่ากระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดที่มีการแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังถูกฉายรังสีเอ็กซ์ลดลง 50% ในขณะที่ค่ากระแสขณะได้รับไบอัสตรงเพิ่มขึ้นจาก 55 mA เป็น 68 mA*

***คำสำคัญ:*** *ช็อตต์กีย์ไดโอด, การเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัม, การฉายรังสีเอ็กซ์, แฟคเตอร์ทางอุดมคติ, ความต้านทานอนุกรม*

***Abstract***

*This research presents improving current-voltage (I-V) characteristic of platinum (Pt) doped silicon Schottky diodes with X-ray irradiation method. Since platinum can generate trap levels in silicon energy band, leakage currents of devices are decreased. However, this impurity atoms make forward current decrease as well, this is undesirable effect. Therefore, the article will show a new method, which is X-ray irradiation, to improve forward current of Pt-doped silicon Schottky diodes. X-ray exposure with an appropriate energy and time could make silicon and impurity atoms arrange more orderly. As a result, the defects in silicon substrate are reduced. Thus, leakage currents are decreased and forward currents are increased. After X-ray irradiation, leakage currents are less than the non X-ray Pt-doped diode 50%. While the forward current are increased from 55 mA to 68 mA.*

***Keywords****: Schottky diode, Platinum doping, X-ray irradiation, Ideality factor, Series resistance*

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางด้านอิเล็คทรอนิกส์ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขว้างมากขึ้นโดยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย คือ ช็อตต์กีย์ไดโอด (Schottky Diode)[1] ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างจากไดโอดทั่วไปคือ มีค่าแรงดันตกคร่อมตัวอุปกรณ์ขณะนำไปใช้งานน้อย[2] มีช่วงเวลาการฟื้นตัวกลับที่รวดเร็ว[3] จึงเหมาะแก่การนำไปใช้งานด้านสวิชชิ่งและงานด้านความถี่สูง[4] จึงทำให้ช็อตต์กีย์ไดโอดได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะการปรับปรุงกระแสรั่วไหล เช่น การเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมเพื่อลดค่ากระแสรั่วไหลแต่อย่างไรก็ตามกระแสขณะได้รับไบอัสตรงจะมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน[5] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยอาศัยการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิชาการ**
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6
*Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)*

ฉายรังสีต่างๆ ได้แก่ รังสีอิเลคตรอน[6] รังสีแกมม่า[7] และรังสีเอ็กซ์[8] เป็นต้น จากงานวิจัยเกี่ยวกับผลของรังสีที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พบว่า การฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานที่เหมาะสมจะสามารถปรับปรุงให้คุณสมบัติของกระแสดียิ่งขึ้น[9] จึงมีความสนใจนำช็อตต์กีย์ไดโอดที่ผ่านการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมแล้วมาฉายรังสีเอ็กซ์ และศึกษาผลกระทบของรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตต์กีย์ไดโอดนี้

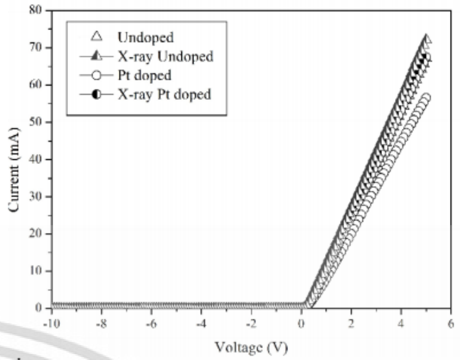
## 2. การทดลอง

การวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมด้วยการฉายรังสีเอ็กซ์นั้น เริ่มจากการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดที่มีรอยสัมผัสระหว่างโครเมียมและซิลิคอนชนิดเอ็น (Cr/n-Si) ระนาบ (100) สภาพต้านทานแผ่น 5 Ω-cm ทั้งแบบที่มีการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมและแบบที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือ การแพร่แพลตทินัมนั้นทำการเคลือบด้วยวิธี Electron-beam evaporation และแอนนีลด้วยความร้อน (850 ºC, 30นาที) จากนั้นจึงนำช็อตต์กีย์ไดโอดทั้งสองแบบไปฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง C–ARM SIEMENS SIREMOBIL COMPACT 650 135 ด้วยพลังงาน 85 keV เป็นเวลา 5 วินาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสม[10]

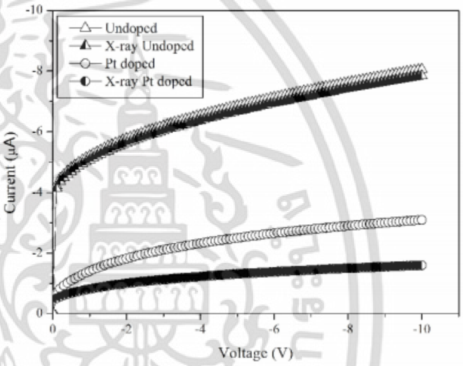
## 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อนำช็อตต์กีย์ไดโอดที่สร้างขึ้นไปฉายรังสีเอ็กซ์แล้วทำการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันด้วยเครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station จากกราฟในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าช็อตต์กีย์ไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีเอ็กซ์นั้นยังสามารถคงคุณสมบัติรอยสัมผัสแบบเรคติไฟร์ โดยมีค่าแรงดันภายใน ($V_{bi}$) = 0.4 V และที่แรงดัน 5 V พบว่าการฉายรังสีเอ็กซ์ทำให้ค่ากระแสขณะได้รับไบอัสตรงของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่มีถูกแพร่อะตอมสารเจือเพิ่มขึ้นจาก 66 mA เป็น 72 mA ส่วนในของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมค่ากระแสเพิ่มขึ้นจาก 56 mA เป็น 68 mA เนื่องจากการฉายรังสีเอ็กซ์นั้นสามารถลดจุดบกพร่องของอะตอมในซิลิคอนจากการเติมอะตอมสารเจือได้

ในส่วนของกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ พบว่าการฉายรังสีเอ็กซ์สามารถลดค่ากระแสรั่วไหลในไดโอดที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือลงได้ 0.2 mA ในขณะที่กระแสรั่วไหลของช็อตต์กีย์ไดโอดที่มีการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมลงไปนั้น พบว่าเมื่อฉายรังสีเอ็กซ์แล้ว กระแสรั่วไหลลดลงจากเดิม 50 % เนื่องจากรังสีเอ็กซ์สามารถลดพาหะที่ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลจากการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมลงได้ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2




รูปที่ 1 กระแส-แรงดันขณะได้รับไบอัสตรงของช็อตต์กีย์ไดโอดก่อนและหลังฉายรังสีเอ็กซ์




รูปที่ 2 กระแส-แรงดันขณะได้รับไบอัสย้อนกลับของช็อตต์กีย์ไดโอดก่อนและหลังฉายรังสีเอ็กซ์

นอกจากยังนี้สามารถนำกราฟกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดขณะที่รับไบอัสตรงมาคำนวณหาค่าแฟคเตอร์ทางอุดมคติ (Ideality factor : $\eta$ ) ค่าความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ($\phi_{bn}$) และค่าความต้านทานอนุกรม ($R_s$) ได้โดยอาศัยวิธีคิดคำนวณแบบ Cheung [11] ซึ่งจะทำการเปลี่ยนกระแสให้อยู่ในรูปของ ความหนาแน่นกระแส (J) (แกน x) นำมาพล็อตเทียบกับ dV/d(InJ) (แกน y) ซึ่งความสัมพันธ์ของกราฟเป็นไปตามสมการที่ (1)

$$\frac{d(V)}{d(InJ)} = RAJ + \frac{\eta kT}{q} \tag{1}$$

เมื่อ $k$ คือ ค่าคงที่ของโบลต์มันท์ $1.38\times10^{-23}$ (J/K), R คือ ความต้านทานอนุกรม (Ω) , A คือ พื้นที่รอยสัมผัส ($cm^2$), J คือ ความหนาแน่นกระแส ($A/cm^2$)

และจากสมการที่ (1) สามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมได้ โดยพื้นที่รอยสัมผัสของช็อตต์กีย์ไดโอดที่สร้างขึ้นนั้นมีค่า 1 $mm^2$ และ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิชาการ**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

*Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)*

จากจุดตัดแกนยังสามารถหาค่าแฟคเตอร์ทางอุดมคติได้อีกด้วย และเมื่อทำการพลอตเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง H(J) กับ J เมื่อกำหนดให้ H(J) มีค่าดังสมการที่ (2)

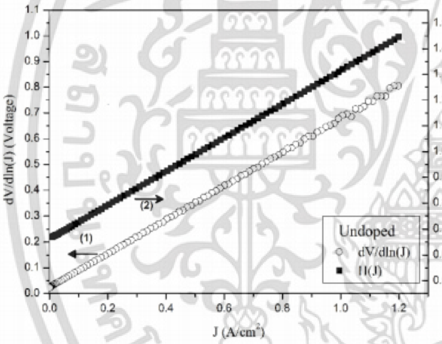
$$H(J) = V - (\frac{\eta kT}{q}) In(JA^{**}T^2) \qquad (2)$$

ทำการลดรูปสมการที่ (2) จะได้เป็นสมการที่ (3)

$$H(J) = RAJ + \eta\phi_{bn} \qquad (3)$$

นำค่าแฟคเตอร์ทางอุดมคติที่ได้จากสมการที่ (1) ไปแทนในสมการที่ (3) จะกราฟที่มีความชันเท่ากับ RA ทำให้สามารถหาค่าความสูงกำแพงศักย์ได้ จากจุดตัดแกน y

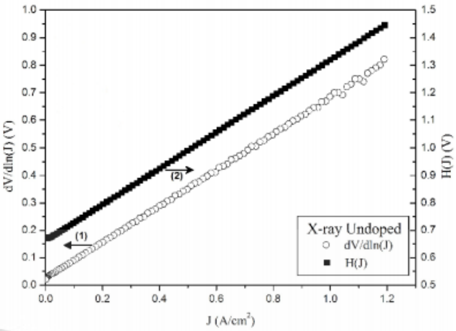
พิจารณากราฟรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการแปลงกราฟกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์โอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือก่อนถูกฉายรังสีเอ็กซ์ให้อยู่รูปแบบกราฟตามวิธีคิดคำนวณของ Cheung ทำให้สามารถหาค่า $\eta = 1.01$ , $R_S^{(1)} = 65\ \Omega$, $R_S^{(2)} = 66.7\ \Omega$ และ $\phi_{bn} = 0.65$ eV



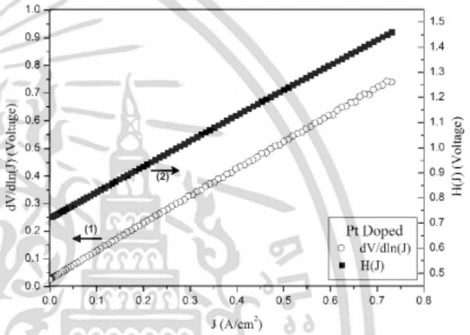

รูปที่ 3 กระแส-แรงดันในแบบการคิดคำนวณตามวิธีของ Cheung ในช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือก่อนฉายรังสีเอ็กซ์

ต่อมาพิจารณากราฟในรูปที่ 4 เป็นการแปลงกราฟกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์โอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือหลังถูกฉายรังเอ็กซ์ให้อยู่รูปแบบกราฟตามวิธีคิดคำนวณของ Cheung ทำให้สามารถหาค่า $\eta = 1.01$ , $R_S^{(1)} = 64\ \Omega$ , $R_S^{(2)} = 64.44\ \Omega$ และ $\phi_{bn} = 0.66$ eV

ในส่วนของกราฟรูปที่ 5 เป็นการแปลงกราฟกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์โอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือก่อนฉายรังสีเอ็กซ์ให้อยู่รูปแบบกราฟตามวิธีคิดคำนวณของ Cheung ทำให้สามารถหาค่า $\eta = 1.01$ , $R_S^{(1)} = 98.33\ \Omega$ , $R_S^{(2)} = 101.67\ \Omega$ และ $\phi_{bn} = 0.71$ eV

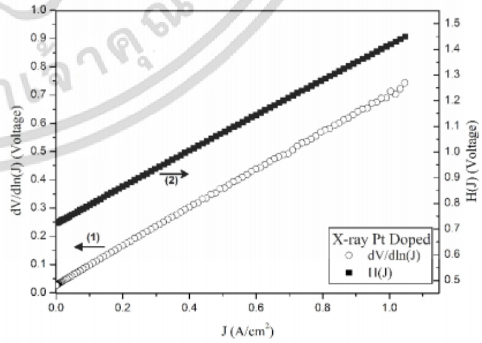



รูปที่ 4 กระแส-แรงดันในแบบการคิดคำนวณตามวิธีของ Cheung ในช็อตต์กีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่อะตอมสารเจือหลังฉายรังสีเอ็กซ์




รูปที่ 5 กระแส-แรงดันในแบบการคิดคำนวณตามวิธีของ Cheung ในช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมก่อนฉายรังสีเอ็กซ์

และเมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นการแปลงกราฟกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์โอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือหลังถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ให้อยู่รูปแบบกราฟตามวิธีคิดคำนวณของ Cheung ทำให้สามารถหาค่า $\eta = 1.01$, $R_S^{(1)} = 66.67\ \Omega$, $R_S^{(2)} = 70\ \Omega$ และ $\phi_{bn} = 0.71$ eV




รูปที่ 6 กระแส-แรงดันในแบบการคิดคำนวณตามวิธีของ Cheung ในช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมหลังฉายรังสีเอ็กซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิชาการ
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6
*Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)*

โดยพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคิดคำนวณตามวิธีของ Cheung ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคของ Cheung

| Schottky Diode | $\eta$ | $R_s^{[1]}$ (Ω) | $R_s^{[2]}$ (Ω) | $\phi_{bn}$ (eV) |
|---|---|---|---|---|
| Undoped | 1.01 | 65 | 66.67 | 0.65 |
| X-ray Undoped | 1.01 | 64 | 64.44 | 0.66 |
| Pt Doped | 1.01 | 98.33 | 101.67 | 0.71 |
| X-ray Pt Doped | 1.01 | 66.67 | 70 | 0.71 |

## 4. สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมด้วยการฉายรังสีเอ็กซ์ได้ทำการสร้างช็อตต์กีย์ไดโอดแบบไม่มีการเติมอะตอมสารเจือและแบบมีการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมเพื่อนำผลการทดลองมาศึกษาเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่าการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมบนช็อตต์กีย์ไดโอดนั้นสามารถลดค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับได้ แต่กลับผลให้กระแสขณะได้รับไบอัสตรงลดลงด้วยเช่นกัน แต่เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนช็อตต์กีย์ไดโอดที่มีการแพร่อะตอมสารเจือกลับทำให้ค่ากระแสขณะได้รับไบอัสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 55 mA เป็น 68 mA และยังสามารถทำให้กระแสรั่วไหลลดลงจากเดิม 50 % เนื่องจากรังสีเอ็กซ์สามารถเข้าไปช่วยการจัดเรียงตัวของจุดบกพร่องในซิลิคอนการเติมอะตอมสารเจือให้ดีขึ้น และต่อมาได้ทำการหาค่าแฟคเตอร์อุดมคติ ($\eta$) ค่าความสูงกำแพงศักย์ ($\phi_{bn}$) และค่าความต้านทานอนุกรม ($R_s$) ด้วยเทคนิคของ Cheung ซึ่งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำ พบว่าค่าความต้านทานอนุกรมของช็อตต์กีย์ไดโอดทั้งสองชนิดมีค่าลดลงหลังจากฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ นั้นแสดงให้เห็นว่าพลังงานจากการฉายรังสีเอ็กซ์นั้นสามารถเข้าไปช่วยลดจุดบกพร่องที่เกิดจากในเนื้อสารซิลิคอนจากการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมได้ ส่งผลให้การปรับปรุงคุณลักษณะกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดมีการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมเป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น นับว่าเป็นการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดไปอีกขั้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ต้องขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็คทรอนิกส์ (TMEC) ที่ช่วยเหลือในด้านเทคโนโลยีการสร้าง ขอขอบคุณ อาจารย์ประสงค์ ธูสรานนท์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์เรย์ และสุดท้ายขอขอบคุณอาจารย์และทีมนักวิจัยทุกท่าน

## เอกสารอ้ างอิง

[1] สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 4, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

[2] M. Atalla, "Metal semi-conductor shottky barrier diodes," IRE International Convention Record., vol. 14, pp. 65-67, 1966.

[3] P. Alexandrov, W. Wright, M. Pan, M. Weiner, L. Jiao, J.H. Zhao "Demonstration of high voltage (600–1300 V), high current (10–140 A), fast recovery 4H-SiC p-i-n/Schottky(MPS) barrier diodes," Solid State Electron., vol. 47, pp. 263-269, Feb. 2003.

[4] P. Muret, P.-N. Volpe, T.-N. Tran-Thi, J. Pernot, C. Hoarau, F. Omnès, T. Teraji "Schottky diode architectures on p-type diamond for fast switching, high forward current density and high breakdown field rectifiers," Diamond Relat. Mater., vol. 20, pp. 285-289, 2011.

[5] S.D Brotherton, P. Bradley, and J.Bicknell, "Electrical properties of platinum in silicon," J. Appl. Phys., vol. 50, pp. 3396-3403, 1979.

[6] Z. –Q. Fang, G.C. Farlow, B. Claflin, D.C.Look "Effects of electron-irradiation on electrical properties of AlGaN/GaN Schottky barrier diodes," J. Appl. Phys., vol. 105, pp. 123704-123705, Jun. 2009

[7] S. Girard, B. Tortech, E. Regnier, M. Van Uffelen, "Proton- and Gamma-Induced Effects on Erbium-Doped Optical Fibers," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol 54, pp. 2426-2434, Dec.2007.

[8] Denny D. Tang, Juan R. Maldonado, "The Effects of X-Rays on p-n Junction Leakage Currents," IEEE Trans. Electron Devices., vol. 36, no. 11, pp.2587-2592, Nov. 1989.

[9] Surasak Niemcharoen, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai, "Improve Forward Current Characteristics of Diode by X-ray Irradiation," Advanced Materials Research, vol. 433-440, pp. 6713-6716, 2012.

[10] สุรดา เอื้อมานะพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ "ผลกระทบจากการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงต่อลักษณะสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น" วิศวสารลาดกระบัง, ฉบับที่ 1, หน้า 31 – 36, 2554.

[11] S. K. Cheung, N. W. Cheung, "Extraction of Schottky Diode parameter from forward current-voltage characteristics," Appl. Phys. Lett., vol. 49, no 2, pp.85-87, Jul. 1986.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|---|
| **ชื่อ-นามสกุล** | นายศุภกร จันทร์ประภา |
| **วัน เดือน ปีเกิด** | 2 พฤศจิกายน 2532 ที่จังหวัดชลบุรี |
| **ที่อยู่** | 90/1 ถ.ศุขประยูร ต.หน้าเมือง อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000 |
| **ประวัติการศึกษา** | 2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) |
| **ความชำนาญเฉพาะด้าน** | 1.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ<br>2.) เครื่องมือวัดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ |

**ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์**

[1] **Supakorn Janprapha**, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Sunya Khunkhao, Thanawat Thongnak, Sani Klinsanit, Surasak Niemcharoen. "**The Effect of X-ray Irradiation on The Electrical Properties of Pt-Doped P-N Diode**", Advance Material Research, Vol. 717, 2013, pp. 121-124

[2] **ศุภกร จันทร์ประภา**, สุรดา เอื้อมานะพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย, ไอลดา สุวรรณชาตรี, บุศรา นรารักษ์, ธนวัฒน์ ทองหนัก, วิทวัส แย้มวงษ์ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ "**การศึกษาผลของรังสีเอกซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีเนอร์ไดโอด**" การประชุมวิชาการทาวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36, Volume II, 11-13 ธ.ค. 2556, หน้า 357-360

[3] **ศุภกร จันทร์ประภา**, อิสระ ศรีธนชัย, สุรดา เอื้อมานะพงษ์, อัมพร โพธิ์ใย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ "**การศึกษาฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของตัวตรวจวัดแสง**" การประชุมวิชาการทาวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, Volume II, 12-14 ธ.ค. 2555, หน้า 1033-103

[4] สุรดา เอื้อมานพงษ์, บุศรา นรารักษ์, อิสระ ศรีธนชัย, ศนิ กลิ่นสนิท, **ศุภกร จันทร์ประภา**, นิภาพรรณ กลั่นเงิน, อัมพร โพธิ์ใย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ "การศึกษาระดับพลังงาน กระตุ้นของซิลิคอนไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกแพร่ด้วยแพลตทินัม" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, Volume II, 12-14 ธ.ค. 2555, หน้า 1029-1032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[5] ศนิ กลิ่นสนิท, สุรดา เอื้อมานพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย, บุศรา นรารักษ์, **ศุภกร จันทร์ประภา**, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, นิภาพรรณ กลั่นเงิน, อัมพร โพธิ์ใย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส- แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงรอยสัมผัสช็อตกีย์บนฐานรองซิลิคอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, Volume II, 12-14 ธ.ค. 2555, หน้า 1029-1032

[6] ธนวัฒน์ ทองหนัก, สุรดา เอื้อมานพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย, บุศรา นรารักษ์, **ศุภกร จันทร์ประภา**, ศนิ กลิ่นสนิท, อัมพร โพธิ์ใย,สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สมกียรติศุภเดช “การสร้างฟิล์มบางอะมอฟัสซิลิคอนด้วยเทคนิคอาร์-เอฟ สปัตเตอร์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, Volume II, 12-14 ธ.ค. 2555, หน้า 1009-1012,

[7] B. Nararug, S. Ueamanapong, I. Srithanachai, **S. Janprapha**, A. Suwanchatree, S. Niemcharoen, R. Muanghlua, N. Klunngien. “Light-Response Characteristics of Platinum Doped Silicon Photodetector”, Advance Material Research, Vol. 811, 2013, pp. 196-199

[8] ไอลดา สุวรรณชาตรี, **ศุภกร จันทร์ประภา**, สุรดา เอื้อมานะพงษ์, อิสระ ศรีธนชัย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การปรับปรุงคุณสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ถูกแพร่แพลตทินัมด้วยการฉายรังสีเอ็กซ์” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6, 26-28 มี.ค. 2557



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้