

การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนชนิดกึ่งนำไฟฟ้า
ที่ดoped ด้วยอะตอมสารเจือปนแพลทินัม

STUDY ON FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF PLATINUM
DOPED SILICON SCHOTTKY DIODE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-043-078

การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนซีดทียก๊อตโตโด
ที่ถูกรั่วด้วยอะตอมสารเจือแพลทินัม

Study on Fabrication and Characteristics of Platinum
Doped Silicon Schottky Diode



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-043-078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013


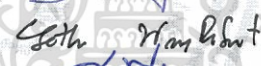



FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนช็อตทกีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม
Thesis Title Study on Fabrication and Characteristics of Platinum Doped Silicon Schottky Diode
นักศึกษา นางสาวศนิ กลิ่นสนิท
รหัสประจำตัว 55612509
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-043-078

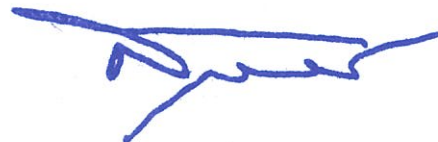
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
ดร.นรินทร์	อติวงศ์แสงทอง	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุขขีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอน ซีดทกียไคโอดที่ถูแพรด้วยอะตอมสารเจือแผลตทินัม
นักศึกษา	นางสาว ศนิ กลิ่นสนิท
รหัสนักศึกษา	55612509
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานของซีดทกียไคโอดที่ถูสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) สภาพต้านทานแผ่น 3-8 Ω -cm มีความหนา 625 μm ที่ถูแพรด้วยอะตอมสารเจือแผลตทินัม (Pt) เปรียบเทียบกับซีดทกียไคโอดที่ถูสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นที่ไม่ถูแพรด้วยอะตอมสารเจือแผลตทินัม เนื่องจากแผลตทินัมมีคุณสมบัติเป็นอะตอมสารเจือระดับลึก ทำให้อายุการเกิดและอายุการรวมตัวของพาหะเปลี่ยนแปลงซึ่งสามารถช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะศึกษาผลของแผลตทินัมที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าซีดทกียไคโอด การศึกษานี้มีความมุ่งหมายที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของซีดทกียไคโอดให้ดีขึ้น โดยเริ่มจากการสร้างซีดทกียไคโอดที่มีขนาดและโครงสร้างที่แตกต่างกันเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้าง จากนั้นทำการสร้างซีดทกียไคโอดโครงสร้างรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนชนิดเอ็น โดยมีลักษณะขั้วโลหะเป็นสี่เหลี่ยมขอบมน และทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้านี้ระหว่างซีดทกียไคโอดที่ไม่ถูแพรด้วยอะตอมสารเจือแผลตทินัมและซีดทกียไคโอดที่ถูแพรด้วยอะตอมสารเจือแผลตทินัม จากผลการทดลองพบว่ากระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงของซีดทกียไคโอดที่ถูแพรด้วยอะตอมสารเจือแผลตทินัมจะมีค่าลดลงประมาณ 1.3 เท่า เมื่อพิจารณาที่กระแสรั่วไหลของซีดทกียไคโอดที่ถูแพรด้วยอะตอมสารเจือแผลตทินัมนั้นพบว่าจะมีค่าลดลงถึง 2.5 เท่า ดังนั้นการเติมอะตอมสารเจือแผลตทินัมจึงเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของซีดทกียไคโอดได้

Thesis Title	Study on Fabrication and Characteristics of Platinum Doped Silicon Schottky Diode
Student	Miss Sani Klinsanit
Student ID	55612509
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

ABSTRACT

This thesis studies about basic characteristics of Schottky diode that were fabricated on n-type silicon substrate and Schottky diodes that were fabricated on n-type silicon doped by Platinum. The silicon substrate is n-type (100) orientation resistivity 3-8 Ω -cm silicon and has a thickness of 625 μ m. Platinum as a lifetime-control deep impurity in silicon used to adjust generation and recombination lifetime which can improve the electrical characteristics of electronics devices. Therefore, we are interested in study the effect of Platinum on electrical characteristics of Schottky diode. The aim of this thesis is Schottky diode characteristics improvement. First, fabricate Schottky diode which difference active area and shape to analyze the appropriate condition. After that fabricate Al/n-Si Schottky diode with rounding corner electrode to compare the characteristics between un-doped and Platinum doped Schottky diode. The results show that the current of Platinum doped Schottky diode decreases about 1.3 time. When we consider at reverse bias voltage the leakage current of Platinum doped Schottky diode decreases about 2.5 time in the case of un doped. Therefore, Platinum doped can improve the characteristics of Schottky diode.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และความอนุเคราะห์แก่ข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ เขียวศิริ ฤกุล, รองศาสตราจารย์ ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, ดร. โยธิน วงศ์ประเสริฐ, ดร. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, ดร. รังสรรค์ เมืองเหลือ และ คณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ฝังใจให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร. นิภาพรรณ กลั่นเงิน, คุณวิทวัส แยมวงษ์, นักวิจัย และ เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองบางส่วน เครื่องมือวัดในการวิเคราะห์ชิ้นงาน และการให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ รวมทั้งอธิบายถึงกระบวนการในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณคุณสุรดา เอื้อมานะพงษ์ คุณอิสระ ศรีชนชัย และคุณจิรวัดน์ ปราบเขต ที่ได้ช่วยถ่ายทอดความรู้ และเทคนิคในการค้นคว้าข้อมูลบางส่วน รวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคการวัดผลและมุมมองทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ และขอบคุณ คุณบุศรา นรารักษ์, คุณธนวัฒน์ ทองหนัก, คุณศุภกร จันทร์ประภา, คุณศรุธา ยรรยง และคุณภูมิ คงห้วยรอบ ที่ให้ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติ พี่ น้อง ที่ให้ความรักความเมตตาอบรมสั่งสอน และสนับสนุนทางการเรียนแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

ศนิ กลิ่นสนิท

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อ.....	XIII
รายการสัญลักษณ์.....	XIV
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	8
2.1 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	8
2.1.1 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุดมคติก่อนสัมผัส.....	8
2.1.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	9
2.1.2.1 กรณีไบอัสตรง.....	10
2.1.2.2 กรณีไบอัสย้อนกลับ.....	12
2.1.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	13
2.1.3.1 กรณีไบอัสตรง.....	15
2.1.3.2 กรณีไบอัสย้อนกลับ.....	16
2.1.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง.....	17
2.1.5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง.....	18
2.2 จุดบกพร่อง.....	20
2.3 คุณสมบัติแพลตฟอร์ม.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 แหล่งที่พบ.....	23
2.3.2 สมบัติทางเคมี.....	23
2.3.3 การใช้ประโยชน์.....	24
2.3.4 คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม.....	24
2.3.5 ระดับพลังงานของแพลตทินัมในซิลิคอน.....	25
2.3.6 สภาพต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม.....	28
2.3.7 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	31
2.3.8 การควบคุมช่วงอายุของพาหะด้วยอะตอมแพลตทินัม.....	35
บทที่ 3 เทคโนโลยีการสร้าง การออกแบบ และกระบวนการสร้าง.....	37
3.1 เทคโนโลยีการสร้าง.....	37
3.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน.....	37
3.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	39
3.1.3 กระบวนการแพร่สารเจือโดยเทคนิคไอออนอิมแพลนเทชัน.....	40
3.1.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน.....	41
3.1.5 กระบวนการซินเตอร์ริง.....	41
3.2 การออกแบบลวดลาย และการสร้างกระจกต้นแบบ.....	42
3.2.1 ลวดลายกระจกต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาผลของพื้นที่ขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีต่อ ลักษณะสมบัติต่างๆของซีดทกียีไดโอด.....	43
3.2.2 ลวดลายกระจกต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาความแตกต่างของรูปร่างขั้วไฟฟ้า โลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆของซีดทกียีไดโอด.....	44
3.2.3 ลวดลายกระจกต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของแพลตทินัมที่มีผลต่อ ลักษณะสมบัติต่างๆของซีดทกียีไดโอด.....	46
3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้างซีดทกียีไดโอด.....	48
บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
4.1 การทดลอง.....	57
4.1.1 การศึกษาความแตกต่างของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆ ของซีดทกียีไดโอด.....	57
4.1.2 การศึกษาความแตกต่างของรูปร่างขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆ ของซีดทกียีไดโอด.....	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 การศึกษาคุณสมบัติของแพลตฟอร์มที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆของ ซีตทิกียไดโอด.....	58
4.2 การศึกษาความแตกต่างของพื้นที่ของขั้วโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆ ของซีตทิกียไดโอด.....	59
4.2.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีตทิกียไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si ที่มีขั้วไฟฟ้าโลหะขนาดต่างๆ.....	59
4.2.2 การทดสอบคุณสมบัติรอยสัมผัสซีตทิกียไดโอด.....	60
4.2.3 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีตทิกียไดโอดที่ขนาดต่างๆ ...	65
4.3 การศึกษาความแตกต่างของรูปร่างขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆ ของซีตทิกียไดโอด.....	66
4.3.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีตทิกียไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si ที่มีรูปร่างของขั้วไฟฟ้าโลหะที่แตกต่างกัน.....	66
4.3.2 การทดสอบคุณสมบัติรอยสัมผัสซีตทิกียไดโอด.....	68
4.3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีตทิกียไดโอดที่มีรูปร่าง ของขั้วไฟฟ้าโลหะที่แตกต่างกัน.....	70
4.4 การศึกษาคุณสมบัติของแพลตฟอร์มที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆของซีตทิกียไดโอด	72
4.4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีตทิกียไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si ที่ไม่ถูกแพรวด้วยอะตอมสารเจือแพลตฟอร์มและถูกแพรวด้วยอะตอมสารเจือ แพลตฟอร์ม.....	72
4.4.2 การทดสอบคุณสมบัติรอยสัมผัสซีตทิกียไดโอด.....	75
4.4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีตทิกียไดโอดที่ไม่ถูกแพรว ด้วยอะตอมสารเจือแพลตฟอร์มและซีตทิกียไดโอดที่ถูกแพรวด้วยอะตอมสารเจือ แพลตฟอร์ม.....	76
4.4.4 การศึกษาความหนาแน่นของพาหะ เปรียบเทียบระหว่างซีตทิกียไดโอดที่ไม่ ถูกแพรวด้วยอะตอมสารเจือแพลตฟอร์มและซีตทิกียไดโอดที่ถูกแพรวด้วยอะตอม สารเจือแพลตฟอร์ม.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
เอกสารอ้างอิง	81
ภาคผนวก.....	85
ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติทั่วไปของแพลทินัม	22



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนในซิลิคอนชนิดเอ็นซึ่งอะตอมสารเจือปนมากกว่าอะตอมสารเจือปน.....	5
2.1 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสขั้ว.....	9
2.2 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสขั้ว.....	10
2.3 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง.....	11
2.4 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	12
2.5 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัสขั้ว.....	13
2.6 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสขั้ว.....	14
2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	15
2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	17
2.9 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดัน ของรอยสัมผัสขั้วไดโอดแบบรอยต่อ พี – เอ็น	18
2.10 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันของรอยสัมผัสขั้ว.....	19
2.11 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดันของรอยสัมผัสขั้วในเทอมของ $1/C^2$	19
2.12 ความบกพร่องลักษณะจุดชนิดต่างๆ.....	20
2.13 ความบกพร่องในลักษณะแนวเส้นชนิดต่างๆ.....	21
2.14 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแพลตทินัมในซิลิคอน.....	25
2.15 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอนบริสุทธิ์.....	26
2.16 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปน.....	27
2.17 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนในซิลิคอนชนิดเอ็นซึ่งอะตอมสารเจือปนมากกว่าอะตอมสารเจือปน.....	27
2.18 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัมในซิลิคอนชนิดพีซึ่งอะตอมสารเจือปนมากกว่าอะตอมแพลตทินัม.....	28
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดสภาพต้านทานของซิลิคอนกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือปนของซิลิคอนฐานรองชนิดพีที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือปนที่แตกต่างกัน โดยตัวเลขในกราฟแสดงค่าของสภาพต้านทานเริ่มแรกของซิลิคอน.....	29
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือปนของซิลิคอนฐานรองชนิดเอ็นที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือปนที่แตกต่างกัน โดยตัวเลขในกราฟแสดงค่าของสภาพต้านทานเริ่มแรกของซิลิคอน.....	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n), โอลิอิสระ (p), อิเล็กตรอนที่ถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้รับ (n_d) และโฮลที่ถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้ให้ (p_d) ในฟังก์ชันรวมของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนพลตทินัมโดยฐานรองถูกโดปที่ $N_D = 2.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	30
2.22 ระดับเฟอร์มิในฟังก์ชันความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนพลตทินัม โดยฐานรองถูกโดปที่ $N_D = 2.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	31
2.23 (ก) กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบตรง	32
(ข) กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบอ้อม	32
2.24 แสดงกระบวนการจับยึดและกำเนิดของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่ง E_i	33
3.1 (ก) อัตราการเกิดของซิลิคอนไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิคอนในบรรยากาศของออกซิเจนกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	38
(ข) อัตราการเกิดของซิลิคอนไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิคอนในบรรยากาศของออกซิเจนกระบวนการออกซิเดชันชื้น	38
3.2 กระบวนการโพโตลิโธกราฟี	39
3.3 เครื่องไอออนอิมแพลนเทชัน	40
3.4 กระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering)	41
3.5 (ก) ลวดลายกระจกต้นแบบของซีดกียาไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si สำหรับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์	42
(ข) ลวดลายกระจกต้นแบบของซีดกียาไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si สำหรับชั้นอลูมิเนียม	43
3.6 (ก) ลวดลายสี่เหลี่ยมขอบมนที่พื้นที่ขนาดต่างๆของซีดกียาไดโอดสำหรับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์	43
(ข) ลวดลายสี่เหลี่ยมขอบมนที่พื้นที่ขนาดต่างๆของซีดกียาไดโอดสำหรับชั้นอลูมิเนียม	43
3.7 (ก) ลักษณะโครงสร้างและลวดลายขั้วไฟฟ้าสี่เหลี่ยมขอบมนขนาด 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm ² ของซีดกียาไดโอดที่ทำการสร้าง	44
(ข) ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างและลวดลายขั้วไฟฟ้าสี่เหลี่ยมขอบมนขนาด 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm ² จากกล้องจุลทรรศน์	44
3.8 (ก) ลวดลายสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน, วงกลมของซีดกียาไดโอดสำหรับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์	45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ข) ลวดลายสีเหลี่ยม, สีเหลี่ยมขอบมน, วงกลมของซีดทีอีไดโอดสำหรับชั้นอลูมิเนียม....	45
3.9 (ก) ลักษณะโครงสร้างและลวดลายขั้วไฟฟ้าสีเหลี่ยม, สีเหลี่ยมขอบมนและวงกลมของซีดทีอีไดโอดที่ทำการสร้าง.....	46
(ข) ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างและลวดลายขั้วไฟฟ้าสีเหลี่ยม, สีเหลี่ยมขอบมนและวงกลมของซีดทีอีไดโอดจากกล้องจุลทรรศน์.....	46
3.10 (ก) ลวดลายขั้วไฟฟ้าสีเหลี่ยมขอบมนของซีดทีอีไดโอดที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของแพลทินัมชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	47
(ข) ลวดลายขั้วไฟฟ้าสีเหลี่ยมขอบมนของซีดทีอีไดโอดที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของแพลทินัมชั้นอลูมิเนียม.....	47
3.11 (ก) ลักษณะโครงสร้างและลวดลายขั้วไฟฟ้าวงกลมของซีดทีอีไดโอดที่ทำการสร้าง.....	47
(ข) ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างและลวดลายขั้วไฟฟ้าวงกลมของซีดทีอีไดโอดจากกล้องจุลทรรศน์.....	47
3.12 แผนผังกระบวนการสร้างซีดทีอีไดโอดโครงสร้าง AL/n-Si (Pt doped).....	48
3.13 รูปชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์.....	52
3.14 ขั้นตอนกระบวนการสร้างซีดทีอีไดโอด.....	53
4.1 ชุดเครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station.....	57
4.2 การทดลองวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของ AL/n-Si.....	58
4.3 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AL/n-Si ที่ขนาดต่างๆ.....	59
4.4 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัส AL/n-Si ที่ขนาดต่างๆ..	60
4.5 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแรงดันไบอัสต่ำๆ ของรอยสัมผัส AL/n-Si ที่ขนาดต่างๆ.....	61
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดขนาด 0.01 mm ²	62
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดขนาด 0.04 mm ²	62
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดขนาด 0.09 mm ²	63
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดขนาด 0.36 mm ²	63

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดขนาด 1.44 mm ²	64
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและแรงดันของซีดทีอีไดโอด.....	65
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของซีดทีอีไดโอดที่ขนาดต่างๆ.....	66
4.13	กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่รูปร่างขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน...	67
4.14	กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่รูปร่างขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	67
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดลักษณะวงกลม.....	68
4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดลักษณะสี่เหลี่ยมขอบมน.....	69
4.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดลักษณะสี่เหลี่ยม.....	69
4.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและแรงดันของซีดทีอีไดโอดที่รูปร่างแตกต่างกัน..	70
4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของซีดทีอีไดโอดที่รูปร่างที่แตกต่างกัน.....	71
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซีดทีอีไดโอด.....	71
4.21	กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม และไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม.....	73
4.22	กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม และไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม.....	73
4.23	กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม และไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม.....	74
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม.....	75
4.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและแรงดันของซีดทีอีไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม.....	76

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความกว้างของบริเวณปลอดภัยของซ็อกเก็ตย ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมและไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือ ปนพลตทินัม.....	77
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซ็อกเก็ตยไดโอด.....	78



รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
Al	Aluminium	อลูมิเนียม
Å	Angstrom	อังสตรอม
Ar	Argon	อาร์กอน
cm	Centimeter	เซนติเมตร
C ₃ H ₈ O	Propanal	โพรพานอล
DI water	De-ionization water	น้ำบริสุทธิ์
E-beam	Electron-beam evaporation	ระบบระเหยสารด้วยลำแสงอิเล็กตรอนในสุญญากาศ
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
LED	Light-emitting diode	ไดโอดเปล่งแสง
n-Si	N type Silicon	ซิลิคอนชนิดเอ็น
nm	nanometer	นาโนเมตร
Na ₂ CO ₃	Sodium carbonate	สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต
NH ₄ F	Ammonium fluoride	แอมโมเนียมฟลูออไรด์
Pt	Platinum	แพลตตินัม
Si	Silicon	ซิลิคอน
SiO ₂	Silicon dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
TMEC	Thai Microelectronics Center	ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
µm	Micrometer	ไมโครเมตร
UV	Ultraviolet	แสงอัลตราไวโอเล็ต
VLSI	Very large scale integration	วงจรรวมที่มีความจุสูงมาก

รายการสัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่รอยสัมผัส
C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้า
e_n	คือ	ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยที่สภาวะสมดุลความร้อน
E_0	คือ	ระดับสูญญากาศ
E_A	คือ	ระดับผู้รับแบบลึก
E_C	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
E_D	คือ	ระดับผู้ให้แบบลึก
E_{FM}	คือ	ระดับเฟอร์มิ
E_i	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
E_T	คือ	ศูนย์กลางการดักจับ
\mathcal{E}_S	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
I_R	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส
J_R	คือ	ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
k	คือ	ค่าคงที่โบสตันน์
n	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
n_a	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้รับ
N_A	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้รับ
N_A^-	คือ	ไอออนลบของอะตอมผู้รับ
N_D	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้ให้
N_D^+	คือ	ไอออนบวกของอะตอมผู้ให้
N_P	คือ	ความหนาแน่นของอะตอมแพลตทินัม
p	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
p_d	คือ	โฮลที่ถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้ให้
P	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
P_d	คือ	โฮลที่ถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้ให้
q	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

R	คือ	ค่าคงตัวรีซาร์ดสัน
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
v_{th}	คือ	ความเร็วของอิเล็กตรอน
V_A	คือ	แรงดันไบอัสไปข้างหน้า
$-V_A$	คือ	แรงดันไบอัสย้อนกลับ
V_{bi}	คือ	แรงดันภายใน
W	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
χ	คือ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
σ_n	คือ	ภาคตัดขวางการจับยึด
ϕ_{bn}	คือ	กำแพงศักย์ชนิดตื้น
ϕ_M	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_S	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
τ_p	คือ	ค่าเวลาช่วงชีวิตของโฮล
τ_n	คือ	ค่าเวลาช่วงชีวิตของอิเล็กตรอน



รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ	Metal-semiconductor
ระดับสุญญากาศ	Vacuum level
อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี	Electron affinity
ระดับพลังงานเฟอร์มิ	Fermi energy
กำแพงศักย์ภายใน	Potential barrier
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	Depletion width
การรวมตัวใหม่	Recombination
สิ่งปนเปื้อน	Contamination
ความบกพร่องในลักษณะจุด	point defects
รอยสัมผัสเรกติไฟร์	Rectify contact
ระดับพลังงานระดับตื้น	Shallow level
ระดับพลังงานระดับลึก	Deep level
ศูนย์กลางการรวมตัว	Recombination center
ศูนย์กลางการเกิดพาหะ	Generation center
อายุการรวมตัวของพาหะ	Recombination lifetime
อายุการเกิดของพาหะ	Generation lifetime
แพลตตินัม	Platinum
ความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนของธาตุ	Electronegativity
ค่าสภาพต้านทาน	Resistivity
ช่วงความถี่ในการตอบสนอง	Frequency response
อะตอมสารเจือระดับลึก	Deep impurity
สัมประสิทธิ์การแพร่	Diffusion coefficient
การแทรกตัวอยู่ระหว่างอะตอม	Interstitial
การแพร่แบบเข้าไปแทนที่	Substitutional diffusion
ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก	Deep acceptor level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก

Deep donor level

โฟนอน

Phonon

อิเล็กตรอน

Electron

โฮล

Hole

ความเร็วของอิเล็กตรอน

Thermal velocity

ภาคตัดขวางการจับยึด

Capture cross section

พาหะ

Carrier

การออกซิเดชันแบบแห้ง

Dry Oxidation

การออกซิเดชันแบบชื้น

Wet oxidation

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

Photolithography

การรวมตัวใหม่แบบโดยตรง

Direct recombination

การรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม

Indirect recombination

กระจกลดลายต้นแบบ

Photo mask

น้ำยาล้างฟิล์ม

Developer

กระบวนการเมทัลไลเซชัน

Metalization

กระจกต้นแบบลดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

Oxide mask

กระจกต้นแบบสำหรับสร้างลดลายของชั้นไฟฟ้าโลหะ

Metal mask

การไบอัสไปข้างหน้า

Forward bias

การไบอัสย้อนกลับ

Reverse bias

ความแตกต่างแท้จริง

Actual difference

ค่าความต้านทานติดลบ

Reverse resistance

ซีดตกีย์ไดโอด

Schottky diode

ซิลิคอน

Silicon

ซีเนอร์ไดโอด

Zener diode

ไดโอดรอยต่อแบบเฮเทอโร

Heterojunction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
ไดโอดรอยต่อแบบโฮโม	Homojunction
แถบพลังงาน	Energy band
ทันเนลไดโอด	Tunnel diode
น้ำยาไวแสง	Dry film
น้ำยาไวแสงชนิดบวก	Positive photoresist
พาหะส่วนน้อย	Minority carrier
พาหะส่วนมาก	Majority carrier
แรงดันนำกระแสที่แท้จริง	Effective turn-on voltage
รอยต่อพีเอ็น	p-n junction
รอยสัมผัสโอห์มมิก	Ohmic contact
วาริแอกไดโอด	Variac diode
เทคนิคการสปัตเตอร์ริง	Magnetron Sputtering
กระบวนการอบที่ช่วยให้คุณสมบัตินรอยสัมผัสดีขึ้น	Sintering
น้ำยาไวแสง	Photoresist
พื้นที่ใช้งาน	Active area
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
อบแผ่นครั้งแรก	Pre bake
อะซิโตน	Acetone
อัลตราโซนิก	Ultrasonic
กรดปรีนยา	Piranha
ไตรโคโลเอทรีลีน	Trichloroethylene
ลอกชั้นออกไซด์	Slide etching
ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ	Native oxide
แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม	Pt-doped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เมื่อกล่าวถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะมีหลักการทำงานพื้นฐานทั่วไปเหมือนกัน ได้แก่ การเกิดกระแสไฟฟ้าของพาหะ (carrier) คือ อิเล็กตรอน (Electron) และโฮล (Hole) ไดโอดนั้นเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญชิ้นหนึ่งของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ ในสมัยก่อนนั้นไดโอดมักจะเป็นแบบหลอดสุญญากาศ ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็ว จึงทำให้สิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่ที่ทำด้วยสารกึ่งตัวนำได้เข้าแทนที่หลอดสุญญากาศอย่างสิ้นเชิง เมื่อกล่าวถึงไดโอดจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ไดโอดรอยต่อแบบโฮโม (homojunction) และไดโอดรอยต่อแบบเฮเทอโร (heterojunction)

ไดโอดรอยต่อแบบโฮโมนั้นเกิดจากรอยสัมผัสของสารชนิดเดียวกันส่วนไดโอดรอยต่อแบบเฮเทอโรนั้นเกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันมาสัมผัสกันอย่างปรมาณิต การนำมาประชิดเข้าด้วยกันของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันจะเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ในงานวิจัยนี้จะศึกษาไดโอดแบบเฮเทอโร รูปแบบหนึ่งที่สำคัญ คือ ซีออตทีย์ไดโอด (Schottky diode) ซึ่งมีรอยสัมผัสเรกติไฟร์ (rectify contact) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ กลไกกระแสในรอยสัมผัสซีออตทีย์จะแตกต่างจากไดโอดรอยสัมผัสพีเอ็น คือ กระแสซีออตทีย์ไดโอดเป็น กระแสกวาร์ไหลของพาหะส่วนมาก (majority carrier) ดังนั้นจะไม่เกิดปรากฏการณ์การสะสมพาหะส่วนน้อย (minority carrier) ซีออตทีย์ไดโอดสามารถที่จะสวิตซ์ได้เร็วกว่าไดโอดพีเอ็น นอกจากนี้แรงดันนำกระแสที่แท้จริง (effective turn-on voltage) ของซีออตทีย์ไดโอดจะน้อยกว่าไดโอดพีเอ็น จากคุณสมบัติทั้งสองประการนี้ทำให้ซีออตทีย์ไดโอดมีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานวงจรรีเลย์ทรอนิกส์มากมาย เช่น ตัวตรวจวัดย่านไมโครเวฟ ตัวตรวจวัดแสง ตัวตรวจวัดแก๊ส เป็นต้น [1, 2]

แต่เนื่องจากซีออตทีย์ไดโอดนั้นมีกระแสรั่วไหลมากกว่าไดโอดพีเอ็น ดังนั้นงานวิจัยส่วนมากจึงได้ทำการพัฒนาคุณสมบัติของซีออตทีย์ไดโอดโดยการลดกระแสรั่วไหลลง เช่น ในปี 2006 ได้มีการยั้งรังสีโปรตอนไปยังซีออตทีย์ไดโอด จากผลการทดลองพบว่ายังไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางด้านกระแส แต่เป็นการเพิ่มความต้านทานอนุกรมของซีออตทีย์ไดโอด [3] ต่อมาในปี 2009 ได้มีการเคลือบชั้น poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) doped with poly (4-styrenesulfonate) (PEDOT : PSS) ก่อนการสร้างรอยสัมผัสซีออตทีย์ พบว่าทำให้กระแสรั่วไหลลดลงได้ประมาณ 10 เท่า [4]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยหลายงานที่ได้ทำการศึกษาผลของการเติมอะตอมสารเจือปนลงบนซิลิคอน [5, 6] ซึ่งพบว่าแพลตทินัมส่งผลต่อการนำกระแสไฟฟ้าของซิลิคอน โดยที่การเติมอะตอมสารเจือปนแพลตทินัมนั้นอะตอมของแพลตทินัมจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอะตอมของซิลิคอน ซึ่งผลจากการแพร่แพลตทินัมนี้ทำให้โครงสร้างของซิลิคอนเปลี่ยนไป เนื่องจากแพลตทินัมมีคุณสมบัติทำให้อายุของพาหะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีคุณสมบัติเป็นอะตอมสารเจือระดับลึกในแถบพลังงานซึ่งจะทำให้เกิดระดับพลังงานระดับลึกขึ้น ซึ่งระดับพลังงานดังกล่าวจะประพุดิตัวเป็นศูนย์กลางการดักจับหรือการรวมตัวใหม่ ทำให้อายุการเกิดและอายุการรวมตัวของพาหะเปลี่ยนแปลงไป [7] ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้แพลตทินัมจึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเร็วในการสวิตช์ และช่วยลดปริมาณกระแสรั่วไหลได้อีกด้วย ดังนั้นจึงมีความสนใจในการศึกษาผลของแพลตทินัมที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอน

การศึกษาเกี่ยวกับการแพร่อะตอมสารเจือปนแพลตทินัมนี้มีมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975 ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเติมอะตอมสารเจือปนแพลตทินัมลงในไดโอด พบว่าเนื่องจากแพลตทินัมมีคุณสมบัติในการควบคุมอายุการเกิดและการรวมตัวของพาหะจึงทำให้กระแสรั่วของแพลตทินัมนี้มีค่าต่ำกว่าทองคำถึง 2 เท่า [8]

ปี ค.ศ. 1976 ได้มีการศึกษาผลของอะตอมสารเจือปนแพลตทินัมและทองคำในไบโพลาร์ พบว่าที่อุณหภูมิสูงแพลตทินัมจะส่งผลให้อุปกรณ์มีกระแสรั่วน้อยกว่าเมื่อเทียบกับทองคำ และแพลตทินัมยังมีคุณสมบัติการสวิตช์ดีกว่าทองคำในช่วงการฉีดพาหะส่วนมากอีกด้วย [9, 10]

ปี ค.ศ. 1977 ได้มีการศึกษาผลของอะตอมสารเจือปนแพลตทินัมเปรียบเทียบกับทองคำ และการฉายรังสีอิเล็กตรอน พบว่าผลของอะตอมสารเจือปนแพลตทินัมนั้นทำให้มีกระแสรั่วไหลต่ำที่สุดเนื่องจากมีค่า capture cross-section สูงที่สุด [11]

ปี ค.ศ. 2007 พบว่าการควบคุมอายุของพาหะนั้นมีความสัมพันธ์กับค่า แรงดันตกคร่อม, กระแสรั่วไหล และเวลาในการสวิตช์ของอุปกรณ์ประเภทไบโพลาร์ [12]

ปี ค.ศ. 2012 ได้มีการศึกษาผลของแพลตทินัมที่มีต่อ PIN ไดโอด โดยการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 850 °C และ 900 °C พบว่ากระแสไบอัสตรงมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าไม่แตกต่างกันมากทั้ง 2 อุณหภูมิ นอกจากนี้ยัง ได้มีการศึกษาผลของแพลตทินัมที่มีต่อซิลิคอนไดโอด โดยทำการสร้างซิลิคอนไดโอดบนแผ่นซิลิคอนชนิด NTD ซึ่งพบว่าแพลตทินัมนั้นส่งผลทำให้กระแสรั่วลดลงได้ [13]

เนื่องจากแพลตทินัมมีคุณสมบัติทำให้อายุของพาหะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีคุณสมบัติเป็นอะตอมสารเจือระดับลึกในแถบพลังงานทำให้เกิดระดับพลังงานระดับลึก ซึ่งระดับพลังงานดังกล่าวจะประพุดิตัวเป็นศูนย์กลางการดักจับหรือการรวมตัวใหม่ ทำให้อายุการเกิดและอายุการรวมตัวของพาหะเปลี่ยนแปลง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้แพลตทินัมจึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเร็วในการสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และลดกระแสรั่ว ดังนั้นจึงมีความสนใจในการศึกษาผลของแพลตทินัมที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีกกีโดโอด

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการออกแบบและขั้นตอนกระบวนการสร้างซีกกีโดโอดที่มีโครงสร้าง Al/n-Si โดยจะทำการหาเงื่อนไขในการสร้างที่เหมาะสม จากนั้นจะทำการศึกษาผลกระทบของการแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมที่มีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีกกีโดโอด โดยทำการเคลือบชั้นแพลตทินัม และทำการแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 30 นาที [14] จากนั้นทำการออกแบบและสร้างซีกกีโดโอด และศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานต่าง ๆ ของซีกกีโดโอด ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้านี้ระหว่างซีกกีโดโอดที่ไม่ถูกแพร่และถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความมุ่งหมายในการศึกษาขั้นตอนกระบวนการสร้างและลักษณะคุณสมบัติพื้นฐานของซีกกีโดโอด ที่ถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอน (silicon) ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมโดยมีวัตถุประสงค์ตามลำดับขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1.) เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆของซีกกีโดโอดรอยสัมผัส Al/n-Si เนื่องจากซีกกีโดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นด้วยวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก และประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายประเภท
- 2.) เพื่อศึกษาเทคนิคการออกแบบและการสร้างซีกกีโดโอดที่มีโครงสร้าง Al/n-Si ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม
- 3.) เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้าโลหะที่ใช้ในการสร้างซีกกีโดโอด
- 4.) เพื่อศึกษาและทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐาน อันได้แก่ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน แรงดันภายใน (V_{bi}) แรงดันพังทลาย, กำแพงศักย์ซีกกีโด (ϕ_{bn}), ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) และ ความหนาแน่นของพาหะ (N_D) ตามลำดับ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องจากแพลตทินัมเป็นอะตอมสารเจือระดับลึกซึ่งก่อให้เกิดระดับพลังงานระดับลึกขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของระดับพลังงานระดับลึกนี้จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการดักจับ (trap center) หรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) จากคุณสมบัตินี้ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะเติมอะตอม

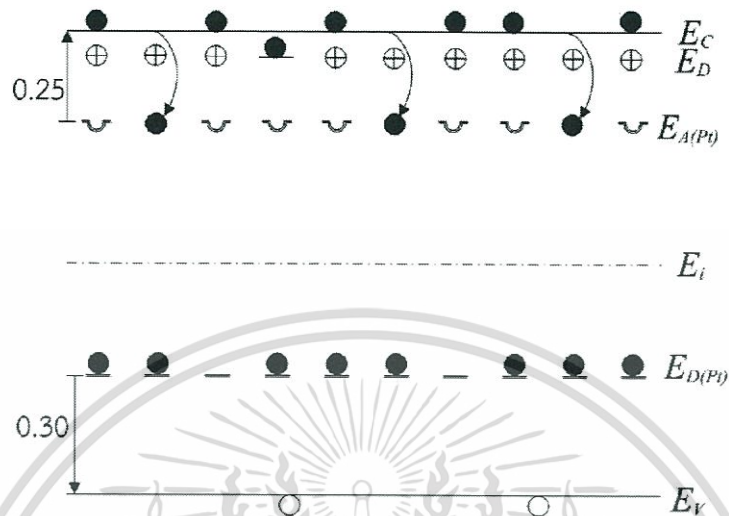
สารเจือปนที่ซึมเข้าไปในฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งคุณสมบัติของอะตอมเจือปนนั้นจะเข้าไปทำให้เกิดพลังงานระดับลึกขึ้น 2 ระดับ คือระดับพลังงานผู้รับแบบลึก (deep level) โดยระดับพลังงานผู้รับแบบลึก (acceptor level) ซึ่งจะอยู่ต่ำกว่าแถบความนำไฟฟ้า 0.25 eV และอีกระดับพลังงานที่เกิดขึ้นคือระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก (donor level) ซึ่งอยู่สูงกว่าแถบวาเลนซ์ 0.30 eV โดยการเติมอะตอมสารเจือปนที่ซึมเข้าไปในซิลิคอนนี้ จะทำให้เกิดผลกระทบทางไฟฟ้ากับซิลิคอนคือ มีคุณสมบัติทำให้อายุของพาหะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีคุณสมบัติเป็นอะตอมสารเจือปนระดับลึกในแถบพลังงานทำให้เกิดระดับพลังงานระดับลึก ทำให้อายุการเกิดและอายุการรวมตัวของพาหะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังทำให้สภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าสูงขึ้นด้วย และจากคุณสมบัติของอะตอมสารเจือปนที่ซึมเข้าไปทำให้อายุของพาหะมีค่าลดลงนี้ ผู้วิจัยมีความคาดหวังว่าจะสามารถช่วยลดช่วงอายุพาหะของซีดีไอโอตลงได้ ซึ่งจะช่วยให้กระแสรั่วมีค่าลดลง

1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

รอยสัมผัสเรกติไฟร์ (rectify contact) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ กลไกกระแสในรอยสัมผัสซีดีไอโอตจะแตกต่างจากไดโอดรอยสัมผัสพีเอ็น คือ กระแสซีดีไอโอตเป็น กระแสการไหลของพาหะส่วนมาก (majority carrier) อุปกรณ์พาหะส่วนมาก นั่นคือไม่มีความจุไฟฟ้าการแพร่ จึงทำให้ซีดีไอโอตทำงานที่ความถี่สูงกว่าไดโอดรอยต่อพีเอ็น ดังนั้นเมื่อการสวิตช์ของซีดีไอโอตจากไบอัสไปข้างหน้าไปเป็นไบอัสย้อนกลับจะไม่มีประจุพาหะส่วนน้อยที่สะสมที่ต้องทำให้เคลื่อนที่ออกไป เหมือนกับกรณีไดโอดรอยต่อพีเอ็น เพราะไม่มีช่วงเวลาสะสมพาหะส่วนน้อย ดังนั้นซีดีไอโอตสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานในการสวิตช์ที่รวดเร็วกว่า นอกจากนี้แรงดันนำกระแสที่แท้จริง (effective turn-on voltage) ของซีดีไอโอตจะน้อยกว่าไดโอดพีเอ็น จากคุณสมบัติทั้งสองประการนี้ทำให้ซีดีไอโอตมีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์มากมาย

ในการปรับปรุงคุณสมบัติของซีดีไอโอตนั้นได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการแพร่อะตอมสารเจือปน โดยการปรับค่าของอายุพาหะส่วนน้อย (minority carrier lifetime) ซีดีไอโอตโดยการเติมอะตอมสารเจือปนระดับลึกเข้าไปในฐานรองซิลิคอน โดยซิลิคอนเมื่อถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนที่ซึมเข้าไปจะทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นมา 2 ระดับ ซึ่งได้แก่ ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก (deep acceptor level) และระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก (deep donor level) ในซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนที่ซึมเข้าไป จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำไฟฟ้าตกลงมาในระดับพลังงานผู้รับแบบลึก ซึ่งอยู่ห่างจากแถบความนำไฟฟ้าลงมาประมาณ 0.25 eV ดังรูปที่ 1.1 หรือกล่าวอีกในหนึ่งก็คือ อิเล็กตรอนในแถบความนำจะถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้รับแบบลึก คือเกิด

ปรากฏการณ์ชดเชย ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบความนำลดลง ค่าสภาพต้านทานจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำและลักษณะสมบัติของซีดทีจีไดโอดเปลี่ยนแปลงด้วย



รูปที่ 1.1 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแปรด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมในซิลิคอนชนิดเอ็นซึ่งอะตอมสารเจือปนมากกว่าอะตอมสารเจือปนพลตทินัม

1.5 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยสามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ ในการศึกษาลักษณะสมบัติของซิลิคอนซีดทีจีไดโอดที่ถูกโด๊ปด้วยพลตทินัม จึงได้มีการวางขอบเขตของการวิจัยไว้ดังนี้

ทำการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับซีดทีจีไดโอด และอะตอมสารเจือปนพลตทินัม จากนั้นทำการออกแบบลักษณะของซีดทีจีไดโอดให้มีเงื่อนไขตามที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของขั้วไฟฟ้าโลหะ โดยมีขนาด 100, 400, 900, 3600 และ 14400 μm^2 และในส่วนของรูปร่างขั้วไฟฟ้าโลหะนั้นจะมี 3 ลักษณะ คือ สี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน และ วงกลม จากนั้นจะทำการศึกษาลักษณะของอะตอมสารเจือปนพลตทินัม โดยทำการสร้างซีดทีจีไดโอดที่ถูกแปรด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมที่อุณหภูมิ 850 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที

เมื่อสร้างซีดทีจีไดโอดเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะทำการทำการศึกษาลักษณะสมบัติของสารเจือปนพลตทินัมที่มีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีดทีจีไดโอด ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้านี้ระหว่างซีดทีจีไดโอดที่ไม่ถูกแปรสารเจือปนและถูกแปรสารเจือปนด้วยพลตทินัม ซึ่งไดโอดนี้จะถูกสร้างขึ้นที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) หลังจากนั้นจะทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐาน ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน, กระแสรั่วไหล (I_{leak}), แรงดันพังทลาย, แรงดันภายใน (V_{bi}), กำแพงศักย์ข้อตักย (ϕ_{bn}), ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) และความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_D) ตามลำดับ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทํางานของข้อตักยไดโอด
2. ศึกษาผลของอะตอมสารเจือแพลตทินัม
2. ศึกษาขั้นตอนกระบวนการสร้างข้อตักยไดโอดและการแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม
3. ทําการทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของข้อตักยไดโอด
4. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของลักษณะต่างๆของขั้วไฟฟ้า จากนั้นทําการเปรียบเทียบระหว่างแผ่นที่ถูกแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมกับแผ่นที่ไม่ได้แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับข้อตักยไดโอด
2. ความรู้เกี่ยวกับผลของอะตอมสารเจือแพลตทินัมในข้อตักยไดโอด
3. ความรู้เกี่ยวกับการสร้างข้อตักยโครงสร้าง Al/n-Si
4. ความรู้เกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของข้อตักยไดโอด
5. ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลกระทบของอะตอมสารเจือต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของข้อตักยไดโอด

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับข้อตักยไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของข้อตักยไดโอด หัวข้อถัดมาคือ วัตถุประสงค์ที่ได้ทำการศึกษาข้อตักยไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si สมมติฐานและแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย และส่วนสุดท้าย คือ ขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 ทฤษฎี เป็นการกล่าวถึงรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสข้อตักย ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสข้อตักย ทฤษฎีเกี่ยวกับจุดบกพร่องลักษณะต่างๆ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแพลตทินัม (Platinum) คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม ระดับพลังงานของแพลตทินัมในซิลิคอน สภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม การรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอน-โฮล และการควบคุมช่วงอายุพาหะของแพลตทินัม

บทที่ 3 กระบวนการสร้างซ็อกเก็ตยึไดโอด โครงสร้าง AVn-Si ในส่วนนี้ได้กล่าวถึงเทคนิคและขั้นตอนการสร้างในแต่ละขั้นตอน ได้แก่ การออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดและลวดลายขั้วที่แตกต่างกันบนกระจกต้นแบบ เทคนิคการสร้างชั้นออกไซด์ เทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือด้วยกระบวนการไอออนอิมแพลนเทชัน เทคนิคการสร้างลวดลายขั้วด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เทคนิคการสร้างชั้นโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง รวมไปถึงเทคนิคที่ช่วยปรับปรุงรอยสัมผัสด้วยกระบวนการซินเตอร์ริง จนกระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการสร้าง จากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าตามเงื่อนไขที่ต้องการต่อไป

บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยกล่าวถึงผลของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐาน อันได้แก่ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน, กระแสรั่วไหล (I_{leak}), แรงดันพังทลาย, แรงดันภายใน (V_{bi}), กำแพงศักย์ซ็อกเก็ต (ϕ_{bn}), ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) และความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_D) นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของลักษณะของขั้วไฟฟ้าและขนาดของขั้วไฟฟ้า ที่มีต่อลักษณะสมบัติของซ็อกเก็ตยึไดโอด ตามลำดับ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะที่เกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ (metal-semiconductor contact) สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ชนิด คือ รอยสัมผัส肖ตกี หรือเรคทิไฟร์ และรอยสัมผัสโอห์มิก ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างตัวอุปกรณ์ภายในกับอุปกรณ์ภายนอกต่างๆ ซึ่งจะต้องมีความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมากๆ โดยรอยสัมผัสจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของโลหะ (work function: ϕ_m), ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity: χ) ของสารกึ่งตัวนำที่มาสวมเป็นรอยสัมผัส เนื่องจากเป้าหมายของวิทยานิพนธ์นี้ต้องการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของ肖ตกีไดโอด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงจะขอก้าวเฉพาะรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสแบบเรคทิไฟร์

2.1.1 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุดมคติก่อนสัมผัส

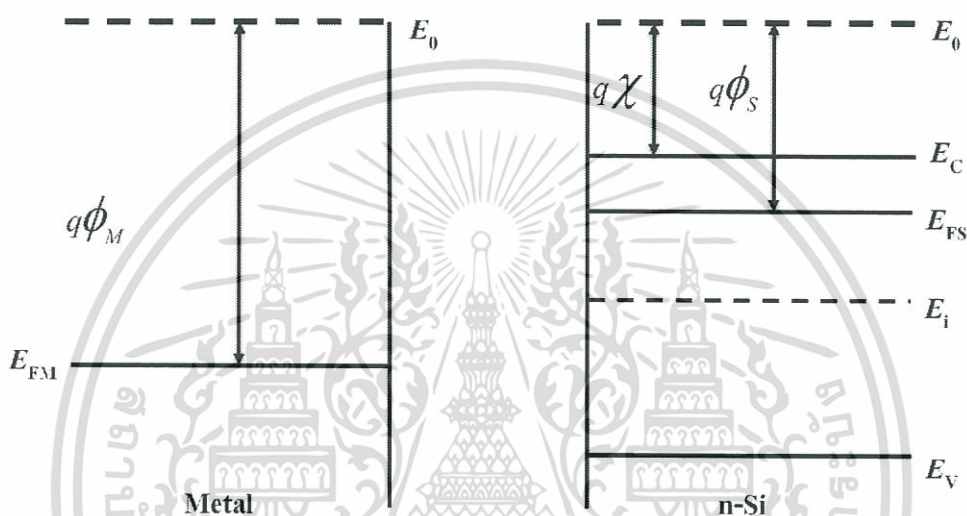
แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดการสัมผัสแสดงได้ในรูปที่ 2.1 ระดับสุญญากาศ (Vacuum level: E_0) คือระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน และนิยามได้ว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็ง และหยุดนิ่งที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ ดังนั้นระดับพลังงาน E_0 จะมีค่าเท่ากับ 0 eV ในส่วนของโลหะระดับเฟอร์มิของโลหะ (Fermi level: E_{FM}) หรือค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่อยู่ภายในโลหะนั้น จะอยู่สูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_c) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงาน มีหน่วยวัดเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ เขียนแทนด้วย ϕ_m ซึ่งหมายถึงพลังงานค่าน้อยที่สุดที่อิเล็กตรอนในโลหะต้องการเพื่อให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะนั้นๆ และเป็นอิสระโดยสมบูรณ์ ซึ่งมีค่าดังสมการที่ 2.1 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น แพลตทินัม มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 4.5 eV สำหรับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิจะอยู่ในช่องว่างพลังงานโดยอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (E_i) และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานสุญญากาศและระดับเฟอร์มิ มีค่าดังสมการที่ 2.2 ในสารกึ่งตัวนำความแตกต่างของพลังงานระดับสุญญากาศกับระดับนำไฟฟ้าถูกเรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี และถูกนิยามว่าเป็นค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนจากระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าต้องการเพื่อที่จะเคลื่อนที่ออกไปหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวภายนอกของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอนมีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้เท่ากับ 4.01 eV [15]

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \quad (2.1)$$

$$q\phi_S = E_0 - E_{FS} \quad (2.2)$$



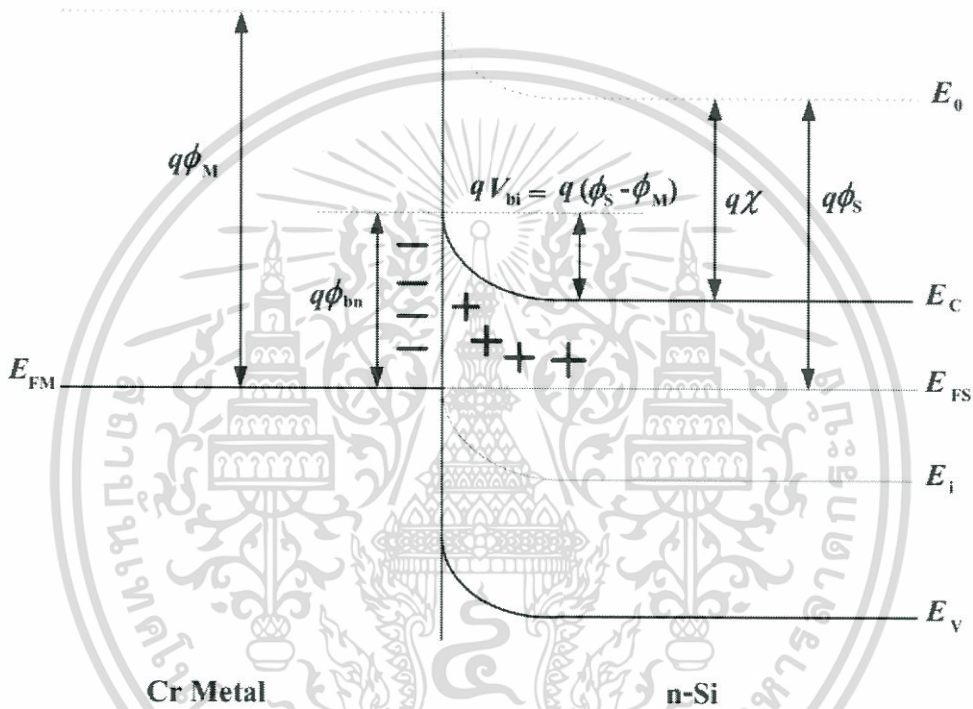
รูปที่ 2.1 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อถัก

2.1.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

การเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อถักระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_M > q\phi_S$) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงเกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D^+) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในสภาวะสมดุลดังรูปที่ 2.2 ในสภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (potential barrier: qV_{bi}) ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เกิดเคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.3 ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำเรียกว่า กำแพงศักย์ช็อตกีย์ มีค่าดังสมการที่ 2.4 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกันจะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อตกีย์ต่างๆกัน



รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \tag{2.3}$$

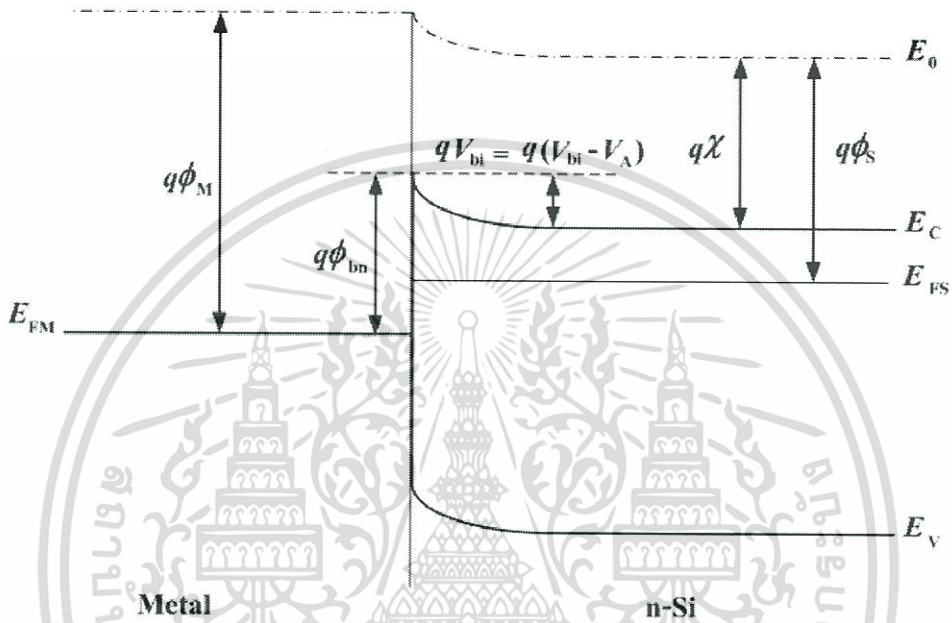
$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \tag{2.4}$$

2.1.2.1 กรณีไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มี อิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อคติย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มี กระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำ ไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงช็อคติย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจาก สารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล



รูปที่ 2.3 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการที่ 2.5

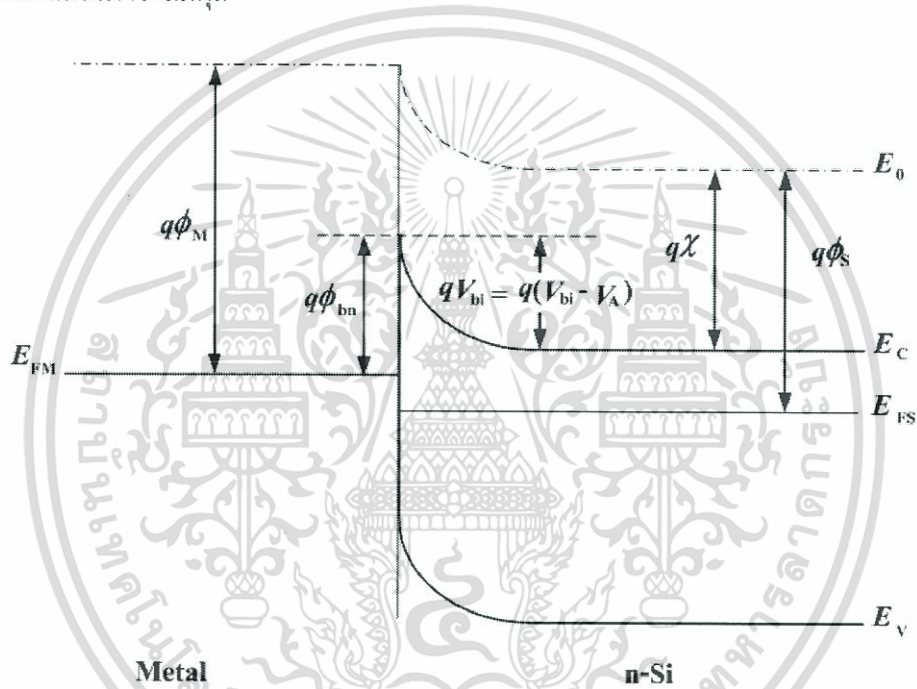
$$I_F = ART^2 e^{\frac{q\phi_{bn}}{kT}} \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \tag{2.5}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 กรณีไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ข้อต่อเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล



รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่าดังสมการที่ 2.6

$$I_R = ART^2 e^{-\frac{q\phi_{bn}}{kT}} \quad (2.6)$$

- โดยที่
- A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
 - R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน n-Si มีค่าประมาณ $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$
 - T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 - q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคติจี้
- k คือ ค่าคงที่โบสท์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/K

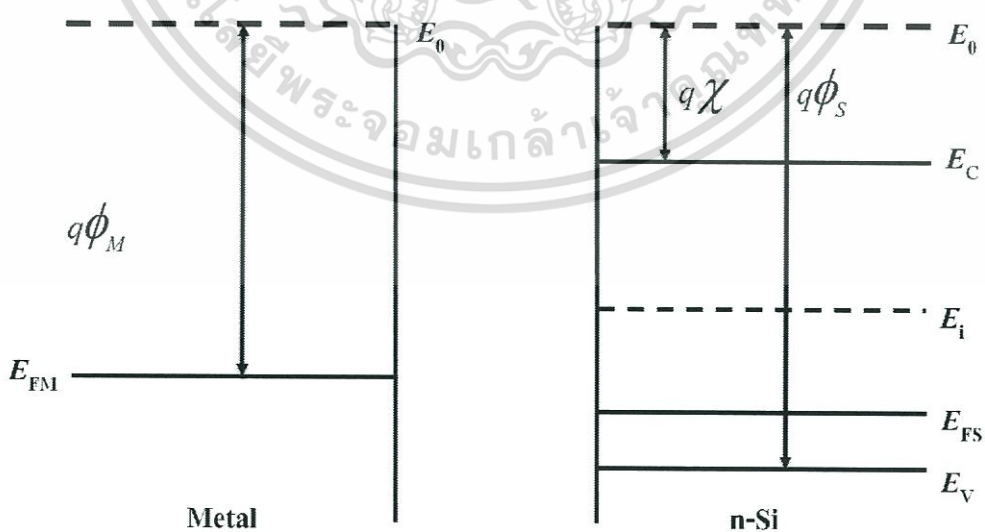
ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion width: W_d) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ 2.7 โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \tag{2.7}$$

- โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
- q คือ ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
- N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
- V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
- V_A คือ แรงดันไบอัส

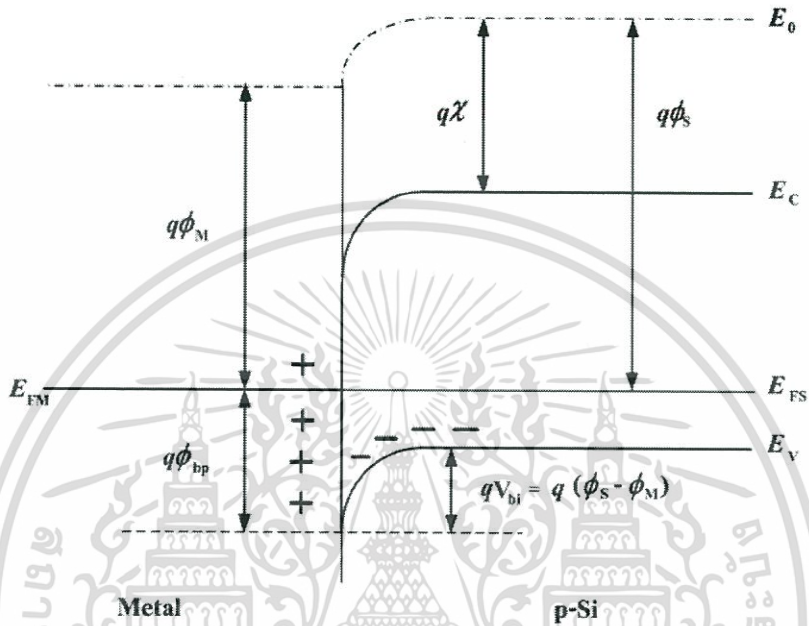
2.1.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี

การเกิดรอยสัมผัสช็อคติจี้ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_M < q\phi_s$) ในสถานะก่อนสัมผัสหรือเริ่มสัมผัส ลักษณะของแถบพลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อคติจี้

โดยระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นเมื่อนำสารทั้งสองมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากด้านโลหะจะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทิ้งให้เกิดประจุบวกที่ด้านโลหะบริเวณรอยสัมผัส จนกระทั่งถึงภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองอยู่ที่ระดับเดียวกันดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสข้อต่อกัน

กระแสสุทธิของรอยสัมผัสเป็นศูนย์ ขณะที่อิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่เข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเกิดการรวมตัวใหม่ (Recombination) ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่บริเวณผิวสัมผัส ทำให้โฮลในบริเวณนี้มีความหนาแน่นลดลง การลดลงของโฮลจะทำให้เกิดไอออนลบของอะตอมผู้รับ (N_A^-) ในด้านสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งความกว้างของของบริเวณปลอดพาหะจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับในสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากประจุไฟฟ้าบวกในโลหะ และประจุไฟฟ้าลบในสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัส ทำให้มีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ โดยมีทิศทางจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นทิศที่ต่อต้านการเคลื่อนที่โฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำ ไม่ให้เคลื่อนที่ไปยังด้านโลหะ หรือก็คือมีกำแพงศักย์ของโฮลเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส กำแพงศักย์นี้มีค่าเท่ากับ qV_{bi} ซึ่งหาได้จากการโค้งลงของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

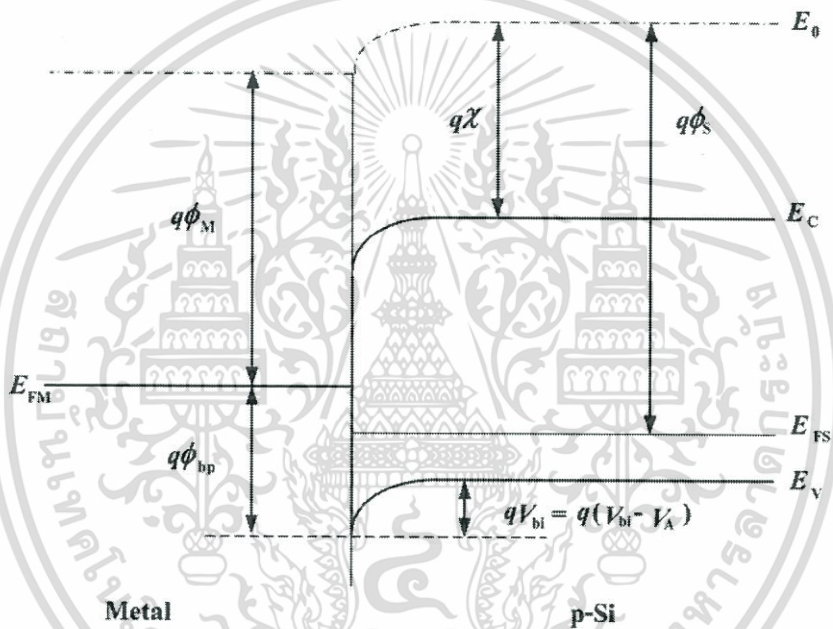
$$qV_{bi} = q(\phi_s - \phi_M) \tag{2.8}$$

$$q\phi_{bp} = E_g + q\chi - q\phi_M \tag{2.9}$$

นอกจากนี้จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่ามีการแกว่งตัวของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีความสูงเท่ากับ $q\phi_{bp}$ จะมีดังสมการที่ 2.9

2.1.3.1 กรณีไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัสแก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในรอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ และทำให้ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ทำให้โฮลสามารถเคลื่อนที่จากด้านสารกึ่งตัวนำเข้าไปยังด้านโลหะ ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านรอยสัมผัส โดยกระแสจะไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปทางด้านโลหะ โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการที่ 2.10

$$I_F = ART^2 e^{-\frac{q\phi_{bp}}{kT}} \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \tag{2.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	A	คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
	R	คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่าประมาณ $32 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (p-Si)
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602\times 10^{-19} \text{ C}$
	ϕ_{bp}	คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคตีกีย์
	k	คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617\times 10^{-5} \text{ eV/K}$
	V_A	คือ แรงดันไบอัส

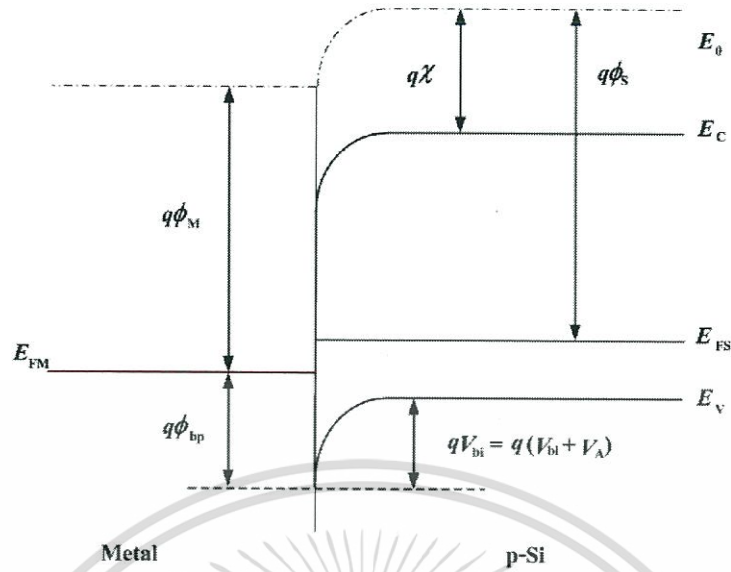
2.1.3.2 กรณีไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับด้านโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ภายในรอยสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ ทำให้ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ซึ่งโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ แต่กำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง จึงมีกระแสจำนวนน้อยไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอน(พาหะข้างน้อย) จากชั้นแถบนำของสารกึ่งตัวนำชนิดพีไหลเข้าไปในโลหะพิจารณาว่าเป็นกรณีโฮลข้าม $q\phi_{bp}$ ในโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ แต่เป็นกระแสที่มีค่าน้อยมาก ซึ่งก็คือกระแสรั่วไหลของรอยต่อหรือกระแสมีดจึงพิจารณาว่าเป็นการให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัส ดังนั้นจะเห็นว่าคุณสมบัติของรอยสัมผัสนี้เป็นแบบเรกติไฟร์ โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่าดังสมการที่ 2.11

$$I_R = ART^2 e^{-\frac{q\phi_{bp}}{kT}} \quad (2.11)$$

โดยที่	A	คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
	R	คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่าประมาณ $32 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (p-Si)
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602\times 10^{-19} \text{ C}$
	ϕ_{bp}	คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคตีกีย์
	k	คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617\times 10^{-5} \text{ eV/K}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width: W_d) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆดังสมการที่ 2.12 โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_A}} \tag{2.12}$$

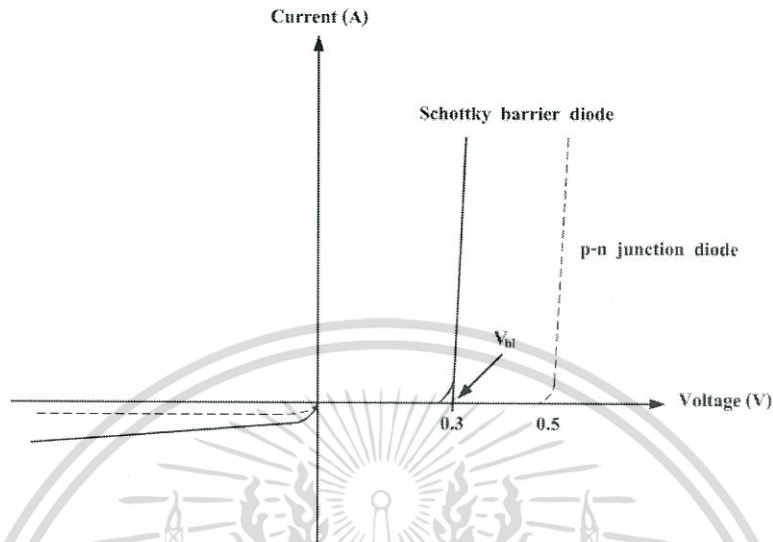
- โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
- q คือ ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
- N_A คือ อะตอมสารเจือผู้รับใน p-Si
- V_{bi} คือ กัมพวงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
- V_A คือ แรงดันไบอัส

2.1.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดซีตทิย

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับรอยต่อ พี-เอ็น คือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวคือเมื่อได้รับการให้ไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลผ่านน้อยมาก กราฟกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสนี้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสชนิดซีตทิยมีค่าต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น โดยมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ส่วนรอยต่อ พี-เอ็น จะมีค่าประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.5-0.7 V แต่กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคกีมีค่าสูงกว่ารอยต่อ พี-เอ็น เป็นผลมาจากผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยจะมีค่ากระแสรั่วไหลมากกว่ารอยต่อ พี-เอ็น ประมาณ 10^4 เท่า



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดัน ของรอนสัมผัสช็อคกีไดโอดแบบรอยต่อ พี - เอ็น

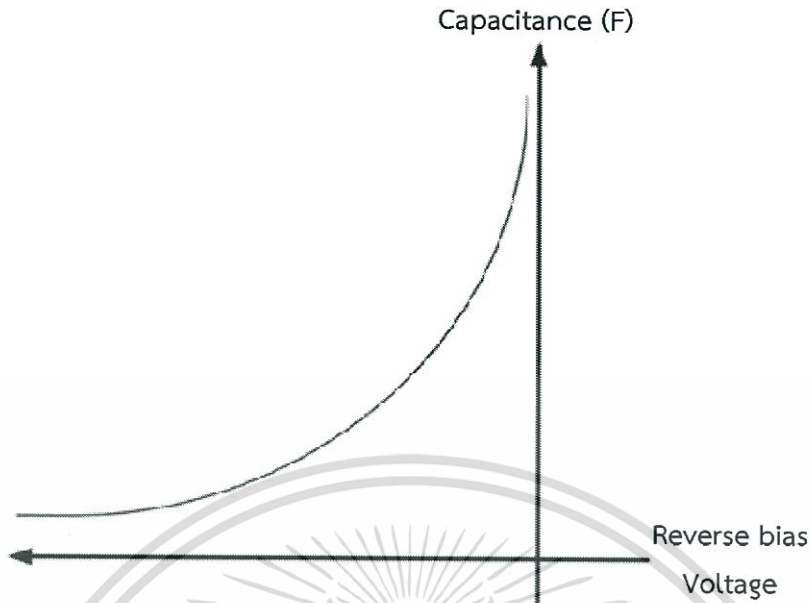
2.1.5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกี

ค่าความจุไฟฟ้า (C) ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่แสดงในรูปที่ 2.10 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส เห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ และมีค่าเป็นไปตามสมการที่ 2.13

$$C = \frac{\epsilon_s A}{W} = \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (2.13)$$

โดยที่	N_D	คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})
	W	คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (cm)
	A	คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
	ϵ_s	คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
	q	คือ ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
	V_{bi}	คือค่าแรงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
	V_A	คือ แรงดันไบอัส

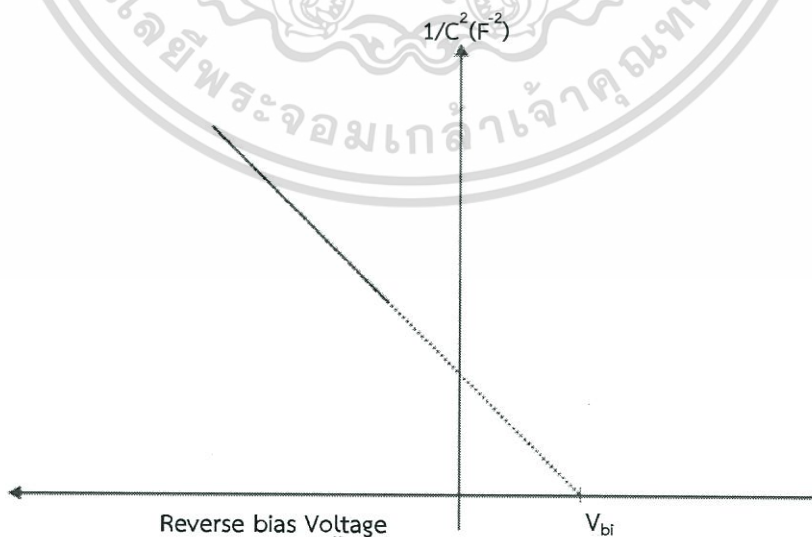
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของรอยสัมผัสขั้วต่อทิกกี

จากกราฟในรูปที่ 2.10 เมื่อนำไปเขียนใหม่ให้อยู่ในเทอมของ $1/C^2$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ของสมการที่ 2.13 จะเปลี่ยนเป็นสมการที่ 2.14

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{q\epsilon_s N_D} \tag{2.14}$$



รูปที่ 2.11 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดันของรอยสัมผัสขั้วต่อทิกกีในเทอมของ $1/C^2$

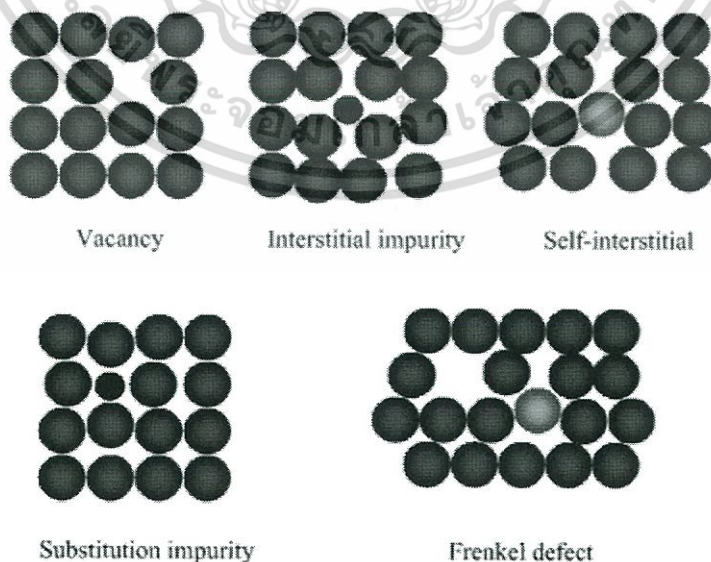
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งลักษณะของกราฟที่ได้จะเป็นกราฟเส้นตรงทำให้ง่ายในการวิเคราะห์หาตัวแปร ดังเช่นจากกราฟจะได้ค่าความชันมีค่าเท่ากับ $2/q\mathcal{E}_s N_D$ ทำให้สามารถหาความเข้มข้นอะตอมของสารกึ่งตัวนำเริ่มต้นได้และที่จุดตัดแกน x ของกราฟจะทราบค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อคตีกี้ จากความสัมพันธ์ของกราฟในรูปที่ 2.11 [16, 17]

2.2 จุดบกพร่อง

จุดบกพร่องนั้นมีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จุดบกพร่องนี้อาจเป็นอะตอมแปลกปลอมหรือสิ่งปนเปื้อน (Contamination) ที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้ตั้งใจ เช่น เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสร้างแผ่นผลึกและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ หรือเกิดจากความตั้งใจเพื่อปรับปรุงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ให้เป็นไปตามต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปใช้ โดยจุดบกพร่องนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆตามลักษณะของจุดบกพร่อง คือ ความบกพร่องในลักษณะจุด (point defects) และ ความบกพร่องในลักษณะแนวเส้น (line defect) ความบกพร่องในลักษณะจุดนั้นเกิดจากการที่อะตอมบางตัวอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ถูกต้อง โดยแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆดังนี้ โดยรูปที่ 2.12 แสดงภาพความบกพร่องในลักษณะจุดชนิดต่างๆ

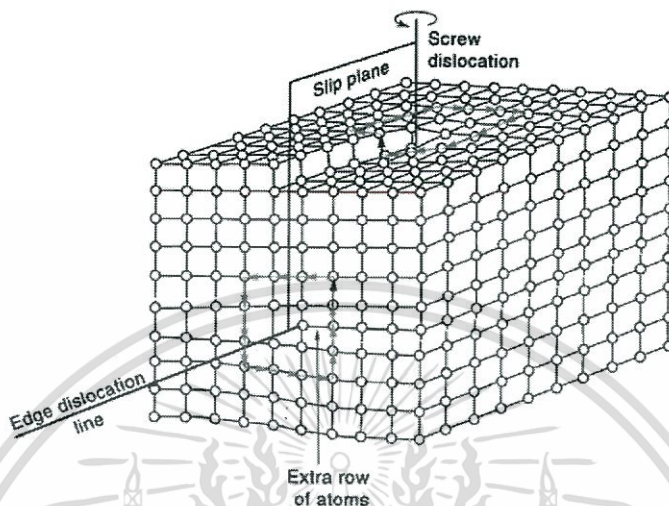
- Vacancy เกิดจากมีอะตอมหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมี จึงเกิดเป็นที่ว่างขึ้น
- Interstitial เกิดจากอะตอมชนิดอื่นเข้าไปแทนที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่าง
- Substitutional เกิดจากอะตอมชนิดอื่นเข้าไปแทนที่อะตอมชนิดเดิม
- Frenkel defect pair เกิดจากความบกพร่องแบบ Vacancy และ Interstitial รวมกัน



รูปที่ 2.12 ความบกพร่องลักษณะจุดชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความบกพร่องในลักษณะแนวเส้นเป็นความบกพร่องที่เกิดจากอนุภาคของโครงสร้างผลึกที่จุดต่างๆ ที่อยู่ในแถวเดียวกันไม่อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง โดยแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆดังนี้ รูปที่ 2.13 แสดงความบกพร่องในลักษณะแนวเส้นชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.13 ความบกพร่องในลักษณะแนวเส้นชนิดต่างๆ

- Edge Dislocation เกิดจากเมื่ออนุภาคแถวใดแถวหนึ่งหายไป หรือแทรกเข้ามาอยู่อย่างผิดปกติ
- Screw Dislocation เกิดจากส่วนใดส่วนหนึ่งมีลักษณะเหมือนถูกเหวี่ยงแล้วดันส่วนหนึ่งให้เลื่อนขึ้นข้างบน

เมื่อเราพิจารณาถึงระดับพลังงานที่เกิดจากจุดบกพร่องต่างๆนี้ เราสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับพลังงานระดับตื้น (shallow level) และ ระดับพลังงานระดับลึก (deep level)

ระดับพลังงานระดับตื้นเกิดจากอะตอมสารเจือปนทำให้เกิดระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งใกล้เคียงแถบนำไฟฟ้า และแถบวาเลนซ์ เช่น อะตอมของ โบรอน ฟอสฟอรัส เป็นต้น

ระดับพลังงานระดับลึกนั้นจะปรากฏใกล้ๆกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน โดยมักจะเกิดจากอะตอมโลหะเจือปนในสารกึ่งตัวนำ เช่น เหล็ก, ทอง, แพลตทินัม เป็นต้น โดยระดับพลังงานระดับลึกจะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับแรงดันไบอัส และระดับพลังงานระดับลึกนี้จะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการเกิดพาหะ (generation center) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ การรวมตัวและการเกิดของพาหะที่เกิดขึ้นในเนื้อสารกึ่งตัวนำ จะถูกพิจารณาด้วยอายุการรวมตัวของพาหะ (recombination lifetime) และอายุการเกิดของพาหะ (generation lifetime) [18, 19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณสมบัติแพลตตินัม (Platinum)

ในปัจจุบันอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งได้มีการพัฒนาให้มีการตอบสนองในช่วงความถี่ที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของอุปกรณ์โดยการเติมแพลตตินัมเข้าไปในฐานรองซิลิคอน ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มความสามารถในการตอบสนองความถี่ได้ โดยจะกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆของแพลตตินัมต่อไป

แพลตตินัมเป็นโลหะสีขาวยเงิน มีลักษณะอ่อน สามารถดึงเป็นเส้นได้ดี เป็นโลหะที่หนักมาก โลหะหนึ่ง มีความหนาแน่น 21.45 g/cc ที่อุณหภูมิ 20°C แพลตตินัมเป็นหนึ่งในจำนวน 6 ธาตุในหมู่ VIII ของตารางธาตุ ซึ่งธาตุทั้งหมดนี้มีสมบัติคล้ายคลึงกันมาก และนิยมเรียกว่าธาตุตระกูลแพลตตินัม หรือธาตุหมู่แพลตตินัมเพราะแพลตตินัมเป็นธาตุที่รู้จักกันดีที่สุดในบรรดาธาตุทั้งหมดของหมู่นี้ แพลตตินัมเป็นโลหะที่มีราคาแพงเพราะเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งในหลายๆปฏิกิริยา คุณสมบัติทั่วไปของแพลตตินัมเป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติทั่วไปของแพลตตินัม

เลขอะตอม	78 เป็นธาตุที่ 3 ของคาบที่ 7 ของหมู่ VIII ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน
รัศมีอะตอม	1.385 อังสตรอม
น้ำหนักอะตอม	195.08 amu
จุดหลอมเหลว	1772 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	3827 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	21.45 g/cc
โครงสร้างอิเล็กตรอน	[Xe] 6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ⁹
เลขออกซิเดชัน	+2,+4
ความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนของธาตุ (electronegativity)	2.28
โครงสร้างผลึก	Face centered cubic
ค่าสภาพต้านทาน (resistivity) ที่ 20°C	9.85 μΩ.cm
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว	4.7 kcal/mol
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	135.0 kcal/mol
ความร้อนจำเพาะ	0.03136 cal/g - °C
การนำความร้อน	0.73 watts/cm - °C
ความจุความร้อน	6.18 cal/mol - °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 แหล่งที่พบ

โลหะแพลตตินัมส่วนใหญ่พบในรูปของโลหะเจือของโลหะในตระกูลแพลตตินัมอื่นๆ ซึ่งทั่วไปมีแพลตตินัมเป็นองค์ประกอบหลัก และปะปนอยู่กับสินแร่ของทองแดงและนิกเกิล (ในรูปของซัลไฟด์) นอกจากนี้แล้วยังมีทองคำและเงินปะปนอยู่ด้วย แหล่งที่พบแพลตตินัมที่สำคัญอยู่ในประเทศ แคนาดา แอฟริกาใต้ และสหภาพโซเวียต แพลตตินัมในรูปของสารประกอบเช่นกัน แต่ไม่มากนัก ที่สำคัญได้แก่ PtS_3 , PtS มีการประมาณว่าเปลือกโลกของเรามีแพลตตินัมประมาณ 0.005 ppm

2.3.2 สมบัติทางเคมี

แพลตตินัมค่อนข้างเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่นกับออกซิเจนในอากาศหรือกรดหลายชนิด ซึ่งการใช้ประโยชน์หลายๆอย่างของแพลตตินัม อาศัยสมบัติความเฉื่อยต่อปฏิกิริยานี้เอง ความว่องไวต่อปฏิกิริยาของแพลตตินัมขึ้นกับว่าโลหะนี้อยู่ในรูปเป็นก้อนโตหรือเป็นผงละเอียด ซึ่งในรูปของผงละเอียดจะว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่า และแพลตตินัมเมื่อละลายในโลหะอื่น เช่น ตะกั่วหรือเงิน จะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเช่นกัน ปฏิกิริยาของแพลตตินัมที่สำคัญมีดังนี้ [20]

- ภายใต้สภาวะปกติ กรดอนินทรีย์เพียงชนิดเดียว เช่น กรดไนตริกหรือกรดซัลฟิวริกจะไม่ทำปฏิกิริยาหรือไม่สามารถละลายแพลตตินัม แต่โลหะนี้จะละลายใน aqua regia (กรดผสมของ HNO_3 และ HCl ในอัตราส่วน 1:3) เกิด H_2PtCl_6 เป็นผลิตภัณฑ์
- ฟลูออรีนสามารถทำปฏิกิริยากับแพลตตินัมที่ร้อนเกิด PtF_4 เป็นผลิตภัณฑ์และกับคลอรีน ภายใต้ความร้อนเกิดคลอไรด์หลายชนิด เช่น $PtCl_2$, $PtCl_3$, $PtCl_4$
- อัลคาไลเหลวหรือเกลือของอัลคาไลน์ เช่น โซเดียมไนต์ หรือไนไตรต์สามารถเกิดปฏิกิริยากับแพลตตินัมได้
- ธาตุหลายชนิด เช่น คาร์บอน, ฟอสฟอรัส, ซิลิคอนและอาร์เซนิก สามารถรวมตัวโดยตรงกับแพลตตินัม ณ อุณหภูมิสูง
- ทำนองเดียวกับแพลเลเดียม โลหะแพลตตินัมสามารถดูดกลืนแก๊สไฮโดรเจนได้มากพอสมควร โดยเฉพาะเมื่อให้ความร้อน
- แพลตตินัมสามารถเกิดสารเชิงซ้อนหลายชนิด โดย แพลตตินัมในเชิงซ้อนอาจมีเลขโคออร์ดิเนชัน 4 หรือ 6 ที่เป็น 4 มีรูปร่างคณิตเป็นทรงเหลี่ยมระนาบ และที่เป็น 6 เป็นรูปร่างคณิตทรงเหลี่ยมแปดหน้า ตัวอย่างสารประกอบเชิงซ้อนของแพลตตินัม เช่น H_2PtCl_2 , K_2PtCl_6 เป็นต้น

2.3.3 การใช้ประโยชน์

แพลตทินัมเป็นโลหะในตระกูลแพลตทินัมที่มีปริมาณการใช้มากที่สุด ส่วนใหญ่ใช้ในรูปของโลหะอิสระในรูปของผงละเอียดดังนี้

- ใช้เป็นตัวเร่งสำหรับปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและปฏิกิริยาดึงเอาไฮโดรเจนออกในเคมีอินทรีย์
- ใช้เป็นตัวเร่งสำหรับตัดแปลงโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนในกระบวนการไอโซเมอไรเซชันเพื่อเพิ่มเลขออกเทนของน้ำมันเชื้อเพลิง
- ใช้เป็นตัวเร่งช่วยทำให้แก๊สบริสุทธ์ โดยกระบวนการออกซิเดชันหรือการเติมไฮโดรเจน
- มีการใช้บ้างในกระบวนการคอนแทก เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า
- ในรูปของโลหะเจือกับโรเดียม ใช้เป็นตัวเร่งในกระบวนการออกซิเดชันของแอมโมเนียเป็นไนตริกออกไซด์ เพื่อผลิตกรดไนตริก
- ใช้เป็นตัวเร่งในกระบวนการเตรียมไฮโดรเจนไซยาไนด์จากอากาศ แอมโมเนีย และมีเทน
- แพลตทินัมในรูปของโลหะเจือกับอิริเดียมใช้เป็นเครื่องประดับ อิเล็กโทรด ภาชนะพิเศษในห้องปฏิบัติการ
- แพลตทินัมในรูปของโลหะเจือกับแพลเลเดียมใช้ในการอุดฟัน

2.3.4 คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม

ในปัจจุบันนี้ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งได้มีการพัฒนาให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีการตอบสนองในช่วงความถี่ (frequency response) ที่สูงขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงที่จะสร้างขั้วตักยไดโอด ที่มีความสามารถในการตอบสนองทางความถี่สูงๆ ซึ่งการเติมอะตอมแพลตทินัมเข้าไปในขั้วตักยไดโอดก็เป็นวิธีหนึ่ง ในการเพิ่มความสามารถในการตอบสนองทางความถี่ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมบัติทางฟิสิกส์ของอะตอมแพลตทินัมและสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม

แพลตทินัมเป็นสารเจือระดับลึก (deep impurity) ที่สำคัญในซิลิคอนทั้งนี้เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) สูง ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณของแพลตทินัมในซิลิคอนได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิอะตอมแพลตทินัมจะแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (interstitial) ของซิลิคอนโดยไม่มีพันธะใดๆยึดกับอะตอมซิลิคอน อัตราการแพร่ชนิดนี้จะเร็วกว่าอัตราการแพร่แบบเข้าไปแทนที่ (substitutional diffusion) เมื่ออะตอมแพลตทินัมแพร่เข้าไปในซิลิคอนจะไปควบคุมช่วงอายุและสภาพต้านทาน ทั้งชนิดเอ็นและพี กล่าวคือจะทำให้อายุพาหะของอิเล็กตรอนและ

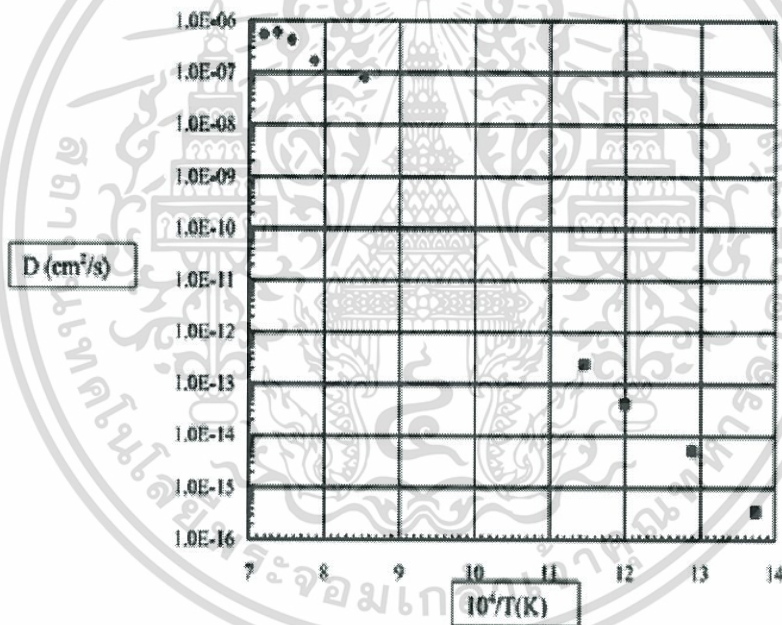
โพลีเมอร์กึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมีค่าลดลงเราจึงเรียกแพลตทินัมว่าเป็น “carrier lifetime killer” และสามารถนำมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์พวกความเร็วสูง เช่น สวิตชิงไดโอด และวงจรรวมดิจิทัลแบบต่างๆได้เป็นอย่างดี

โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแพลตทินัมที่อุณหภูมิต่างๆได้จากรูปที่ 2.14 ซึ่งเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ในรูปของสมการแล้วจะได้ดังสมการที่ 2.15 โดยสามารถแทนค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ลงในสมการ ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ได้ [21-24]

$$D(\text{m}^2/\text{s})=0.00021\exp\left[-1.79(eV)/kT\right] \quad (2.15)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่โบสท์มันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

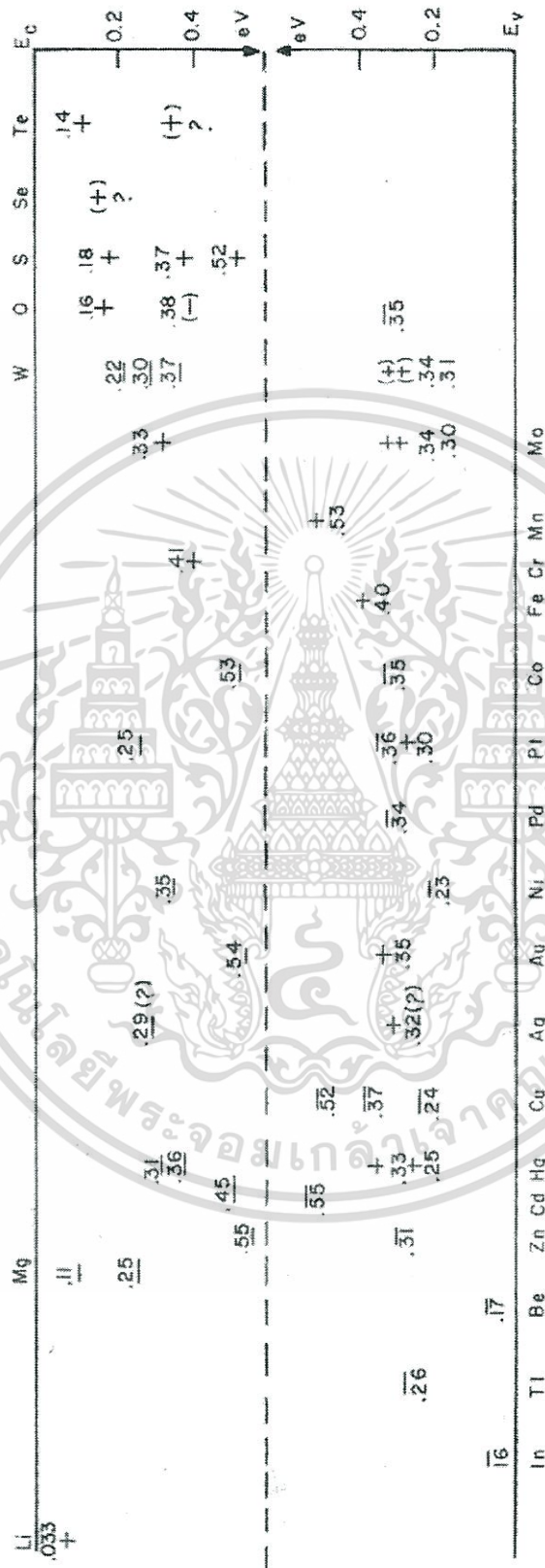


รูปที่ 2.14 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแพลตทินัมในซิลิคอน

2.3.5 ระดับพลังงานของแพลตทินัมในซิลิคอน

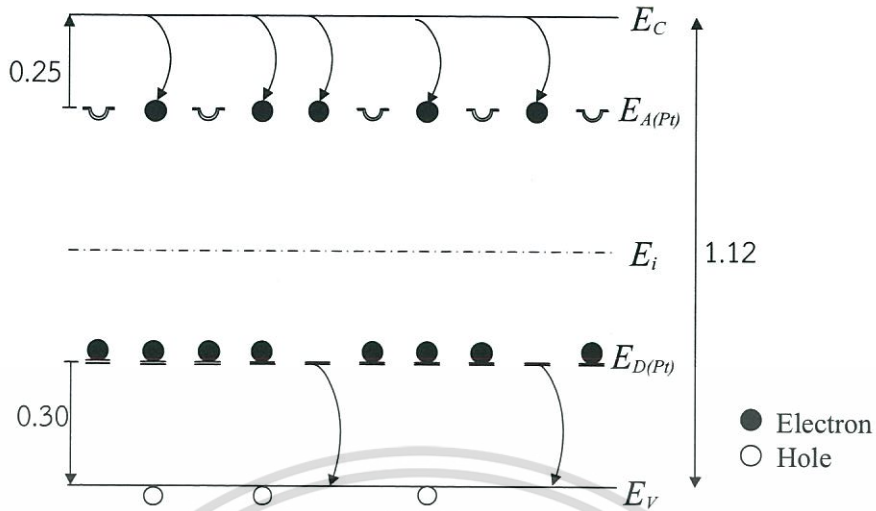
ในซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกเมื่อถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือชนิดต่างๆจะมีระดับพลังงานเกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.15 เมื่อพิจารณาเฉพาะแพลตทินัม ซึ่งแพลตทินัมนั้นจะทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นมา 3 ระดับแต่จะมีระดับพลังงานที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางไฟฟ้าเพียง 2 ระดับ ซึ่งได้แก่ ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก (deep acceptor level) และระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก (deep donor level) ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.16 [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

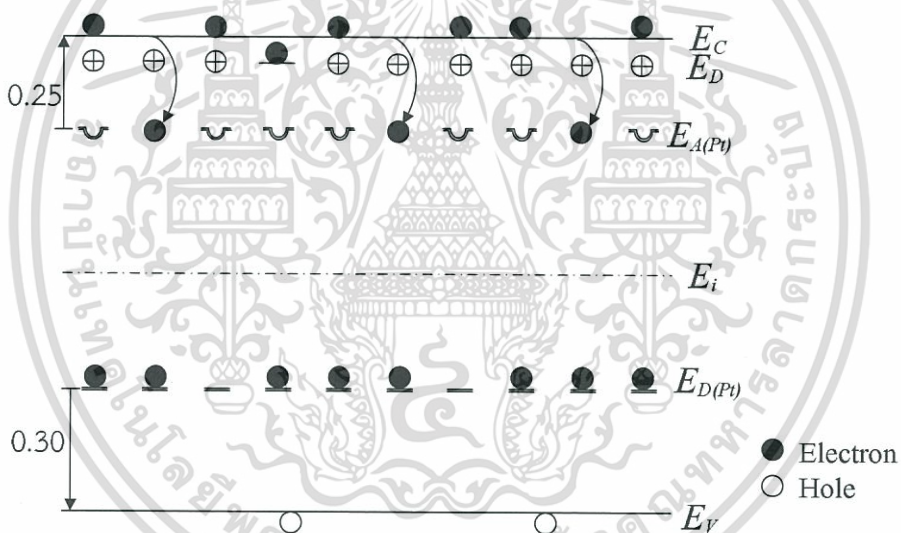


รูปที่ 2.15 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแปรด้วยอะตอมแม่เหล็กที่ไม่มีโมเมนต์สปิน [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



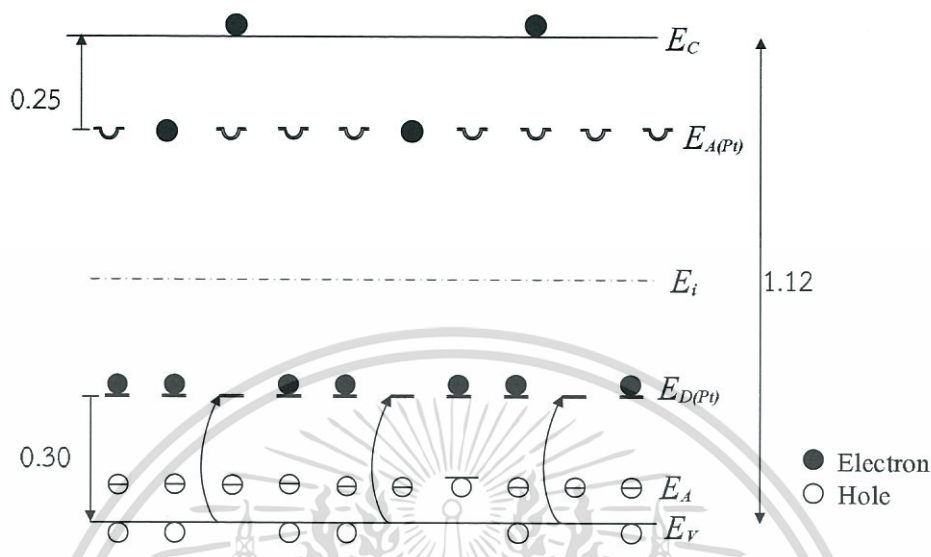
รูปที่ 2.16 ระดับพลังงานของซิลิคอนชนิดอินทรีนซิคที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม



รูปที่ 2.17 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมในซิลิคอนชนิดเอ็นซึ่งอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมสารเจือแพลตทินัม

ในซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำตกลงมาในระดับพลังงานผู้รับแบบลึก ซึ่งอยู่ห่างจากแถบความนำลงมาประมาณ 0.25 eV ดังรูปที่ 2.17 หรือกล่าวอีกในหนึ่งก็คือ อิเล็กตรอนในแถบความนำจะถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้รับแบบลึกคือเกิดปรากฏการณ์ชดเชย ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบความนำลดลง ค่าสภาพต้านทานจึงเพิ่มขึ้น เมื่อให้ปริมาณอะตอมของแพลตทินัมมากขึ้นก็จะทำให้มีระดับพลังงานผู้รับแบบ

ลึกลงมากขึ้น ซึ่งมีจำนวนมากพอที่จะจับอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำได้เกือบหมด ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าสูงมากขึ้นจนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก

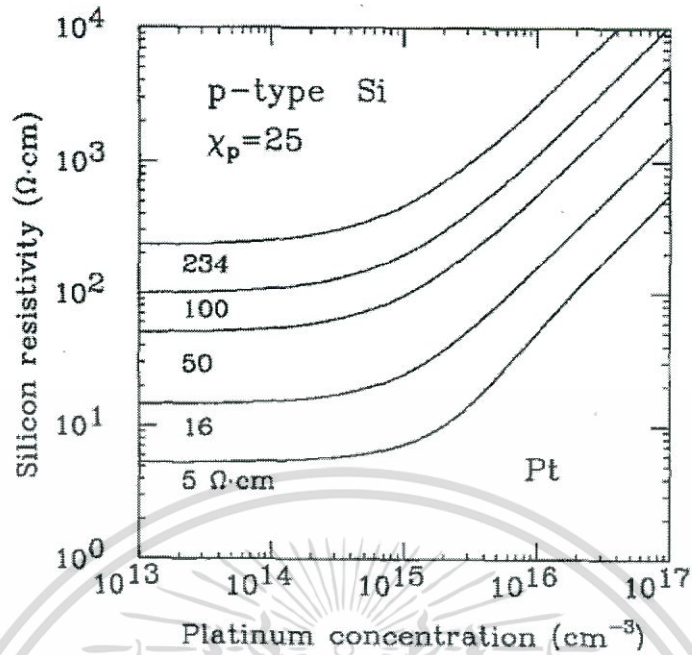


รูปที่ 2.18 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมฟอสฟอรัสในซิลิคอนชนิดพีซึ่งอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมฟอสฟอรัส

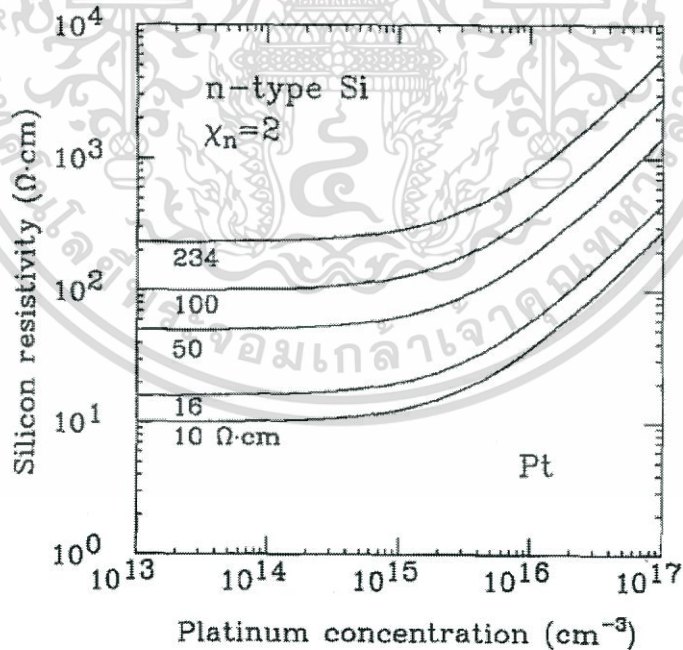
สำหรับซิลิคอนชนิดพีเมื่อถูกแพร่ด้วยฟอสฟอรัสจะทำให้เกิดระดับพลังงานที่เรียกว่าระดับพลังงานผู้ให้แบบลึกลง ซึ่งอยู่ห่างจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปประมาณ 0.30 eV โดยจะอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานผู้ให้แบบลึกลง จะรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ทำให้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ลดลง ค่าสภาพต้านทานจึงมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 2.18 แต่หากยังเพิ่มปริมาณของอะตอมฟอสฟอรัสจนกระทั่งโฮลในแถบวาเลนซ์ถูกรวมตัวเกือบหมด ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าสูงมากขึ้นจนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก

2.3.6 สภาพต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมฟอสฟอรัส

เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ชดเชยในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมฟอสฟอรัสจะทำให้ความหนาแน่นของพาหะลดลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานกับความหนาแน่นของอะตอมฟอสฟอรัสที่ถูกแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น และพี แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 และ รูปที่ 2.20 [25]



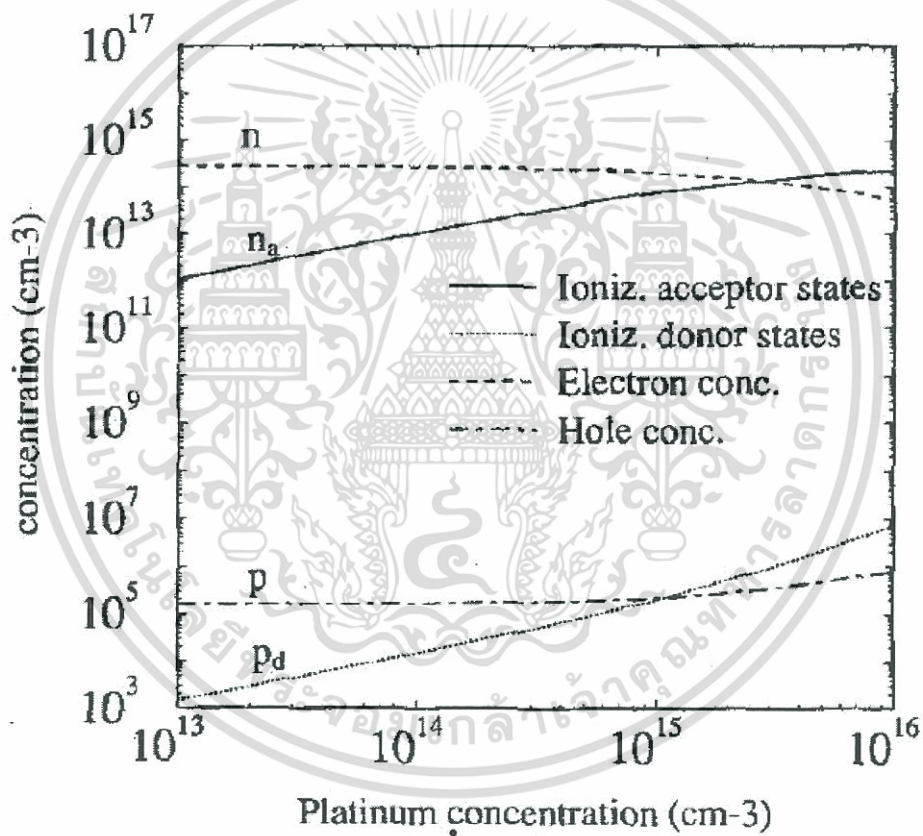
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิคตสภาพต้านทานของซิลิคอนกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือแพลตตินัม ของซิลิคอนฐานรองชนิดพีที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่แตกต่างกัน โดยตัวเลขในกราฟแสดงค่าของสภาพต้านทานเริ่มแรกของซิลิคอน



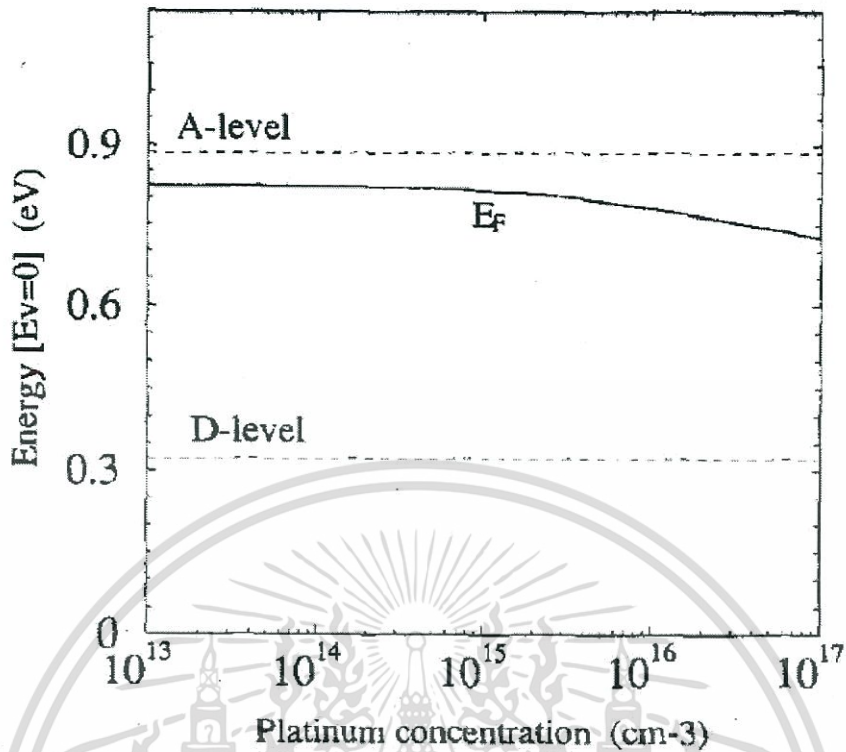
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือแพลตตินัม ของซิลิคอนฐานรองชนิดเอ็นที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่แตกต่างกัน โดยตัวเลขในกราฟแสดงค่าของสภาพต้านทานเริ่มแรกของซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลในแถบช่องว่างพลังงาน และระดับพลังงานระดับลิคแล้วจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งจะพบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n) และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้รับ (n_a) เปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย และในส่วนของโฮล (p) และ โฮลที่ถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้ให้ (p_d) ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน ซึ่งทำให้อธิบายได้ถึงสาเหตุของสภาพต้านทานที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในส่วนของความเข้มข้นนั้นจะมีผลต่อระดับเฟอร์มิโดยเมื่อสภาพต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นก็ยิ่งทำให้ได้ผลที่ไม่ต้องการเพิ่มมากขึ้น โดยรูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับเฟอร์มิในกับกับความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนพลตทินัม โดยฐานรองถูกโดปที่ $N_D = 2.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 2.21 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n), โฮลอิสระ (p), อิเล็กตรอนที่ถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้รับ (n_a) และโฮลที่ถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้ให้ (p_d) ในฟังก์ชันรวมของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนพลตทินัมโดยฐานรองถูกโดปที่ $N_D = 2.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 2.22 ระดับเฟอร์มิในฟังก์ชันความเข้มข้นของอะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยฐานรองถูกโดปที่

$$N_D = 2.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \quad [7]$$

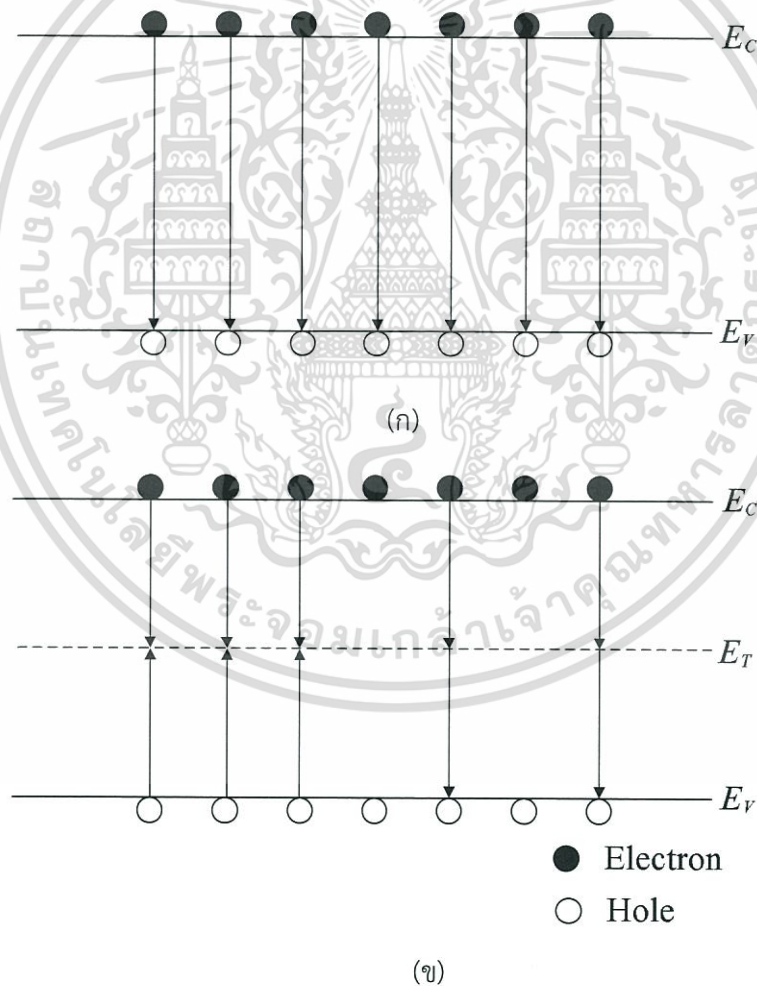
2.3.7 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน - โฮล

การรวมตัวใหม่เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือเป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะ คือโฮล และอิเล็กตรอนหายไป เนื่องจากการชนกันกับแลททิซในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่ และการเกิดของพาหะ สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นและมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตรา การรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการหลักคือ

1. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือโฟตอนได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าตกลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือ หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กึ่งกลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และอาจมีผลทำให้การสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (Phonon) ออกมาในที่สุด



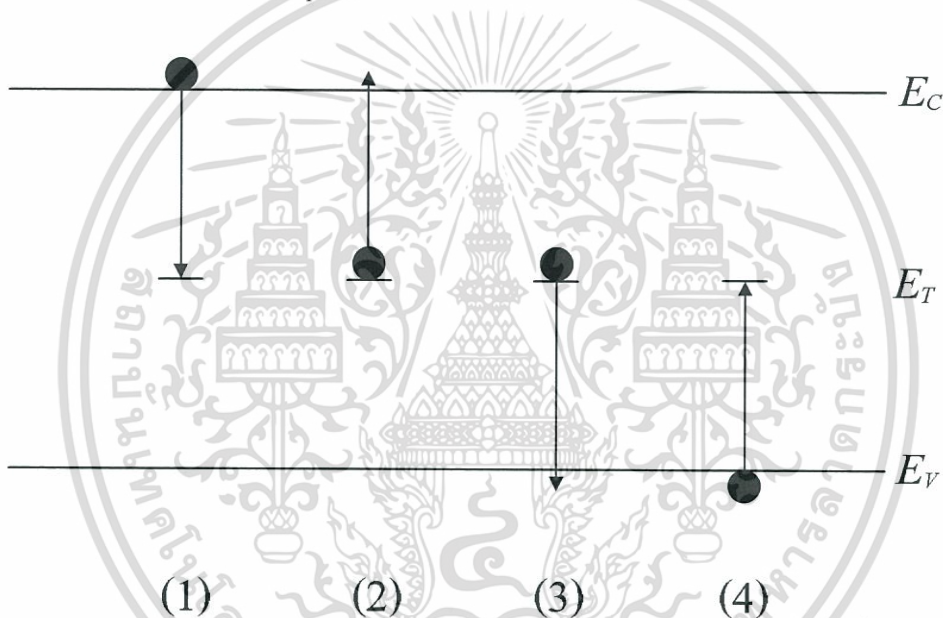
รูปที่ 2.23 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบตรง (ข) แบบอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการรวมตัวแบบอ้อม จะเกิดจากการเติมอะตอมสารเจือปนลงไปในซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งทำให้เกิดศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะขึ้น โดยเป็นการพิจารณาถึงกระบวนการจับยึด

กระบวนการจับยึด อะตอมสารเจือปนระดับลึกจะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัว เมื่อมีความหนาแน่นของพาหะมากกว่าความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำ และจะเป็นศูนย์กลางการเกิดใหม่เมื่อมีความหนาแน่นของพาหะน้อยกว่าจำนวนความหนาแน่นของพาหะในสภาวะสมดุล ซึ่งในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงกลไกการทำงานของศูนย์กลางการรวมตัว หรือศูนย์กลางการดักจับ จากการพิจารณาสารเจือปนระดับลึกที่มีระดับพลังงาน E_T มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮล ซึ่งเกิดจากสารเจือปนแบบตื้น ดังรูปที่ 2.24 จากรูปที่ 2.24 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการจับยึด และการเกิดของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่ง E_T จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี คือ



รูปที่ 2.24 กระบวนการจับยึดและกำเนิดของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่ง E_T

- (1) กระบวนการจับอิเล็กตรอน
- (2) กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน
- (3) กระบวนการจับโฮล
- (4) กระบวนการปลดปล่อยโฮล

(1) กระบวนการจับอิเล็กตรอน

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนจากแถบความนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงานดักจับ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลงมาที่ระดับดักจับขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.1) จำนวนความหนาแน่นสถานะของระดับพลังงานดักจับ

(1.2) ความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอนที่จะผ่านเข้าไปในสถานะของระดับพลังงานดักจับ

ความน่าจะเป็นต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่อิเล็กตรอนจะถูกจับที่ localized state มีค่าเท่ากับ $v_{th}\sigma_n$ เมื่อ v_{th} คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน (thermal velocity) ของอิเล็กตรอน และ σ_n คือ ภาคตัดขวางการจับยึด (capture cross section) ดังนั้นจะได้ผลรวมอัตราการจับอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานดักจับ ดังสมการที่ 2.16

$$r_1 = n \left\{ N_t \left[1 - f(E_t) \right] \right\} v_{th} \sigma_n \quad (2.16)$$

(2) กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน

เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายจากระดับพลังงานดักจับไปยังแถบความนำ โดยอัตราการเคลื่อนย้าย ดังสมการที่ 2.17

$$r_2 = \left[N_t f(E_t) \right] e_n \quad (2.17)$$

โดยที่ e_n คือ ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยที่สภาวะสมดุลความร้อน

$$r_1 = r_2$$

$$n \left\{ N_t \left[1 - f(E_t) \right] \right\} v_{th} \sigma_n = \left[N_t f(E_t) \right] e_n \quad (2.18)$$

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

จะได้ว่า

$$e_n = v_{th} \sigma_n n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) กระบวนการจับโฮล

เป็นกระบวนการจับโฮลจากแถบวาเลนซ์มายังระดับพลังงานดักจับ หรือเป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานดักจับเคลื่อนที่ไปจับกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ซึ่งอัตราการจับโฮลขึ้นอยู่กับ

- (3.1) ความหนาแน่นของสถานะที่ถูกครอบครองด้วยอิเล็กตรอน
- (3.2) ความหนาแน่นของโฮล
- (3.3) ความน่าจะเป็นในการส่งผ่านต่อหนึ่งหน่วยเวลา

ดังนั้น
$$r_3 = [N_t f(E_t)] \rho_{v_{th}} \sigma_p \quad (2.20)$$

(4) กระบวนการปลดปล่อยโฮล

เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังสถานะว่าง

$$r_4 = \{N_t [1 - f(E_t)]\} e_p \quad (2.21)$$

และที่สภาวะสมดุลความร้อน

$$r_3 = r_4$$

จะได้ว่า
$$e_p = v_{th} \sigma_n n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \quad (2.22)$$

2.3.8 การควบคุมช่วงอายุของพาหะด้วยอะตอมแพลตทินัม

เมื่อพิจารณาซิลิคอนชนิดเอ็น $N_D \gg N_A$ ที่มีการเติมอะตอมของแพลตทินัม จะทำให้ระดับพลังงานผู้รับแบบลึกของแพลตทินัม ซึ่งมีประจุเป็นกลาง (N_{Pt}^0) เมื่อไม่มีการครอบครองอิเล็กตรอน และเมื่ออิเล็กตรอนถูกจับทำให้ระดับพลังงานดังกล่าวมีประจุเป็นลบ (N_{Pt}^-) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการจับโฮล จะทำให้ค่าเวลาช่วงชีวิตของโฮล (τ_p) ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยมีค่าลดลง ดังสมการที่ 2.23

$$\tau_p = \frac{1}{v_p \sigma_p^- N_{Pt}^-} \quad (2.23)$$

เมื่อพิจารณาซิลิคอนชนิดพี $N_A \gg N_D$ ที่มีการเติมอะตอมของแพลตทินัม จะทำให้ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึกของแพลตทินัม ซึ่งมีประจุเป็นกลาง (N_{Pt}^0) เมื่อไม่มีการครอบครองโฮล และเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลถูกจับทำให้ระดับพลังงานดังกล่าวมีประจุเป็นลบ ($N_{P_i}^+$) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการจับอิเล็กตรอน จะทำให้ค่าเวลาช่วงชีวิตของอิเล็กตรอน (τ_n) ซึ่งเป็นพหุคูณส่วนน้อยมีค่าลดลง ดังสมการที่ 2.24 [26-29]

$$\tau_n = \frac{1}{v_n \sigma_n^+ N_{P_i}} \quad (2.24)$$

- โดยที่ τ คือ ค่าเวลาช่วงชีวิตของพหุคูณ
 σ คือ ภาคตัดขวางการจับยึด
 v คือ ความเร็วของพหุคูณ
 N_{P_i} คือ ความหนาแน่นของอะตอมแพลตทินัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคโนโลยีการสร้าง การออกแบบ และกระบวนการสร้าง

ในการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีดทีอีไดโอดนั้น เริ่มจากการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าโลหะ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด เมื่อทำการออกแบบลวดลายเป็นที่เรียบร้อยแล้วจากนั้นจะทำการสร้างซีดทีอีไดโอดบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) สภาพต้านทาน 3-8 Ω -cm มีความหนา 625 μm ซึ่งมีโครงสร้างรอยสัมผัสระหว่าง Al/n-Si โดยในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและกระบวนการสร้างซีดทีอีไดโอดอย่างละเอียด ซึ่งในการออกแบบการทดลองนั้นแยกเป็นสองส่วนหลักๆด้วยกัน คือ ศึกษาผลของขนาดขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซีดทีอีไดโอดและ ศึกษาผลของแพลตฟอร์มที่มีต่อซีดทีอีไดโอด โดยซีดทีอีไดโอดนี้ถูกสร้างขึ้นที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) และเมื่อทำการสร้างซีดทีอีไดโอดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำชิ้นงานที่สร้างไปทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน เป็นต้น

3.1 เทคโนโลยีการสร้าง

กระบวนการสร้างซีดทีอีไดโอดประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 5 กระบวนการ ดังนี้ ออกซิเดชัน กระบวนการโพลิโธกราฟี การแพร่สารเจือ การสร้างชั้นโลหะ และกระบวนการซินเตอร์ริง ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้ [30, 31]

3.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน

กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆได้เป็นอย่างดี และยังใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) โดยการเกิดปฏิกิริยาของแผ่นผลึกซิลิคอนกับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำ ในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการทางเคมีแสดงดังนี้

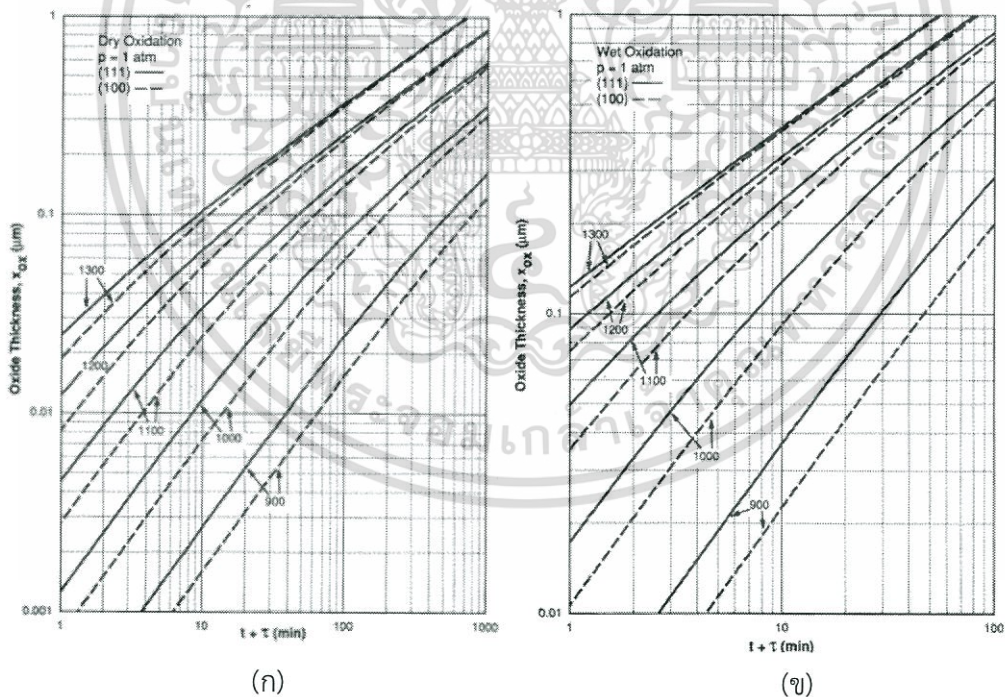


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยความร้อนทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของผลึกซิลิคอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นเจือปน ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 900 ถึง 1,150 °C จะทำให้อุณหภูมิของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 3.1 ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างโดยวิธีนี้จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี สำหรับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.1 (ก)

2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของผลึกซิลิคอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนในไอน้ำ การสร้างชั้นออกไซด์แบบชื้นจะสร้างได้เร็วกว่าการสร้างออกไซด์แบบแห้ง ซึ่งกระบวนการเกิดออกไซด์แสดงในสมการที่ 3.2 อัตราการเกิดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบชื้นจะเร็วกว่าอัตราการเกิดที่ได้จากกระบวนการแบบแห้งถึง 4 เท่า เนื่องจากขนาดของโมเลกุลน้ำเล็กกว่าของโมเลกุลออกซิเจนครึ่งหนึ่ง ดังนั้น อัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำไปยังชั้น SiO₂ จึงมากกว่าอัตราการแพร่ของออกซิเจน สำหรับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้นสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.1 (ข)



รูปที่ 3.1 อัตราการเกิดของซิลิคอนไดออกไซด์บนแผ่นผลึกซิลิคอนในบรรยากาศของออกซิเจน

(ก) กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง

(ข) กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น

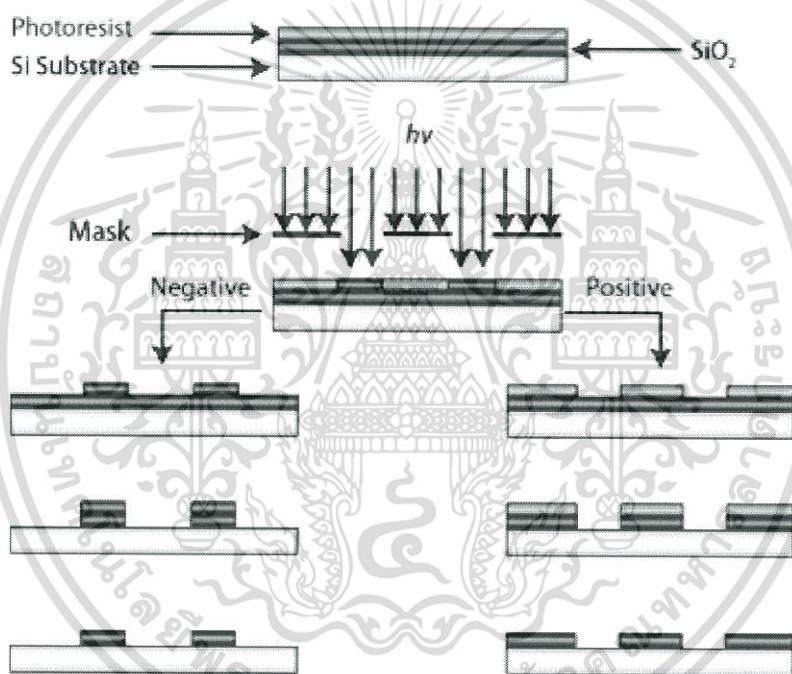
แม้ว่าอัตราการเกิดออกไซด์ด้วยโมเลกุลน้ำจะมากกว่าออกซิเจน แต่ออกไซด์แบบแห้งจะมีความหนาแน่นของโครงสร้างออกไซด์สูงกว่าแบบชื้น กระบวนการออกซิเดชันต่างๆไปจะใช้ “แห้ง-ชื้น-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แห่ง” โดยเริ่มต้นการสร้างชั้นออกไซด์แบบแห้งจากนั้นจึงสร้างชั้นออกไซด์แบบชื้น เพื่อให้ชั้นออกไซด์แบบแห้งเป็นชั้นตอนสุดท้าย

3.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) ถูกนำมาใช้สำหรับสร้างวงจรรวม เพื่อสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนที่เคลือบอยู่บนผิวผลึกซิลิคอนออก เพื่อการแพร่อะตอมของสารเจือเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอนซึ่งทำให้เกิดส่วนต่างๆของตัวอุปกรณ์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น โดยรูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสามารถอธิบายได้ดังนี้



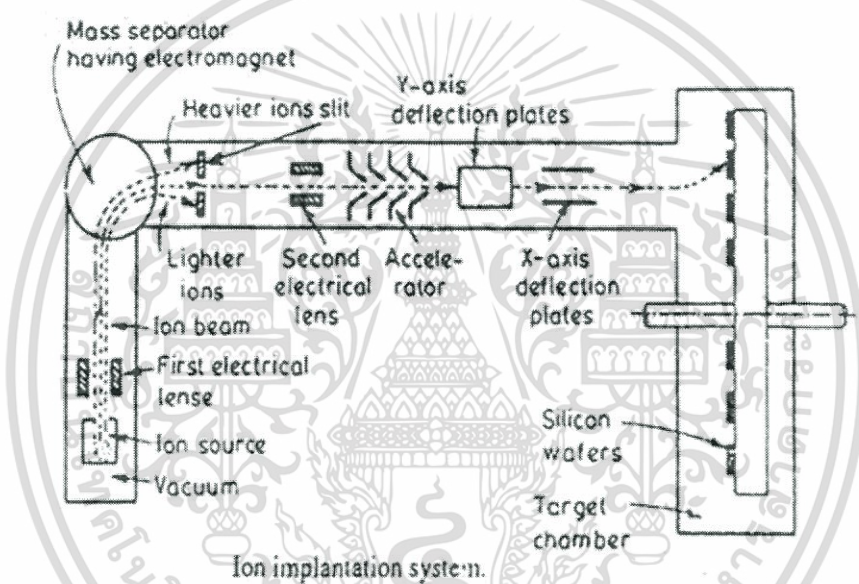
รูปที่ 3.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบนไปเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกสลวดลายต้นแบบ ที่เรียกว่า โฟโตมาสค์ (photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบแสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสค์จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนจะคงเหลือค้างอยู่บนผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสง ชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลือปกคลุมอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกสกัดออกไป ซึ่งในขั้นตอนการสกัดนี้แผ่นผลึกจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่เป็นสารตัวสกัด ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถสกัดหรือละลายชั้นของออกไซด์ออกไปได้ในที่สุด หลังจากนั้นเมื่อชั้นของน้ำยาไวแสงถูกลอกออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเป็นลวดลายเหมือนกับลวดลายบนกระจกโฟโตมาส์ค การเกิดภาพลวดลายได้ก็เพราะชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนถูกสกัดออกไปนั่นเอง

3.1.3 กระบวนการแพร่สารเจือโดยเทคนิคไอออนอิมแพลนเทชัน



รูปที่ 3.3 เครื่องไอออนอิมแพลนเทชัน

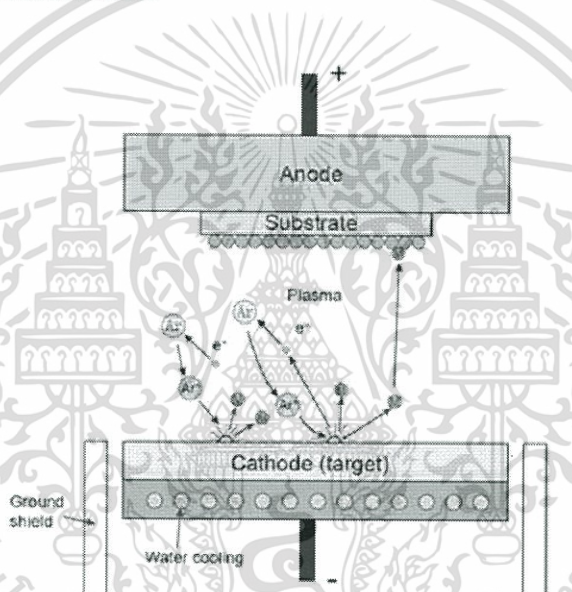
ในการออกแบบและสร้างวงจรรวมระดับ VLSI นั้นจะนิยมใช้กระบวนการไอออนอิมแพลนเทชัน (Ion implantation) เนื่องจากสามารถควบคุมให้มีความเที่ยงตรงแน่นอน ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อ หรือปริมาณอะตอมของสารเจือ กระบวนการไอออนอิมแพลนเทชัน เป็นกระบวนการยิงไอออนของอะตอมสารเจือเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยหลักการทำให้อะตอมสารเจือมีสภาพเป็นไอออน จากนั้นไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าค่าสูงทำให้ไอออนมีความเร็วสูง มีพลังงานจลน์ค่ามาก กระทั่งสามารถฝังเข้าไปในเนื้อผลึกสารกึ่งตัวนำได้ โดยขั้นตอนสุดท้ายของไอออนจะถูกควบคุมและกวาดลงบนแผ่นผลึกฐานรอง ไอออนของสารเจือซึ่งมีพลังงานจลน์ค่าสูง จะถูกฝังเข้าไปในฐานรอง และเพื่อไม่ให้ไอออนสูญเสียพลังงาน ลำของไอออนจะถูกเร่งในสุญญากาศ

รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องไอออนอิมแพลนเทชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำงานได้ส่วนต่างๆของอุปกรณ์วงจรรวมบนแผ่นเวเฟอร์แล้ว แต่ส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงแยกกันอยู่ในสภาพที่ยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อส่วนต่างๆของอุปกรณ์เข้าด้วยกันตามรูปแบบโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ทำงานตามหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ ขั้นตอนการเชื่อมส่วนต่างๆของอุปกรณ์ด้วยโลหะเรียกว่ากระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metaligation) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) หรือรอยสัมผัสช็อตทกี (Schottky) ได้ ซึ่งเทคนิคกระบวนการเมทัลไลเซชันนั้นมีหลายเทคนิคด้วยกัน แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคกระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering) รูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการสปัตเตอริง



รูปที่ 3.4 กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering)

3.1.5 กระบวนการซินเตอร์ริง

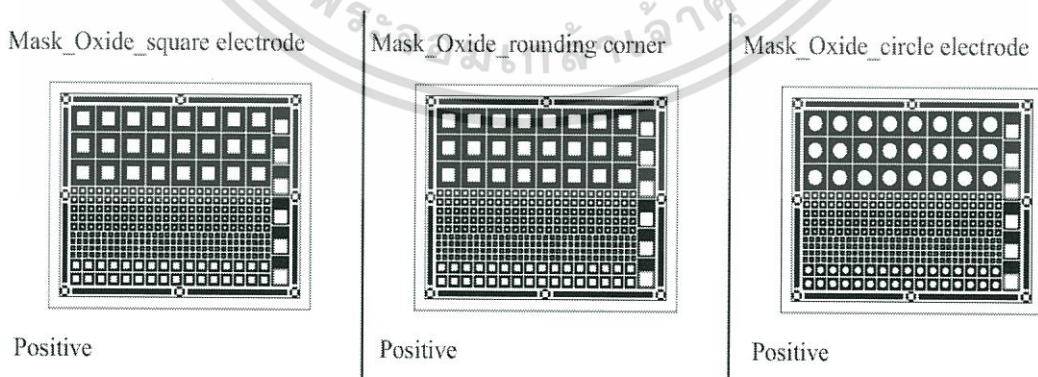
หลังจากทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียม และทำการโฟโตลิโธกราฟีแล้วก่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มมิกแต่รอยสัมผัสนี้อาจจะไม่สมบูรณ์เพียงพอ ดังนั้นกระบวนการอัลลอยจะช่วยให้อรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมและซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ การอัลลอยจะทำในเตาแพร่สารที่ตั้งอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 450-550 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เวลาประมาณ 10-30 นาที ถ้าในขณะที่อัลลอยปล่อยก๊าซซึ่งมีไฮโดรเจนรวมอยู่ด้วยเข้าไป จะเรียกว่าการซินเตอร์ริง (Sintering) เพื่อช่วยให้คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติที่ดี และไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม

3.2 การออกแบบลวดลาย และการสร้างกระจกต้นแบบ

ในการสร้างซ็อดกียไคโอดนั้นเราจะเริ่มต้นจากการออกแบบลวดลายของขั้วไฟฟ้าโลหะ โดยในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงลักษณะของรูปร่าง และข้อจำกัดของกระบวนการสร้าง นอกจากนี้แล้วยังต้องทำการจัดวางลวดลายให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมโดยให้สามารถอยู่ในฐานรองที่เตรียมไว้ได้อีกด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบลวดลายโดยใช้โปรแกรม Corel DRAW X5 Graphic จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ได้ออกแบบไว้ไปทำการสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนแผ่นฟิล์มป้องกันแสง แล้วนำไปติดบนกระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้าง

โดยลวดลายที่ได้ทำการออกแบบไว้ เป็นการออกแบบการสร้างซ็อดกียไคโอด ซึ่งในกระบวนการสร้างซ็อดกียไคโอดนั้นจะมีกระจกต้นแบบจำนวน 2 แผ่นด้วยกัน โดยกระจกต้นแบบที่ใช้เป็นกระจกต้นแบบที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.5 คือ

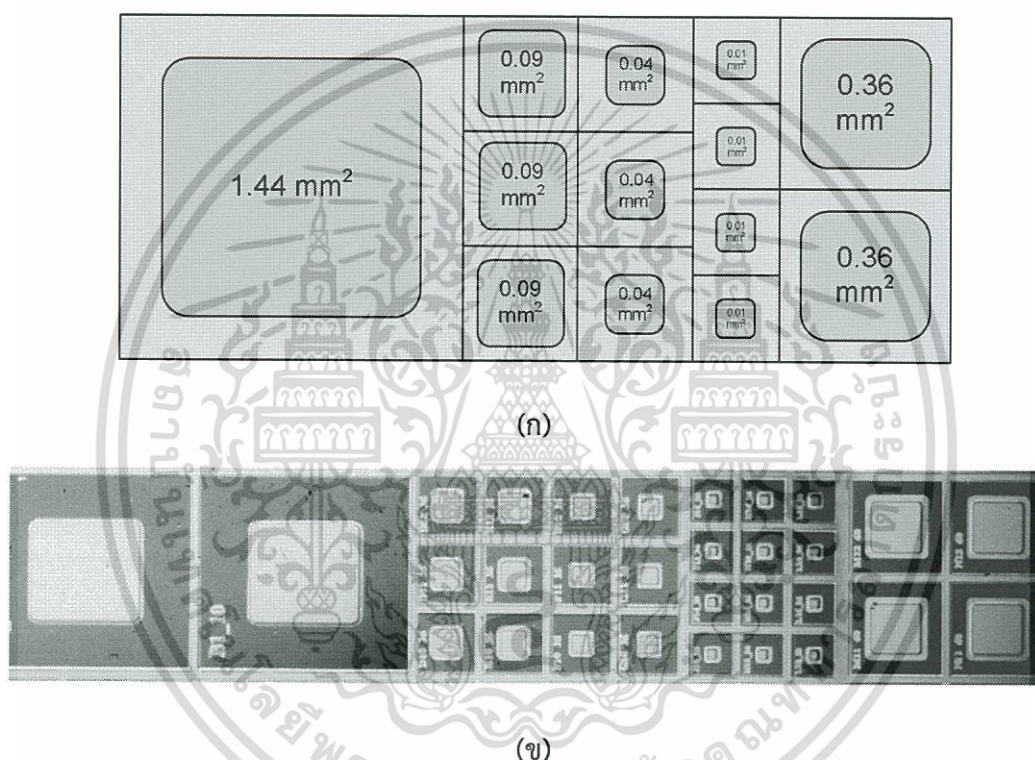
1. กระจกต้นแบบที่ 1 สำหรับใช้สร้างลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Oxide mask) ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในบริเวณที่ต้องการสร้างขั้วโลหะออก โดยพื้นที่ของรอยสัมผัสซ็อดกียไคโอดนั้นจะถูกกำหนดในขั้นนี้ ดังนั้นเราจึงต้องกำหนดขนาดของพื้นที่ให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่ต้องการวัด
2. กระจกต้นแบบที่ 2 สำหรับใช้สร้างลวดลายของชั้นอลูมิเนียม (Metal mask) เพื่อสร้างลวดลายขั้วไฟฟ้าของชิ้นงาน ในขั้นตอนนี้ต้องมีการกำหนดขนาดให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการเหนี่ยวนำประจุบริเวณใต้ชั้นโลหะ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการสะสมของพาหะ โดยจะส่งผลให้โอดที่สร้างนั้นมีสวิตซ์ต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อความถี่สูงลดลง



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยซ็อดทกียโดโอดที่ใช้ในการเปรียบเทียบนั้นเป็นซ็อดทกียโดโอดที่ถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งได้ทำการออกแบบให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขอบมนมีขนาดพื้นที่ต่างกันดังนี้ 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm² โดยเราจะทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซ็อดทกียโดโอดเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป รูปที่ 3.6 แสดงลวดลายของกระจกตันแบบสี่เหลี่ยมขอบมนที่มีขนาด 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm² ทั้งกระจกตันแบบสำหรับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และกระจกตันแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะโครงสร้าง และภาพถ่ายชิ้นงานจริงจากกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 3.7 ลักษณะโครงสร้างและลวดลายขั้วไฟฟ้าสี่เหลี่ยมขอบมน

ขนาด 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm²

(ก) ลักษณะโครงสร้างของซ็อดทกียโดโอดที่ทำการสร้าง

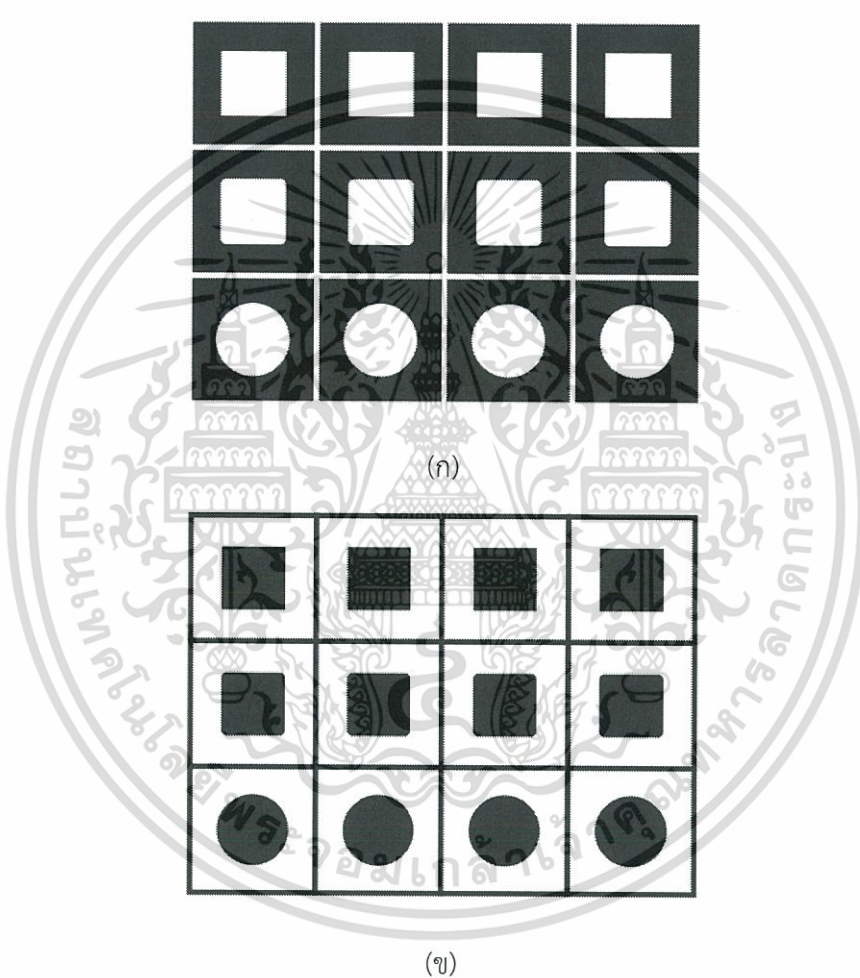
(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจริงจากกล้องจุลทรรศน์

3.2.2 ลวดลายกระจกตันแบบที่ใช้ในการศึกษาความแตกต่างของรูปร่างขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆของซ็อดทกียโดโอด

ทำการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีลักษณะแตกต่างกันดังนี้ สี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน และ วงกลม เพื่อทำการศึกษาผลของรูปร่างของขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีต่อลักษณะสมบัติต่างๆของซ็อดทกีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

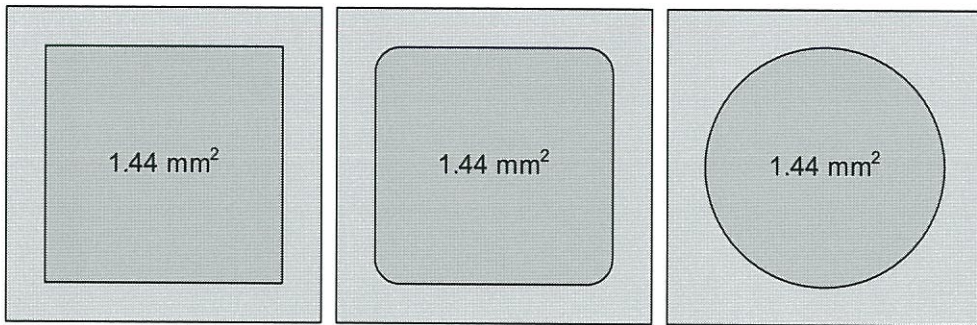
ไดโอด โดยซีดทกียไดโอดที่ใช้ในการเปรียบเทียบนั้นเป็นซีดทกียไดโอดที่ถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งได้ทำการออกแบบให้มีพื้นที่เท่ากันทั้งสามลักษณะ คือ 1.44 mm^2 โดยเราจะทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทกียไดโอดเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป รูปที่ 3.8 แสดงลวดลายกระจกตันแบบสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน, และวงกลมของซีดทกียไดโอด ทั้งกระจกตันแบบสำหรับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และกระจกตันแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะโครงสร้าง และภาพถ่ายชิ้นงานจริงจากกล้องจุลทรรศน์



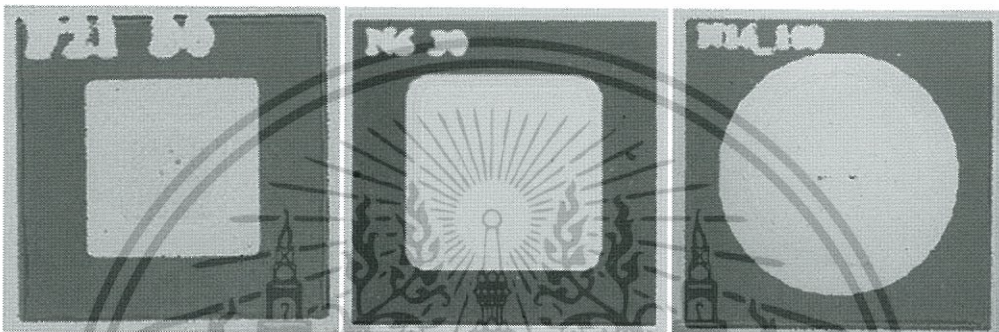
รูปที่ 3.8 ลวดลายสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน, วงกลมของซีดทกียไดโอด

(ก) ลวดลายกระจกตันแบบสำหรับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

(ข) ลวดลายกระจกตันแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 ลักษณะโครงสร้างและลวดลายชั่วคราวไฟฟ้าสีเหลี่ยม, สีเหลี่ยมขอบมน และวงกลมของซ็อดทีกียีไดโอด

(ก) ลักษณะโครงสร้างของซ็อดทีกียีไดโอดที่ทำการสร้าง

(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจริงจากกล้องจุลทรรศน์

3.2.3 ลวดลายกระจกต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของแพลตทินัมที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆของซ็อดทีกียีไดโอด

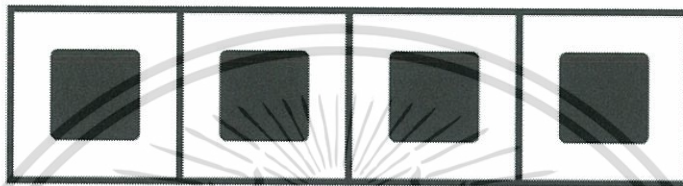
จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนั้นต้องการศึกษาคุณสมบัติของแพลตทินัมที่มีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซ็อดทีกียีไดโอด โดยได้ทำการออกแบบชั่วคราวไฟฟ้าโลหะให้มีลักษณะเป็นสีเหลี่ยมขอบมน ขนาดพื้นที่ 1.44 mm^2 ซึ่งพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษานั้นประกอบไปด้วย กระแสเมื่อได้รับไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ, แรงดันภายใน, แรงดันพังทลาย, ค่ากัมพางค์ย็อดทีกียี, ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้สามารถวัดได้จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซ็อดทีกียีไดโอด โดยทำการวัดเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นที่ไม่ถูกแพร์และถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม รูปที่ 3.10 แสดงลวดลายกระจกต้นแบบชั่วคราวไฟฟ้าสีเหลี่ยมขอบมนของซ็อดทีกียีไดโอดทั้งกระจกต้นแบบสำหรับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจกต้นแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะโครงสร้าง และภาพถ่ายชิ้นงานจริงจากกล้องจุลทรรศน์



(ก)

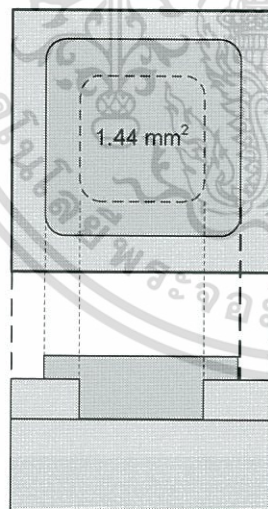


(ข)

รูปที่ 3.10 ลวดลายขั้วไฟฟ้าสี่เหลี่ยมขอบมนของซีตก็ยโดโอดที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของแพลตฟอร์ม

(ก) ลวดลายกระจกต้นแบบสำหรับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

(ข) ลวดลายกระจกต้นแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 ลักษณะโครงสร้างและลวดลายขั้วไฟฟ้าวงกลมของซีตก็ยโดโอด

(ก) ลักษณะโครงสร้างของซีตก็ยโดโอดที่ทำการสร้าง

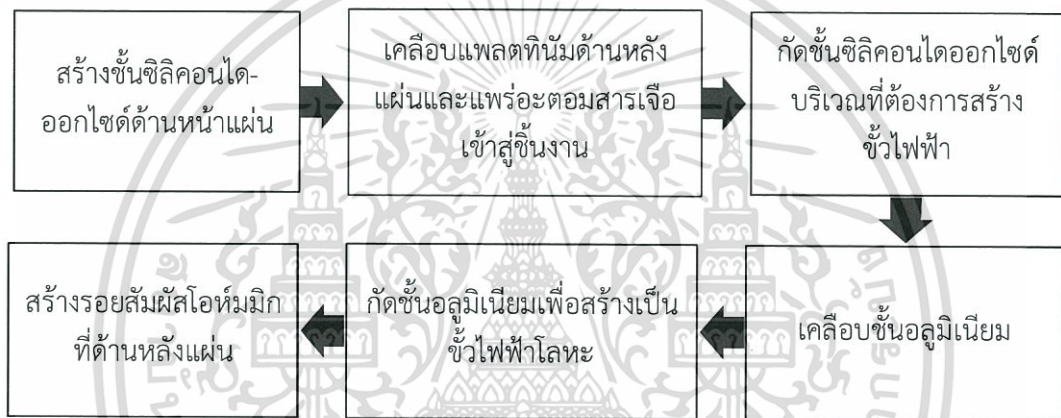
(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจริงจากกล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วตกัยไโดโอด

ในการสร้างขั้วตกัยไโดโอดนั้นจะทำการสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) สภาพต้านทานแผ่น 3-8 Ω -cm มีความหนา 625 μm โดยมีโครงสร้างรอยสัมผัสของขั้วไฟฟ้าโลหะคือ Al/n-Si ซึ่งรอยสัมผัสนี้เป็นรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำหรือรอยสัมผัสขั้วตกัย โดยในการศึกษานี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างขั้วตกัยไโดโอดที่ถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลททินัมและขั้วตกัยไโดโอดที่ถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลททินัม [31]

ขั้นตอนการสร้างทั้งหมดแสดงดังแผนภูมิในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนผังกระบวนการสร้างขั้วตกัยไโดโอดโครงสร้าง Al/n-Si (Pt doped)

ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างจะกล่าวถึงลำดับ และขั้นตอนรวมถึงเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการสร้างขั้วตกัยไโดโอดโครงสร้าง Al/n-Si (Pt doped) ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานต่าง ๆ ดังนี้ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน กระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงานด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีพื้นฐาน และกระบวนการเคลือบโลหะด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง โดยในขั้นตอนของกระบวนการสร้างจะได้กล่าวในรายละเอียดตามลำดับ

1) ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน

การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นการทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันที่ผิวของแผ่นซิลิคอนออก โดยมีกระบวนการดังนี้

- อัลตราโซนิค (ultrasonic) แผ่นผลึกซิลิคอนในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization water: DI water) เพื่อกำจัดฝุ่นละออง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดปิร์นยา (Piranha)
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลอเอทรีลีน (Trichloroethylene) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมัน
- อัลตราโซนิคแผ่นผลึกซิลิคอนในอะซิโตน (Acetone)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid: HF) ที่มีความเข้มข้น 5% เพื่อลอกชั้นออกไซด์ (slide etching) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (native oxide)
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2) กระบวนการออกซิเดชัน

ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ด้วยวิธีการ Thermal oxidation ความหนา 3000 Å โดยจะสร้างออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบขึ้น เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที ที่อุณหภูมิ 920°C

3) กระบวนการโฟโตลิโกราฟีสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังแผ่น

เป็นการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นที่ด้านหลังแผ่น เพื่อทำการสร้างรอยสัมผัสโหนดมิก โดยมีขั้นตอนดังนี้

โฟโตลิโกราฟี

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ด้านหน้าแผ่น
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังแผ่นออก

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF: NH_4F อัตราส่วน 1:6) โดยจุ่มเป็นเวลา 3 นาที (อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 Å/นาที)
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตน
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4) กระบวนการ Implantation สร้างรอยสัมผัสโหนดมิก

เป็นการสร้างส่วนของ n^+ layer โดยการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นสูงที่ด้านหลังแผ่น โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- Implantation phosphorus 2×10^{15} atom/cm² ที่พลังงาน 60 keV
- anneal ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 60 นาที

5) กระบวนการ Electron-beam evaporation เคลือบชั้นแพลตทินัม

เป็นการสร้างชั้นแพลตทินัมด้วยกระบวนการ Electron-beam evaporation โดยสร้างชั้นแพลตทินัมหนา 200 Å [32]

6) กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัม

เป็นการแพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมเข้าสู่แผ่นซิลิคอน โดยแพร่อะตอมสารเจือที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 30 นาที [14, 32]

7) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 1

เป็นการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหน้าแผ่น เพื่อทำการสร้างบริเวณ Active area โดยจะใช้ลวดลายต้นแบบที่ 1 หรือ กระจกต้นแบบสำหรับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

โฟโตลิโธกราฟี

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ด้านหน้าแผ่น
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสง

Develop ฟิล์มออก

- จุ่มใน AZ Developer
- จุ่มในน้ำ DI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออก เพื่อสร้าง Active area

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF: NH_3F อัตราส่วน 1:6)
- จุ่มในน้ำ
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตน
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

8) กระบวนการ Sputtering เคลือบชั้นอลูมิเนียม

ทำการสร้างชั้นอลูมิเนียม (Al) ด้วยระบบ Magnetron Sputtering โดยทำการสร้างชั้นอลูมิเนียมให้มีความหนา 800 nm [33]

9) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 2

เป็นการกัดลวดลายชั้นอลูมิเนียมเพื่อทำการสร้างขั้วไฟฟ้าโลหะ โดยจะใช้ลวดลายต้นแบบที่ 2 หรือกระจกต้นแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม โดยมีขั้นตอนดังนี้

โฟโตลิโธกราฟี

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ด้านหน้าแผ่น
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสง

Develop ฟิล์มออก

- จุ่มใน AZ Developer
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกัดชั้นอลูมิเนียม

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

กระบวนการลอกฟิล์ม

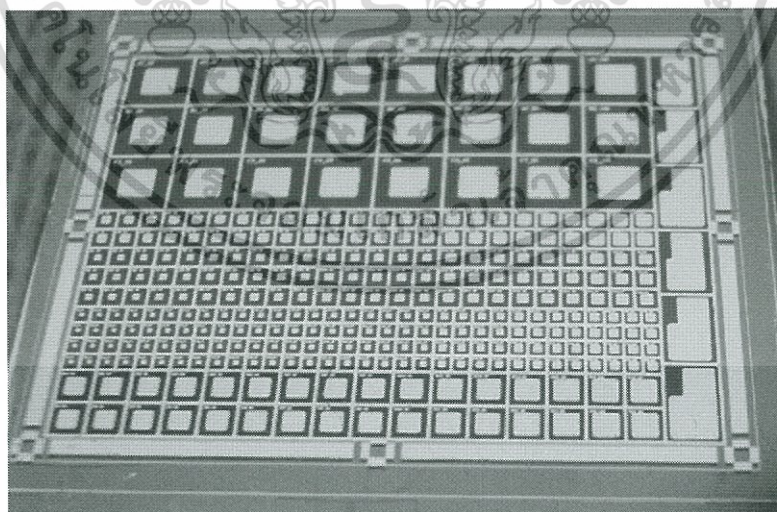
- จุ่มในอะซิโตน
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

10) กระบวนการ Sputtering เคลือบชั้นอลูมิเนียม

ทำการสร้างชั้นอลูมิเนียม (Al) ด้วยระบบ Magnetron Sputtering โดยทำการสร้างชั้นอลูมิเนียมให้มีความหนา 800 nm ที่ด้านหลังแผ่นซิลิคอน เพื่อใช้เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก

11) กระบวนการ Sintering

เป็นกระบวนการที่ทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นอัลลอย ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติรอยสัมผัสที่ดี โดยทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 450°C และมีการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที รูปที่ 3.13 แสดงรูปชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์



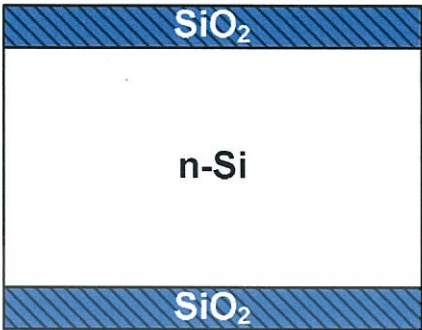



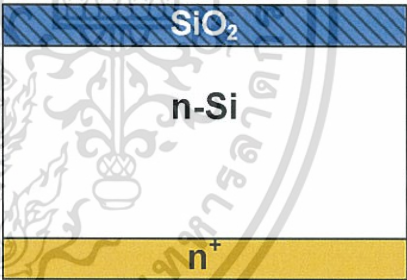
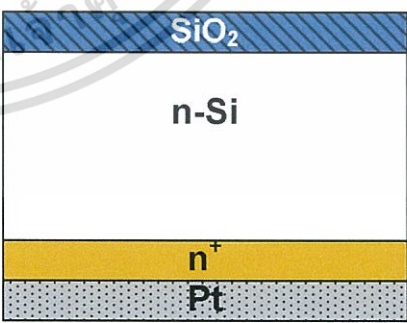
รูปที่ 3.13 รูปชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์

จากรูปที่ 3.14 เป็นการแสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างขั้วตกก็ยโดโอด โครงสร้าง

Al/ni (Pt doped)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

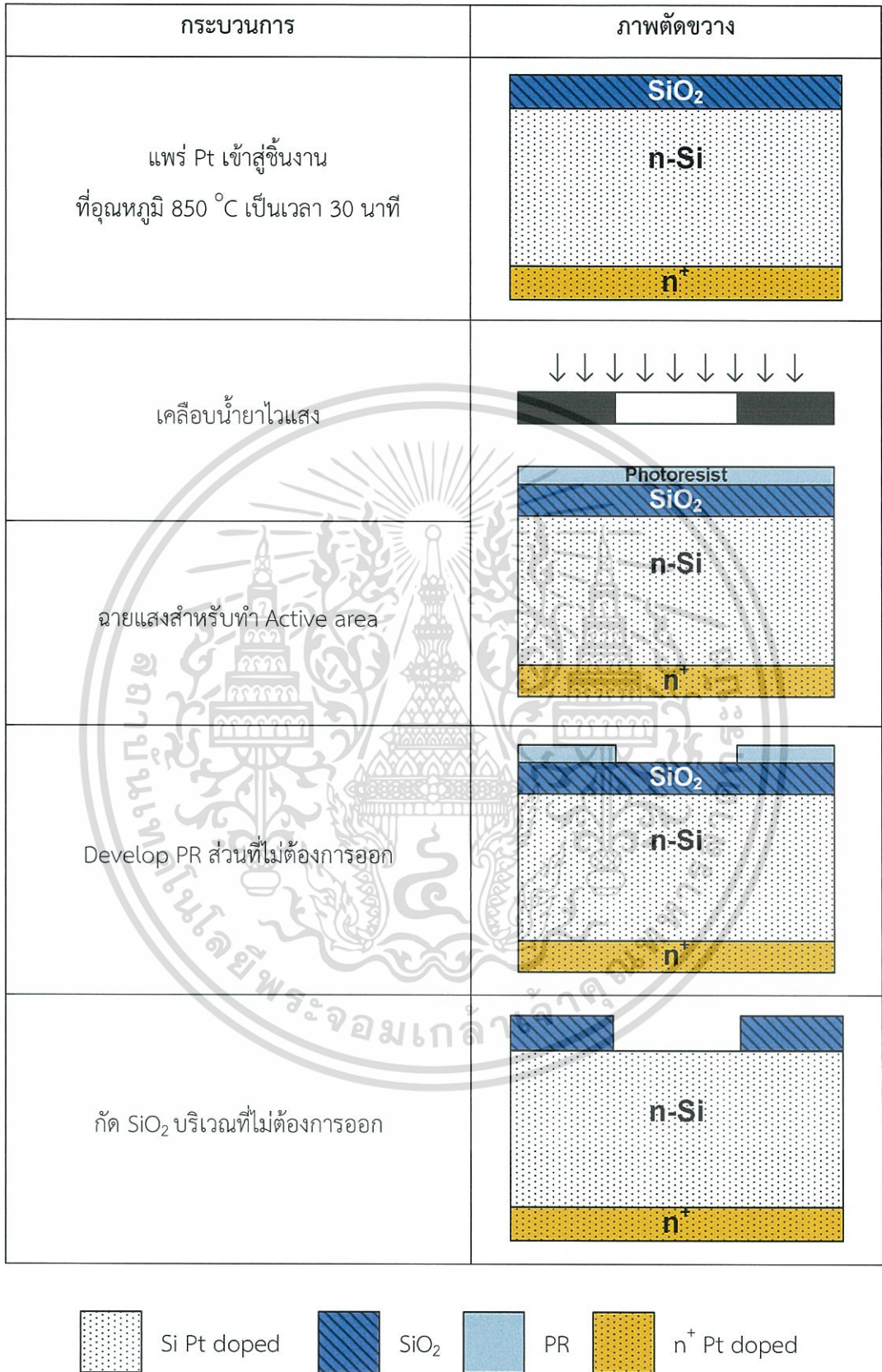
ภาพตัดขวางกระบวนการสร้างชิ้นงาน

กระบวนการ	ภาพตัดขวาง
สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ลงบนแผ่นซิลิคอน หนา 3000 Å	
เคลือบน้ำยาไวแสง	
สกัดชั้น SiO_2 ด้านหลังแผ่นออก	
ลอกชั้น Photoresist ออก	
สร้างชั้น n^+	
เคลือบ Pt หนา 200 Å	



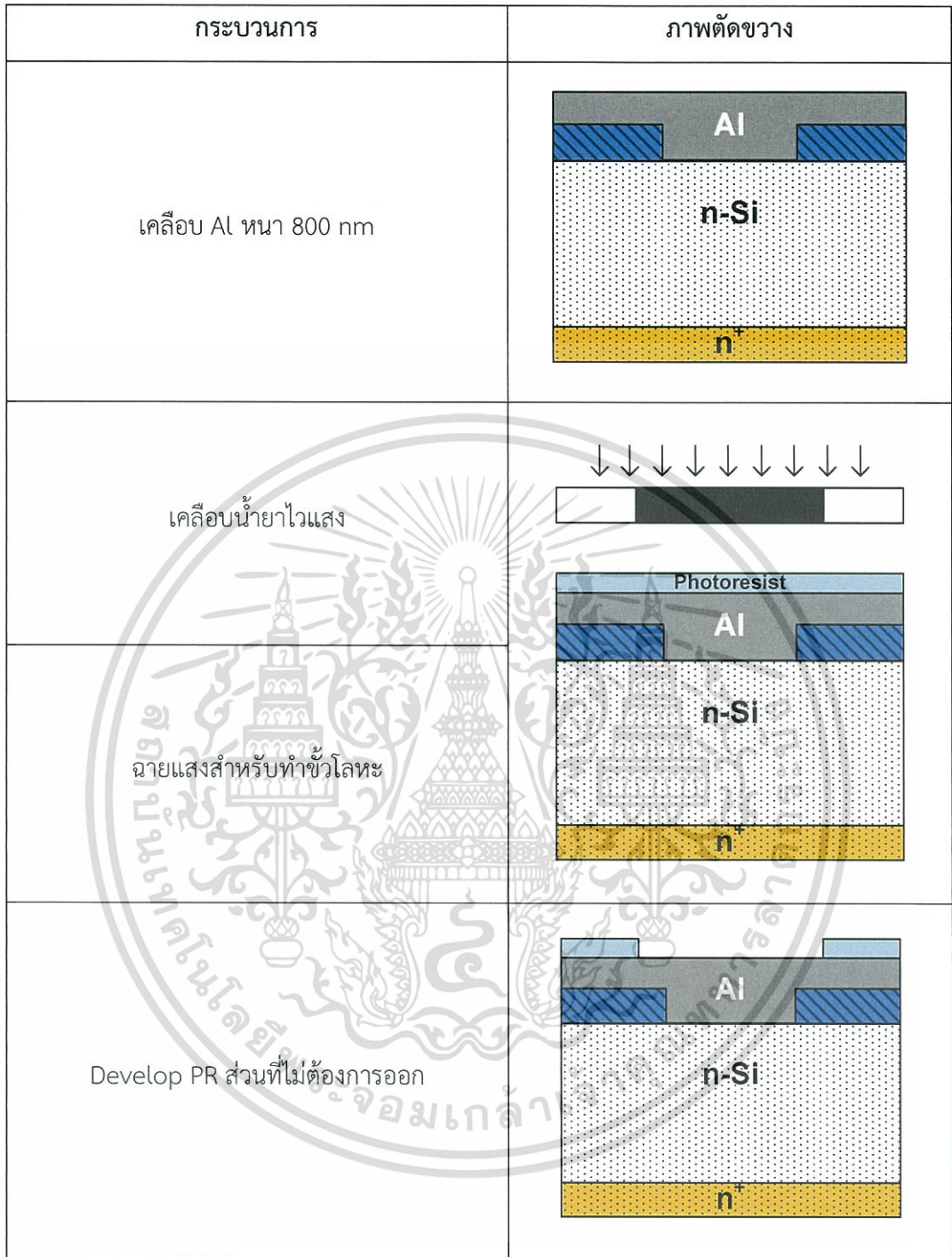
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนกระบวนการสร้างซ็อตทียูไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



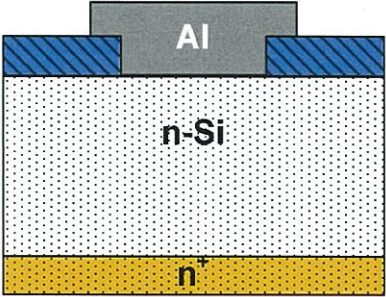
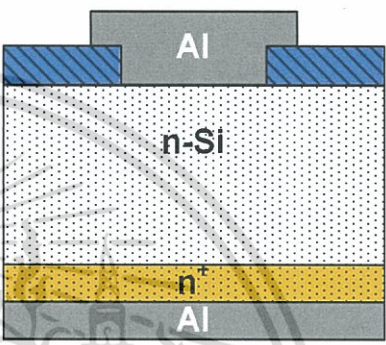
รูปที่ 3.14 (ต่อ) ขั้นตอนกระบวนการสร้างซ็อดทีกีโดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 (ต่อ) ขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วตกก็ยโดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ	ภาพตัดขวาง
สกัด Al บริเวณที่ไม่ต้องการออก	
เคลือบ Al ด้านหลังแผ่น	



รูปที่ 3.14 (ต่อ) ขั้นตอนกระบวนการสร้างซีดกียไคโอต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

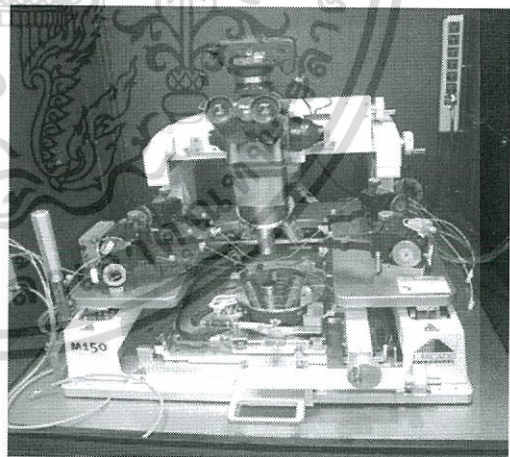
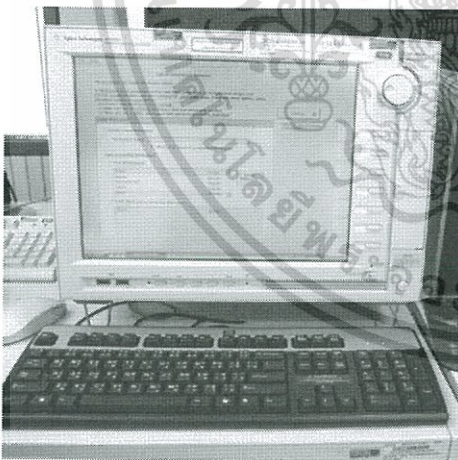
บทที่ 4

การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ในส่วนแรกทำการศึกษาลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณสมบัติของซีดทกียไดโอด โดยจะทำการเปรียบเทียบขนาดของขั้วไฟฟ้าโลหะ และลักษณะรูปร่างของขั้วไฟฟ้าโลหะ จากนั้นจะทำการศึกษาผลของอะตอมสารเจือปนที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของซีดทกียไดโอด โดยจะทำการทดสอบ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน, กระแสรั่วไหล (I_{leak}), แรงดันพังทลาย, แรงดันภายใน (V_{bi}), กำแพงศักย์ซีดทกีย (ϕ_{bn}), ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) และความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_D) ตามลำดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของซีดทกียไดโอดที่ถูกแพร่และไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปน

4.1 การทดลอง

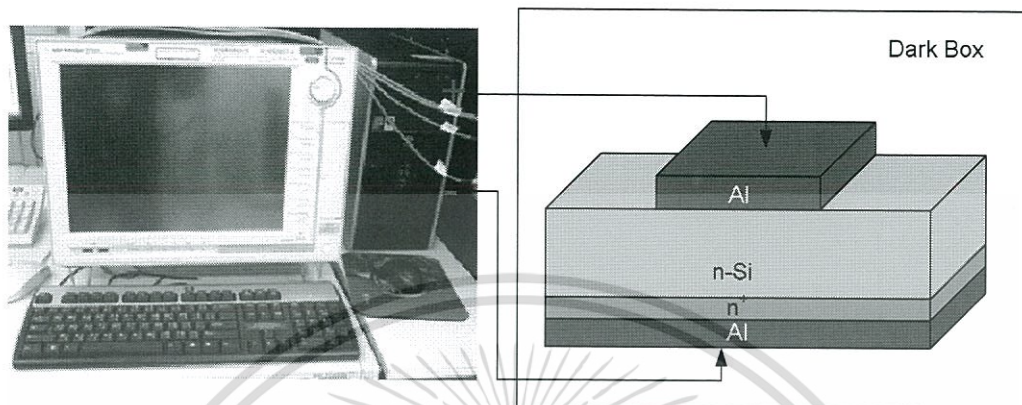
4.1.1 การศึกษาความแตกต่างของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆของซีดทกียไดโอด



รูปที่ 4.1 ชุดเครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station

การศึกษความแตกต่างของพื้นที่ขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของซีดทกียไดโอดนั้นเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบลักษณะสมบัติต่างๆของซีดทกียไดโอดที่ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าต่างกัน โดยจะทำการศึกษาลักษณะสมบัติของซีดทกียไดโอดที่มีพื้นที่แตกต่างกัน 5 ขนาด คือ 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm² โดยจะทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ลักษณะสมบัติความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุไฟฟ้า-แรงดัน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกัน ในการวัดค่าต่าง ๆ นั้นจะทำการวัดโดยใช้เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station ซึ่งจะบ่อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 ถึง 10 V ครึ่งละ 50 mV



รูปที่ 4.2 การทดลองวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของ Al/n-Si ของซีดทีกีไดโอด

4.1.2 การศึกษาความแตกต่างของรูปร่างขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลต่อลักษณะต่างๆ ของซีดทีกีไดโอด

การศึกษาความแตกต่างของรูปร่างขั้วโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของซีดทีกีไดโอดนั้นเป็นการทดลองเพื่อหาลักษณะรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างซีดทีกีไดโอด โดยจะทำการศึกษาลักษณะสมบัติของซีดทีกีไดโอดที่มีรูปร่างแตกต่างกัน 3 แบบ คือ สี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน และวงกลม โดยจะทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกัน ในการวัดค่าต่าง ๆ นั้นจะทำการวัดโดยใช้เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station ซึ่งจะบ่อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 ถึง 10 V ครึ่งละ 50 mV

4.1.3 การศึกษาคุณสมบัติของแพลตทินัมที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆ ของซีดทีกีไดโอด

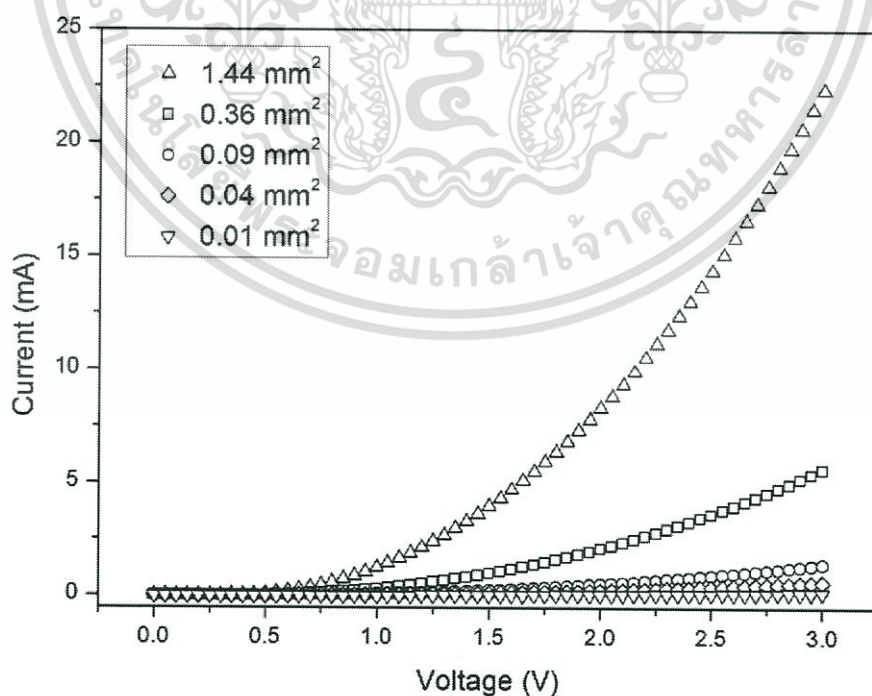
เมื่อทำการเลือกรูปร่างและขนาดที่เหมาะสมในการศึกษาลักษณะสมบัติของซีดทีกีไดโอดได้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว เราจะทำการสร้างซีดทีกีไดโอดตามเงื่อนไขดังกล่าว แล้วทำการเปรียบเทียบระหว่างซีดทีกีไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม และซีดทีกีไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยจะทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากระแสรั่วไหล (I_{leak}), แรงดันพังทลาย, แรงดันภายใน (V_{bi}), กำแพงศักย์ซีดทีกี (ϕ_{bn}), ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) และความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_D) ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกัน ในการวัดค่าต่าง ๆ นั้นจะทำการวัดโดยใช้เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station ซึ่งจะบ่อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 ถึง 10 V ครึ่งละ 50 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาความแตกต่างของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆของซีดทีอีไดโอด

4.2.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดทีอีไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si ที่มีขั้วไฟฟ้าโลหะขนาดต่างๆ

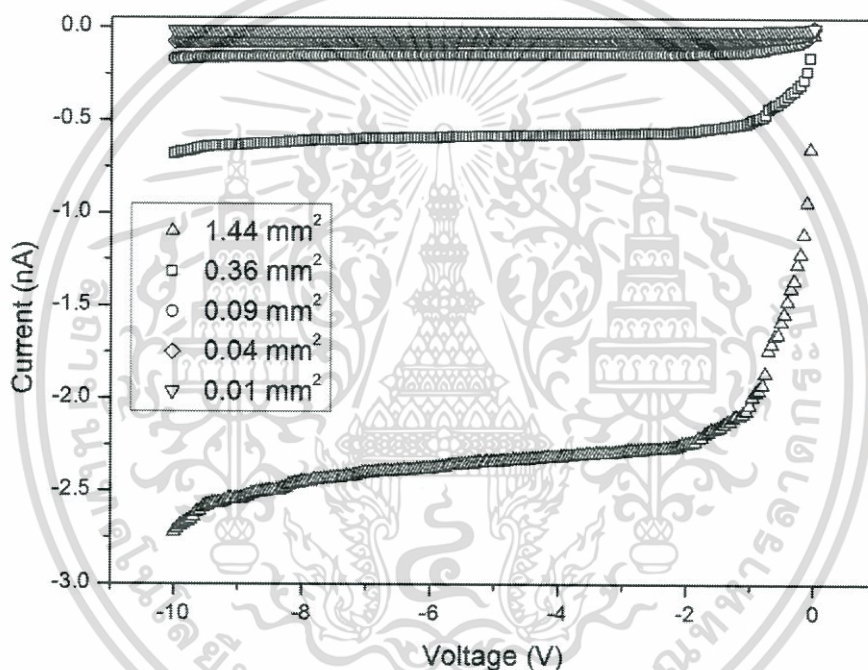
รอยสัมผัสซีดทีอีระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น (Al/n-Si) ในการทดลองนี้เป็นศึกษาผลของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าโลหะ โดยได้ออกแบบขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีพื้นที่แตกต่างกัน 5 ขนาด คือ 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm² แต่ละขนาดมีลักษณะลวดลายเป็นสี่เหลี่ยมขอบมน เมื่อทำการสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการวัดผล โดยทำการป้อนแรงดันตั้งแต่ -10 ถึง 10 V ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดทีอีไดโอดที่พื้นที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.3 เป็นกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรง จากกราฟจะพบว่ากระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของขั้วไฟฟ้าโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยสังเกตจากค่ากระแสที่แรงดันไบอัส 2 V จะพบว่ากระแสมีค่าเท่ากับ 0.06, 0.23, 0.52, 2.08, 8.30 mA ตามลำดับ โดยกระแสนั้นมีการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าตามขนาดพื้นที่ที่เพิ่มขึ้น การที่กระแสเมื่อได้รับไบอัสตรงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าโลหะนั้นเราสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.5 ซึ่งจากสมการจะพบว่ากระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงนั้น จะมีค่าขึ้นอยู่กับพื้นที่รอยสัมผัสของขั้วไฟฟ้าโลหะ



รูปที่ 4.3 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่ขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

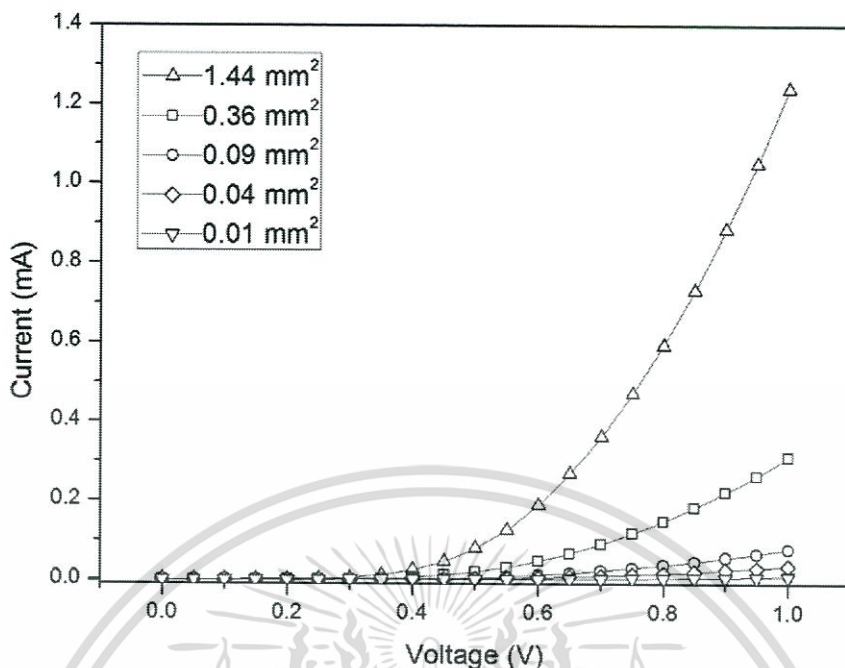
ในส่วนของกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับก็เช่นเดียวกัน เราจะพบว่าซีด็อกไซด์โอดจะมีกระแสแรงดันไบอัสย้อนกลับลดลงเมื่อพื้นที่มีขนาดเล็กลง โดยพิจารณาได้จากกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับจากรูปที่ 4.4 พิจารณาค่ากระแสที่แรงดันไบอัส -5 V พบว่ากระแสของซีด็อกไซด์โอดขนาด 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm² มีค่า 0.016, 0.065, 0.15, 0.59, 2.34 nA ตามลำดับ โดยกระแสนั้นมีการลดลงเป็นจำนวนเท่าตามขนาดพื้นที่ที่ลดลง การที่กระแสเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าโลหะนั้นเราสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.6 ซึ่งจากสมการจะพบว่ากระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนั้น จะมีค่าขึ้นอยู่กับพื้นที่รอยสัมผัสของขั้วไฟฟ้าโลหะ



รูปที่ 4.4 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่ขนาดต่างๆ

4.2.2 การทดสอบคุณสมบัติรอยสัมผัสซีด็อกไซด์โอด

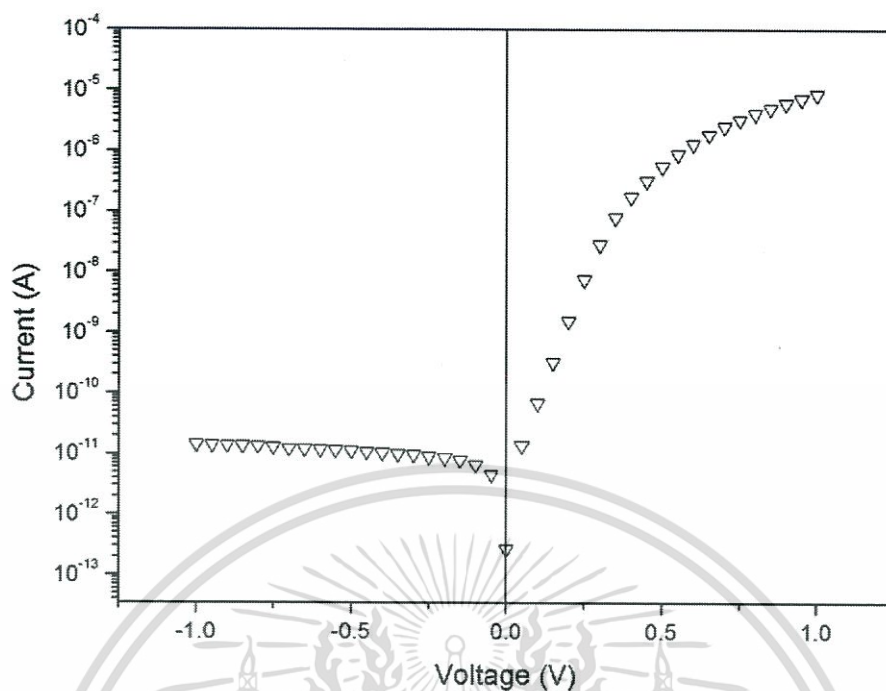
ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสซีด็อกไซด์ที่สำคัญ ซึ่งได้แก่ แรงดันภายใน (V_{bi}) และ ความสูงกำแพงศักย์ซีด็อกไซด์ (ϕ_{bn}) ซึ่งหาได้จากการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันร่วมกับการคำนวณ ซึ่งเราจะพิจารณาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสซีด็อกไซด์ในกรณีที่ได้รับแรงดันไบอัสต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



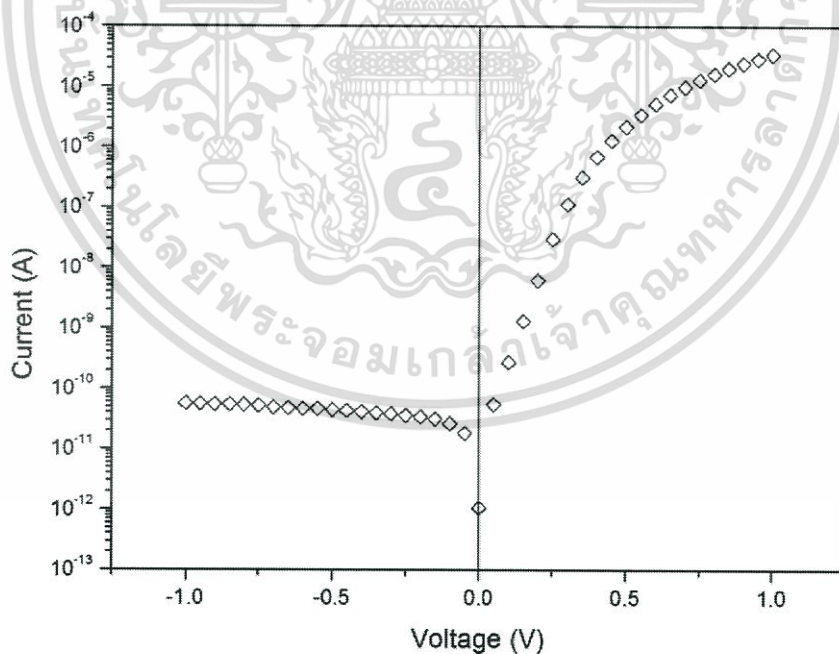
รูปที่ 4.5 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อได้รับแรงดันไบอัสต่างๆ ของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่ขนาดต่างๆ

จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็นในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าลักษณะของความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบเรกติไฟร์ หรืออาจกล่าวได้ว่ารอยสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นรอยสัมผัสขั้วตักขั้วนั่นเอง ซึ่งสามารถหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสขั้วตักขั้วนี้ได้ โดยพบว่ารอยสัมผัสขั้วตักขั้วขนาดต่างๆจะมีแรงดันภายในใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 0.4 V ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันภายในของรอยสัมผัสขั้วตักขั้วทั่วไปที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.2 - 0.4 V

ในส่วนของความสูงกำแพงศักย์ขั้วตักขั้วนั้นหาได้จากการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ร่วมกับการคำนวณ โดยการนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (แกน y) ในแบบกึ่งล็อก (semi-log) กับแรงดันไบอัส (แกน x) ในลักษณะเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 จากนั้นทำการหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_r) หรือ กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ โดยมีขนาดพื้นที่ 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm² จากจุดตัดแกนแรงดันเท่ากับศูนย์โวลต์ของกราฟด้านไบอัสตรง โดยจะได้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ 0.004, 0.02, 0.03, 0.1, 0.5 nA ตามลำดับ และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 จะสามารถหาค่ากำแพงศักย์ขั้วตักขั้ว (ϕ_{bn}) ของรอยสัมผัส Al/n-Si ขนาดต่างๆได้มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.86 eV

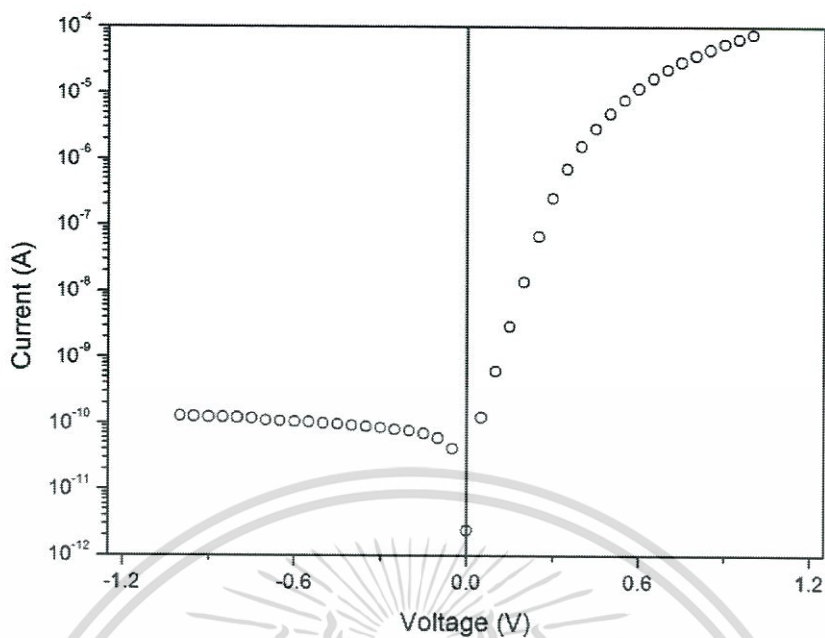


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีตทิกไซด์ขนาด 0.01 mm^2

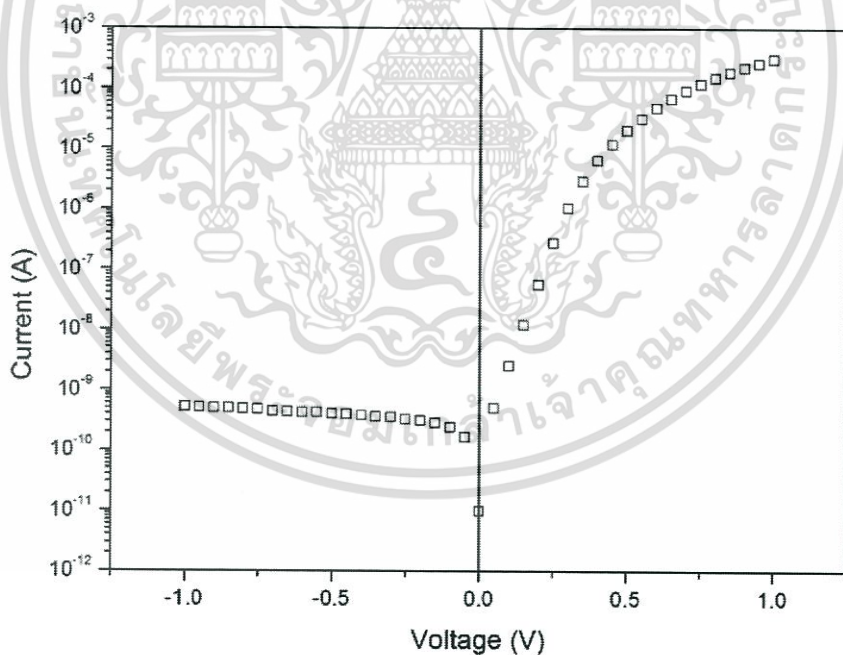


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีตทิกไซด์ขนาด 0.04 mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

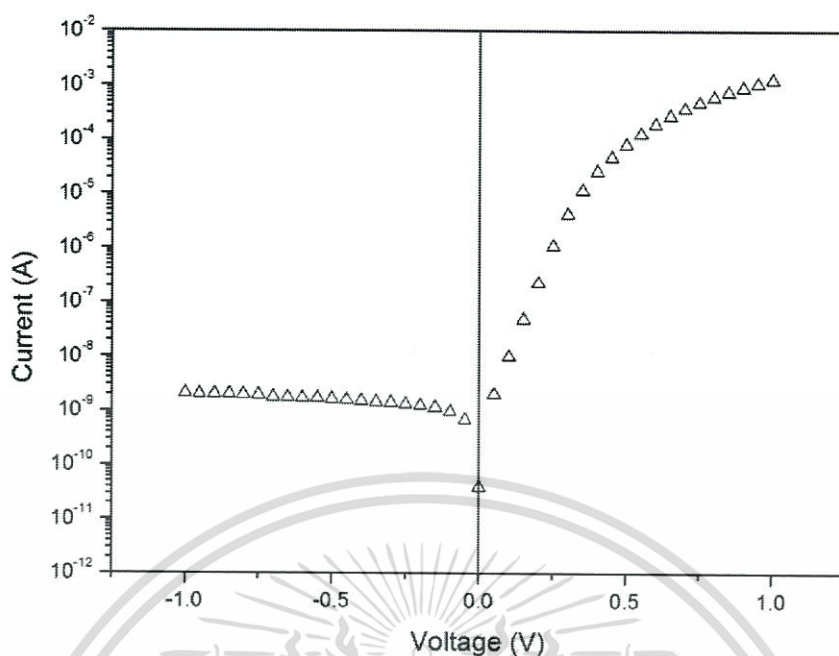


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งลึอกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีกียไดโอดขนาด 0.09 mm^2



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งลึอกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีกียไดโอดขนาด 0.36 mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดิกียไดโอดขนาด 1.44 mm^2 ความหนาแน่นกระแสมีค่าเท่ากับ

$$I = I_R \left\{ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (4.1)$$

เมื่อ $V_A = 0 \text{ V}$ เป็นผลให้ I มีค่าเท่ากับ I_R
โดย I_R คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

ดังนั้นความสูงกำแพงศักย์ซีดิกียจึงสามารถหาได้จาก

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{ART^2}{I_R}\right) \quad (4.3)$$

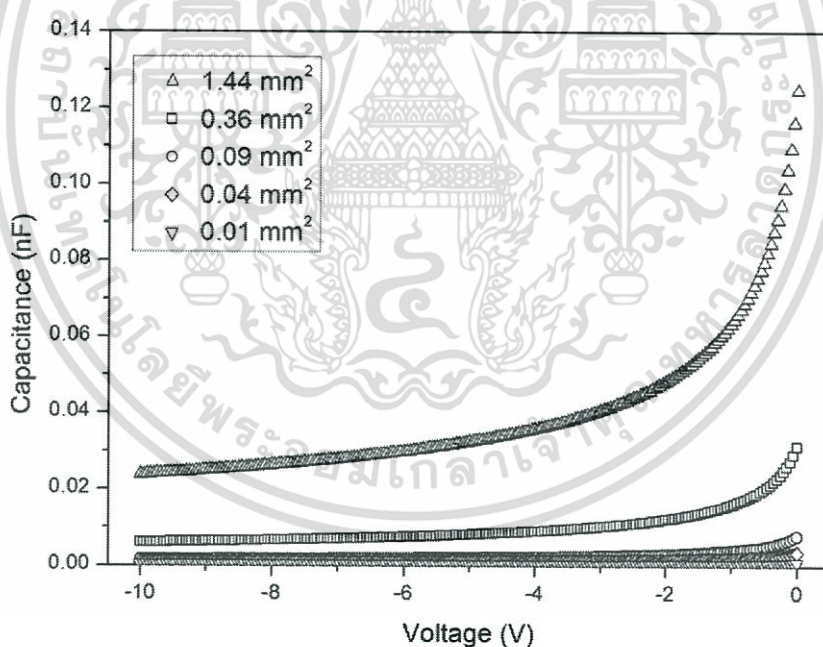
โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของโบสท์มันน์
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

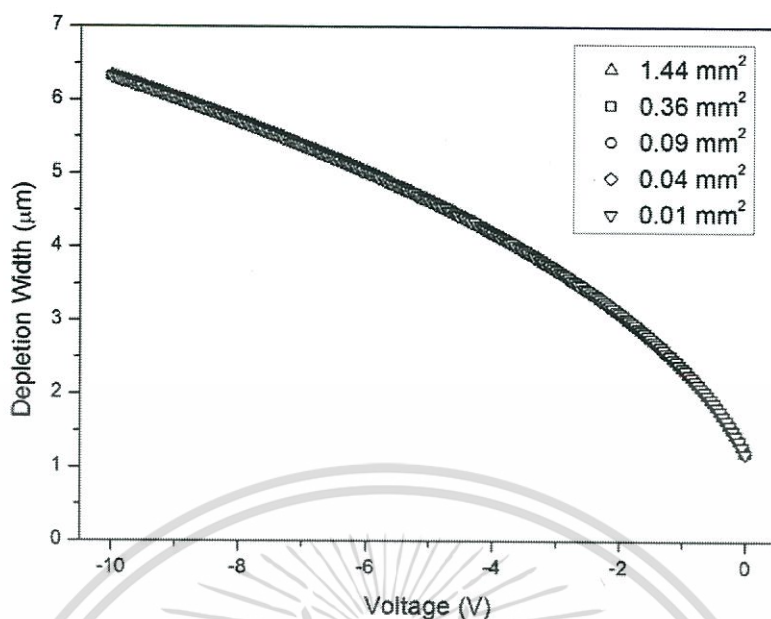
- R คือ ค่าคงตัวรีซาร์ดสัน มีค่าประมาณ $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (n-Si)
 q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

4.2.3 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีจีไดโอดที่ขนาดต่างๆ

การทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีจีไดโอด ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากแรงดันไบอัสที่มากขึ้นทำให้เกิดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง และที่แรงดันไบอัส 0 V หรือไม่ได้รับแรงดันไบอัส ค่าความจุไฟฟ้าของซีดทีจีขนาดพื้นที่ 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm^2 มีค่าดังนี้ 0.00087, 0.0035, 0.0078, 0.031, 0.125 nF ซึ่งพบว่าเมื่อซีดทีจีไดโอดมีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้น โดยเราพิจารณาได้จากสมการที่ 2.13 พบว่าค่าความจุไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่ของซีดทีจีไดโอด และเราสามารถนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะซึ่งแสดงในรูปที่ 4.12 โดยคำนวณหาได้จาก สมการที่ 2.13 เช่นกัน



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและแรงดันของซีดทีจีไดโอด



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของซีดทีอีไดโอดที่ขนาดต่างๆ

จากกราฟรูปที่ 4.12 พบว่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะของซีดทีอีไดโอดขนาดต่างๆนั้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยเมื่อเราพิจารณาที่แรงดันไบอัส -5 V พบว่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะของไดโอดแต่ละขนาดมีค่าเท่ากันคือ 4.63 μm พบว่าเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.12

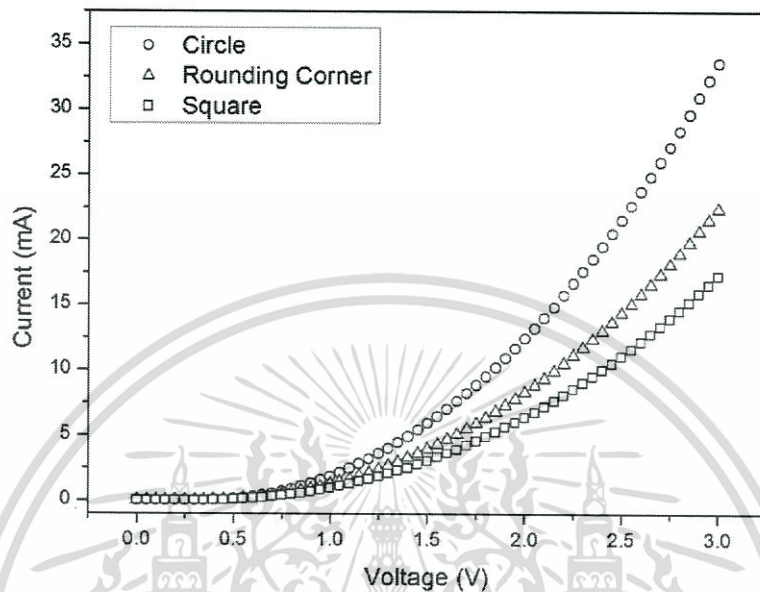
4.3 การศึกษาความแตกต่างของรูปร่างขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆของซีดทีอีไดโอด

4.3.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดทีอีไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si ที่มีรูปร่างของขั้วไฟฟ้าโลหะที่แตกต่างกัน

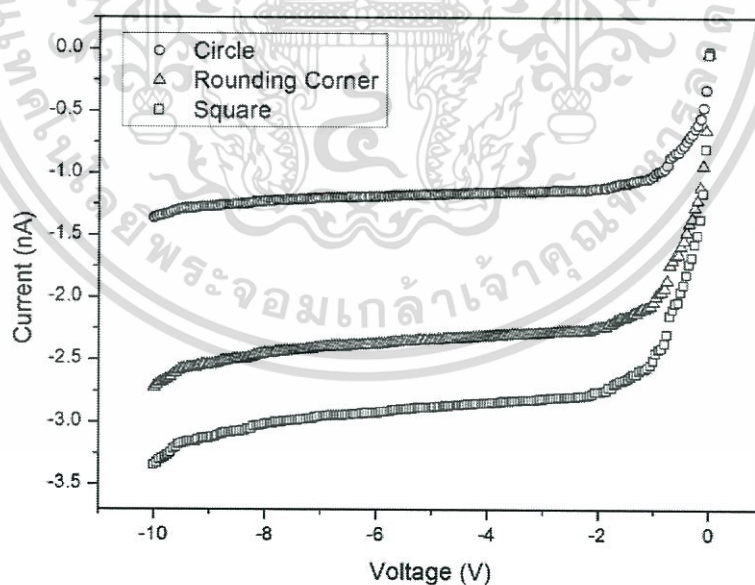
รอยสัมผัสซีดทีอีระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น (Al/n-Si) ในการทดลองนี้เป็นศึกษาผลของรูปร่างของขั้วไฟฟ้าโลหะ โดยได้ออกแบบขั้วไฟฟ้าโลหะให้มีรูปร่างแตกต่างกัน 3 ลักษณะ คือ สี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน และ วงกลม โดยซีดทีอีไดโอดทั้ง 3 ลักษณะมีขนาดเท่ากันคือ 1.44 mm^2 เมื่อทำการสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการวัดด้วยเครื่องวัด Cascade Microtech Model M150 probe station โดยทำการบ่อนแรงดันตั้งแต่ -10 ถึง 10 V ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดทีอีไดโอดที่รูปร่างแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.13 เป็นกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรง จากกราฟจะพบว่ากระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของซีตทียโดโอดข้าวไฟฟ้าวงกลมนั้นจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือสี่เหลี่ยมขอบมน และ สี่เหลี่ยมตามลำดับ โดยสังเกตจากค่ากระแสที่แรงดันไบอัส 2 V ซึ่งกระแสมีค่าดังนี้ 12.45, 8.30, 6.38 mA ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส $Al/n-Si$ ที่รูปร่างข้าวไฟฟ้าแตกต่างกัน



รูปที่ 4.14 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัส $Al/n-Si$ ที่รูปร่างข้าวไฟฟ้าแตกต่างกัน

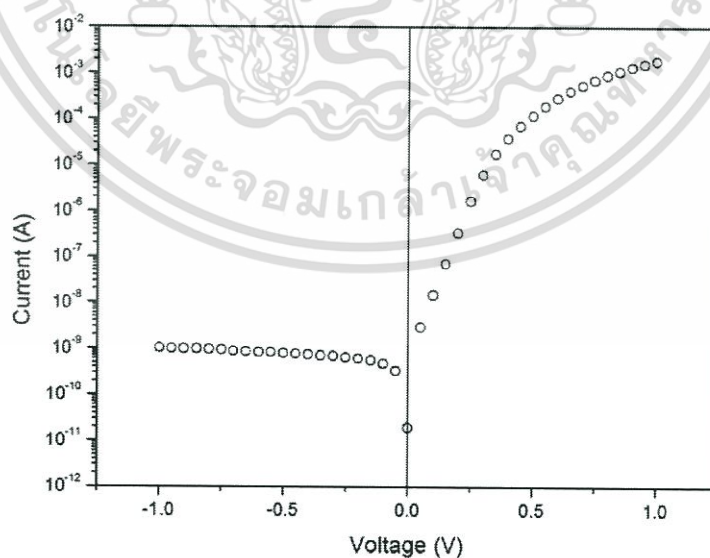
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ เราจะพบว่าซีดก็ยไดโอดซีวไฟฟ้าวงกลม จะมีกระแสแรงดันไบอัสย้อนกลับต่ำที่สุด สูงขึ้นมาคือสี่เหลี่ยมขอบมน และ สี่เหลี่ยม ตามลำดับ โดยพิจารณาได้จากกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับจากรูปที่ 4.14 พิจารณาค่ากระแสที่แรงดันไบอัส -5 V มีค่าดังนี้ 1.17, 2.34, 2.89 nA ตามลำดับ โดยผลที่ทำให้กระแสมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากสนามไฟฟ้าบริเวณมุมของซีวไฟฟ้า ซึ่งซีวไฟฟ้าสี่เหลี่ยมนั้นจะมีสนามไฟฟ้าที่มุมสูงสุด รองลงมาคือสี่เหลี่ยมขอบมน และวงกลม ตามลำดับ ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะส่งผลทำให้กระแสรั่วมีค่าสูงขึ้น

เราจะพิจารณาเลือกลักษณะรูปร่างของซีวไฟฟ้าโลหะจากค่ากระแส ซึ่งเราจะพบว่า ซีดก็ยไดโอดซีวไฟฟ้าวงกลมมีกระแสรั่วที่น้อยที่สุด สี่เหลี่ยมขอบมนรองลงมา และสี่เหลี่ยมมากที่สุด แต่เนื่องจากวงกลมนั้นใช้พื้นที่ในการสร้างเยอะแต่มีบริเวณพื้นที่ใช้งานน้อย และเพื่อความสะดวกในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์อื่นๆต่อไปเช่น ตัวตรวจจับแสง ซีวไฟฟ้าสี่เหลี่ยมขอบมนจะทำการสร้างได้ง่ายกว่า ดังนั้นจึงทำการเลือกซีวไฟฟ้าสี่เหลี่ยมขอบมนในการสร้างชิ้นงานเพื่อทดสอบในหัวข้อต่อไป

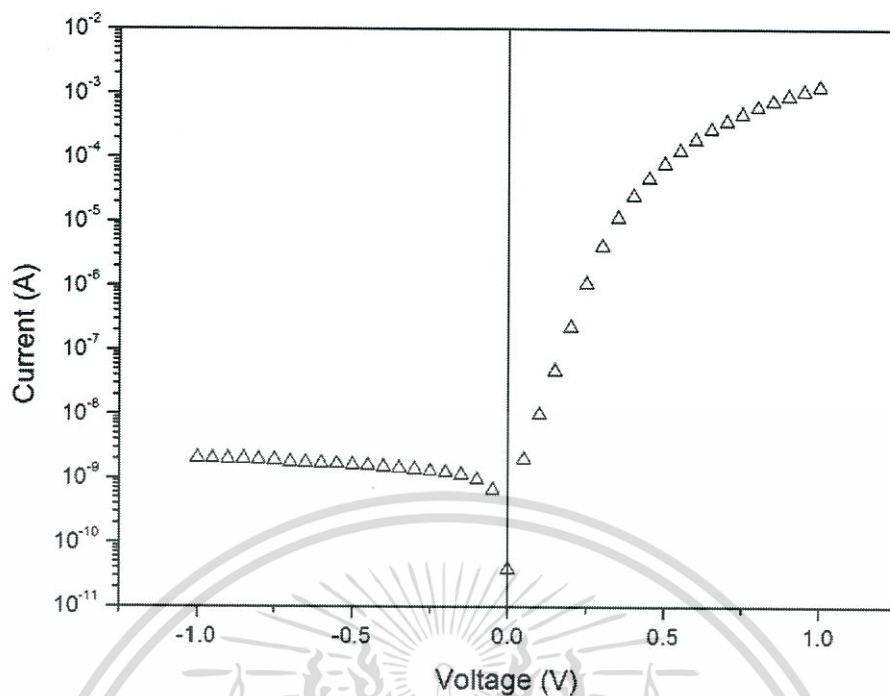
4.3.2 การทดสอบคุณสมบัติรอยสัมผัสซีดก็ยไดโอด

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสซีดก็ยที่สำคัญ ซึ่งได้แก่ความสูง กำแพงศักย์ซีดก็ย ซึ่งเราจะพิจารณาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันร่วมกับการคำนวณ [54] โดยการนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (แกน y) ในแบบกึ่งล็อก (semi-log) กับแรงดันไบอัส (แกน x) ในลักษณะเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17

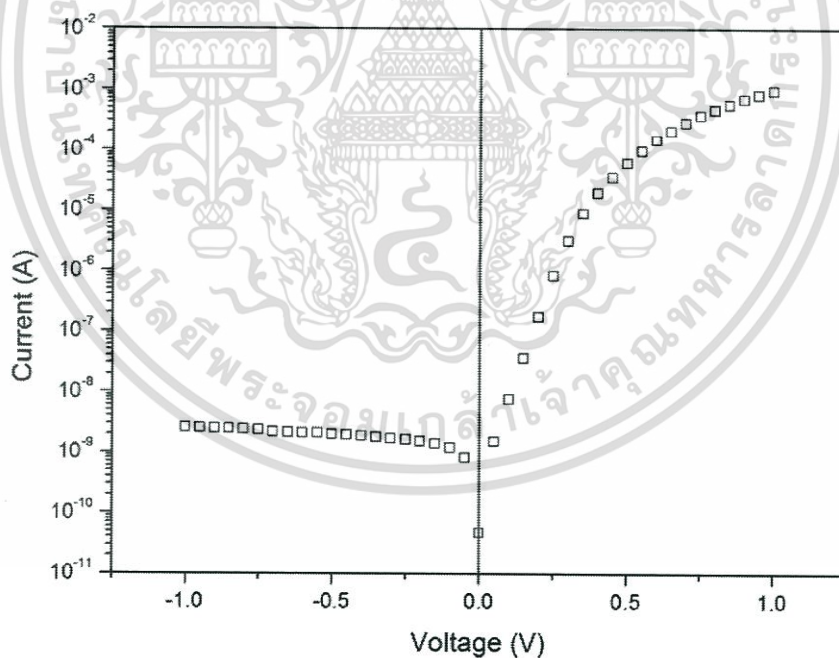


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดก็ยไดโอดลักษณะวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดลักษณะสี่เหลี่ยมขอบมน



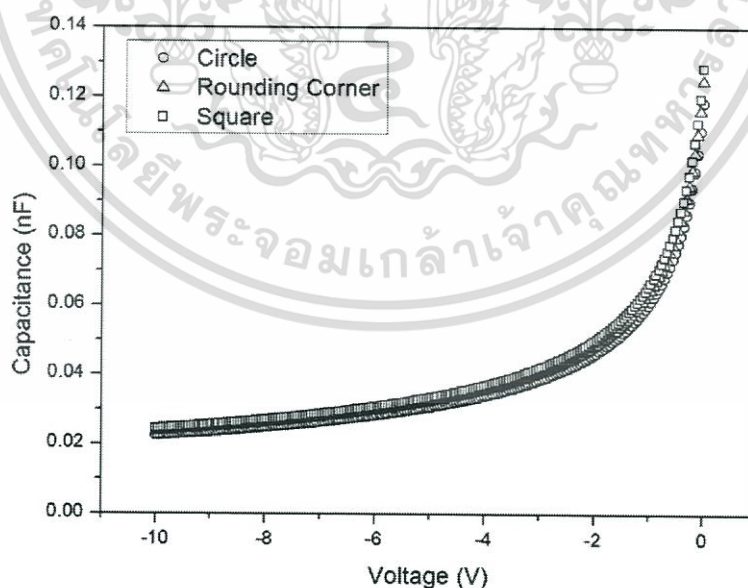
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีอีไดโอดลักษณะสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_{μ}) หรือ กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ โดยมีขนาดพื้นที่ 1.44 mm^2 เท่ากันทั้ง 3 ลักษณะ จากจุดตัดแกนแรงดันเท่ากับ ศูนย์โวลต์ของกราฟด้านไบอัสตรง โดยจะได้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของซีดทีกียไคโอดขั้วไฟฟ้า วงกลม, สี่เหลี่ยมขอบมน และ สี่เหลี่ยม มีค่าดังนี้ 0.7, 0.5, 0.4 nA ตามลำดับและจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 จะสามารถหาค่าค่าพียงศักย์ซีดทีกียไคโอดได้ค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.86 eV

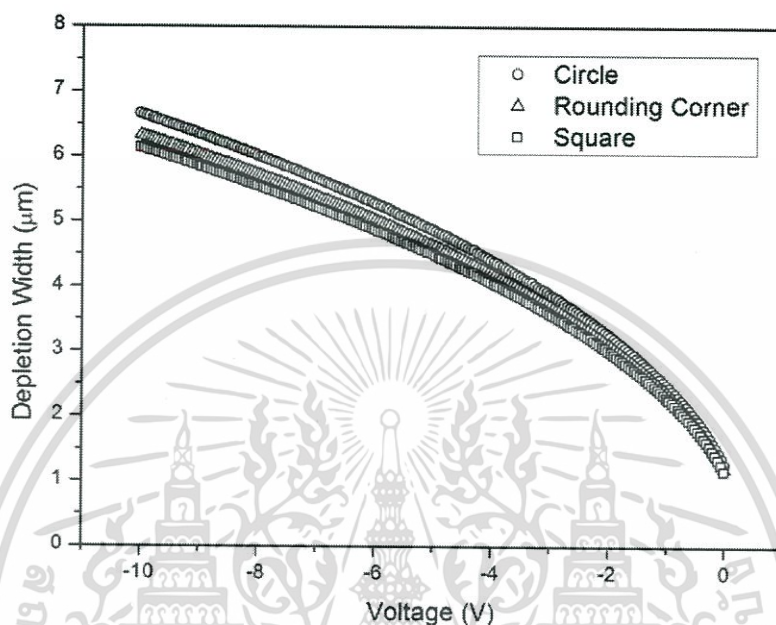
4.3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีกียไคโอดที่มีรูปร่างของขั้วไฟฟ้าโลหะที่แตกต่างกัน

การทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีกียไคโอดในการทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากแรงดันไบอัสที่มากขึ้นทำให้เกิดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง และที่แรงดันไบอัส 0 V หรือไม่ได้รับแรงดันไบอัส ค่าความจุไฟฟ้าของซีดทีกียไคโอดขั้วไฟฟ้าวงกลม, สี่เหลี่ยมขอบมน และ สี่เหลี่ยมมีค่าดังนี้ 0.119, 0.125, 0.128 nF ตามลำดับ ซึ่งพบว่าซีดทีกียไคโอดขั้วไฟฟ้าวงกลมมีค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดัน 0 V ต่ำสุด รองลงมาคือ สี่เหลี่ยมขอบมน และ สี่เหลี่ยม ตามลำดับ และเราสามารถนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะซึ่งแสดงในรูปที่ 4.19 โดยคำนวณหาได้จาก สมการที่ 2.13 เช่นกัน

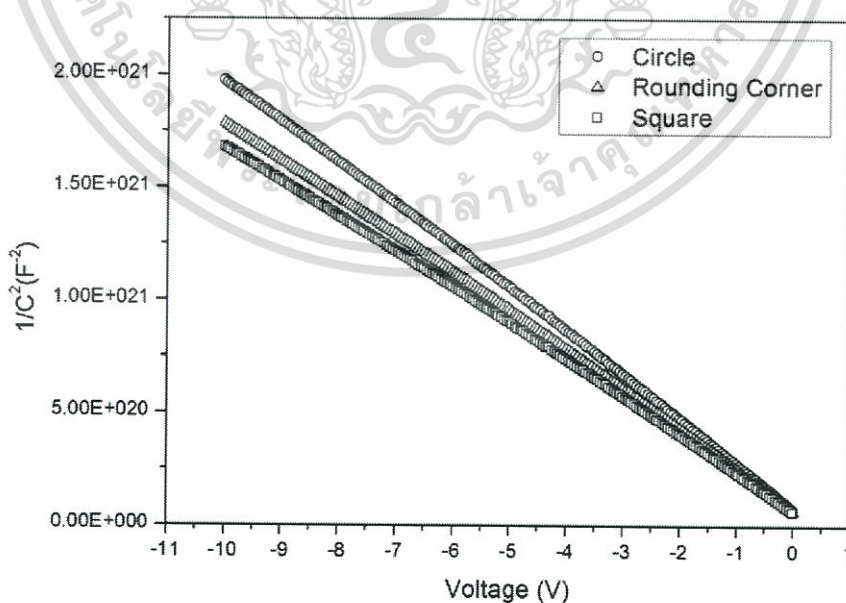


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและแรงดันของซีดทีกียไคโอดที่มีรูปร่างแตกต่างกัน

จากกราฟรูปที่ 4.19 จะพบว่า เมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.7 และค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเมื่อพิจารณาที่แรงดัน -5 V มีค่าเท่ากับ 4.87, 4.63, 4.50 μm ตามลำดับ พบว่าวงกลมมีความกว้างบริเวณปลอดพาหะมากที่สุด รองลงมาคือสี่เหลี่ยมขอบมน และสี่เหลี่ยม ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของซีดกี้อิไดโอดที่รูปร่างที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซีดกี้อิไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันที่วัดได้นั้นสามารถนำมาหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย โดยข้อเท็จจริงไดโอดนั้นมีค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) ประมาณ 0.2-0.4 V แรงดันภายในสามารถหาได้จากสมการที่ 2.13 และทำการจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการพล็อตค่า $1/C^2$ กับแรงดันไบอัส กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.20

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของไดโอด แรงดันภายในหาได้จากจุดตัดแกนแรงดัน ซึ่งค่าแรงดันภายในของข้อเท็จจริงไดโอดซิลิโคนไฟฟ้าวงกลม, สี่เหลี่ยมขอบมน และสี่เหลี่ยมมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.4 V ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันว่าไดโอดที่ได้ทำการสร้างขึ้นนี้มีคุณสมบัติเป็นข้อเท็จจริงไดโอดอย่างแน่นอน

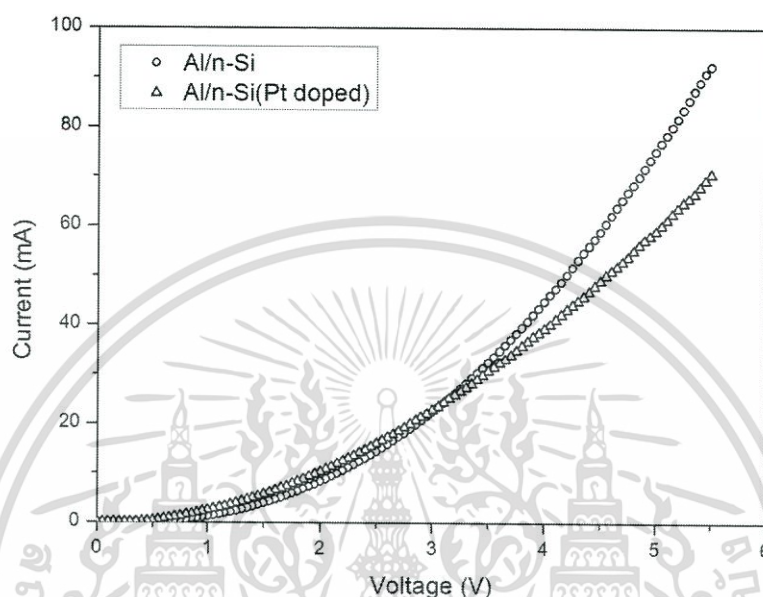
จากผลการศึกษาลักษณะของซิลิโคนไฟฟ้าที่เราจึงสรุปได้ว่าเลือกข้อเท็จจริงไดโอดสี่เหลี่ยมขอบมน ขนาด 1.44 mm^2 มาสร้างเป็นข้อเท็จจริงไดโอดที่ทำการเปรียบเทียบลักษณะของอะตอมสารเจือปนพลตทินัม เนื่องจาก ข้อเท็จจริงขนาด 1.44 mm^2 แสดงลักษณะของกระแสและแรงดันค่อนข้างชัดเจน ดังนั้นจึงทำให้สามารถสังเกตผลของกระแสได้ง่าย และที่เลือกลักษณะสี่เหลี่ยมขอบมนเนื่องจาก มีกระแสรั่วต่ำรองลงมาจากวงกลม และสามารถสร้างได้ง่าย นำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างอุปกรณ์อื่นได้สะดวก

4.4 การศึกษาคูณสมบัติของพลตทินัมที่มีผลต่อลักษณะสมบัติต่างๆของข้อเท็จจริงไดโอด

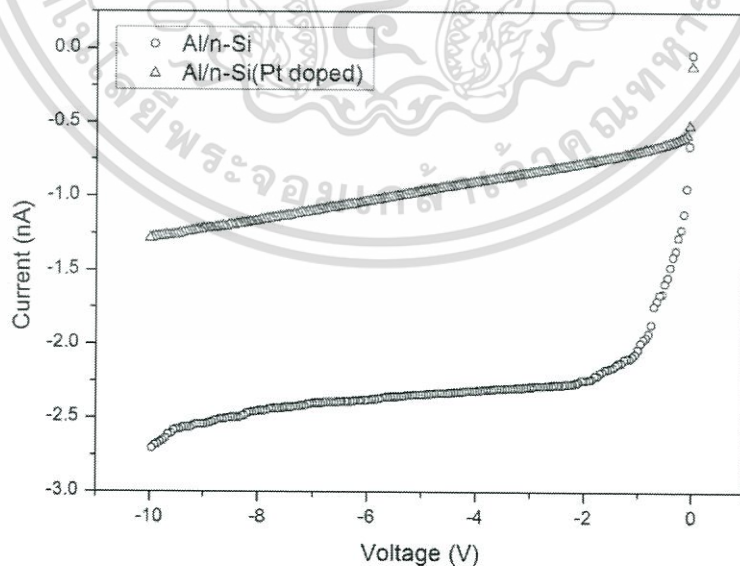
4.4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของข้อเท็จจริงไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si ที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมและที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัม

รอยสัมผัสข้อเท็จจริงระหว่างอลูมิเนียมและซิลิโคนชนิดเอ็น (Al/n-Si) ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของอะตอมสารเจือปนพลตทินัมที่มีต่อลักษณะสมบัติของข้อเท็จจริงไดโอด โดยได้ออกแบบซิลิโคนไฟฟ้าโลหะให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมขอบมน ขนาด 1.44 mm^2 เมื่อทำการสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการวัดด้วยเครื่องวัด Cascade Microtech Model M150 probe station โดยทำการบ่อนแรงดันตั้งแต่ -10 ถึง 10 V ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสตรงของข้อเท็จจริงไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัม และข้อเท็จจริงไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัม แสดงดังรูปที่ 4.21 จากกราฟจะพบว่าข้อเท็จจริงไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมนั้นจะมีกระแสต่ำกว่าข้อเท็จจริงไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมจะสังเกตได้จากกราฟที่ 4.21 ที่แรงดันไบอัส 5 V พบข้อเท็จจริงไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัม และข้อเท็จจริงไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมมีกระแสอยู่ที่ 75.15 และ 58.96 mA ตามลำดับ

การที่กระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงของซีดทีก็ไคโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลทินัมลดลงนั้นมีสาเหตุมาจากอะตอมสารเจือปนพลทินัมเข้าไปสร้างระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งระดับพลังงานนี้จะทำหน้าที่ดักจับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการรวมตัวได้มากขึ้น อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจึงลดลงทำให้กระแสมีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.21 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลทินัม และไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลทินัม

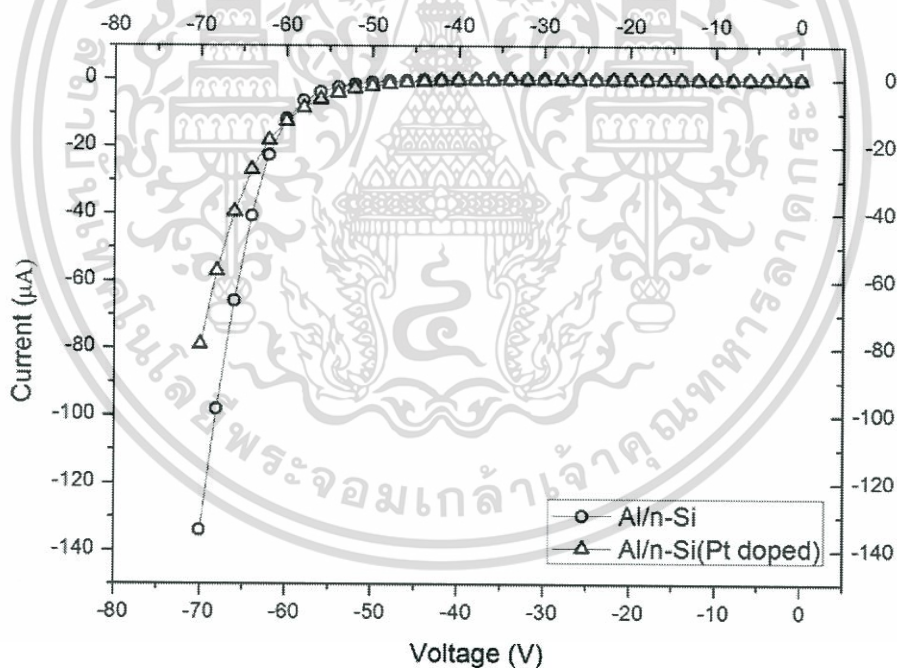


รูปที่ 4.22 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลทินัม และไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลทินัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับก็เช่นเดียวกัน เราจะพบว่าซีดกียีไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมจะมีกระแสแรงดันไบอัสย้อนกลับลดลงเมื่อเทียบกับซีดกียีไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของซีดกียีไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม โดยเราพิจารณาค่ากระแสที่แรงดันไบอัส -5 V มีค่าดังนี้ 2.34 และ 0.97 nA ตามลำดับ

โดยจะพบว่าเมื่อทำการแพร์อะตอมสารเจือแพลตทินัมลงไปส่งผลให้กระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับซีดกียีไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม ซึ่งส่งผลทำให้ซีดกียีไดโอดนั้นมีความสามารถในการสวิตซ์ที่ดีขึ้น และมีค่ากระแสรั่วไหลที่ต่ำลงอีกด้วย การที่กระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซีดกียีไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมลดลงนั้นมีสาเหตุมาจากอะตอมสารเจือแพลตทินัมเข้าไปสร้างแทรปในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแทรปนี้จะทำหน้าที่ดักจับอิเล็กตรอน ดังนั้นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากโลหะจึงมีค่าลดลง ทำให้กระแสมีค่าลดลงตามไปด้วย



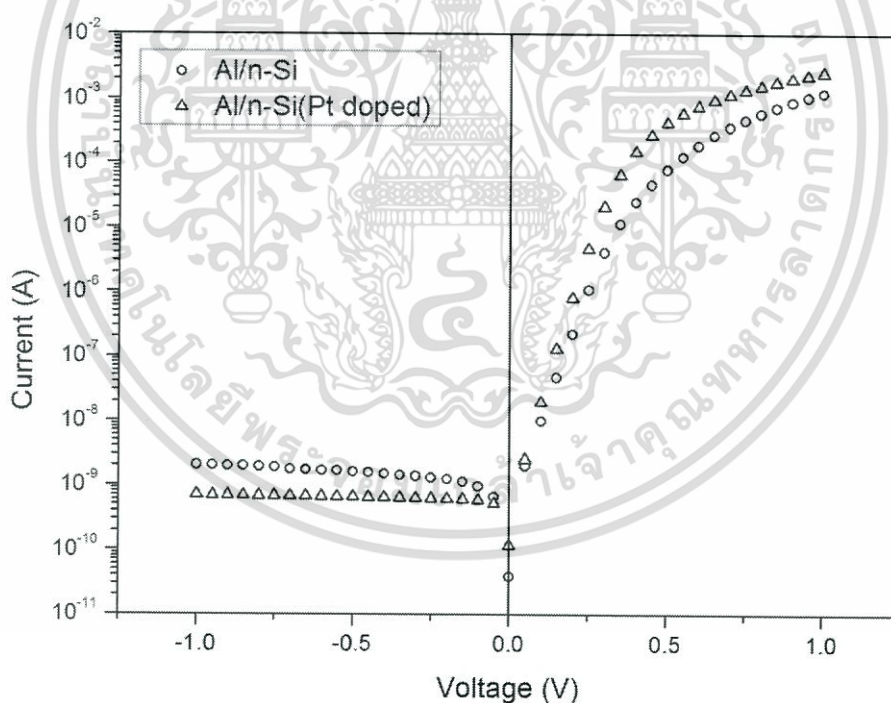
รูปที่ 4.23 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัส Al/n-Si ที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม และไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม

ต่อมาเราจะทำการวัดค่ากระแสที่แรงดันไบอัสสูงๆ เพื่อทำการหาค่าแรงดันพังทลาย (breakdown voltage) ของซีดกียีไดโอด ซึ่งแสดงดังกราฟรูปที่ 4.23 จากกราฟพบว่าซีดกียี

ไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมและซีดกียไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมนี้มีแรงดันพังทลายใกล้เคียงกันอยู่ที่แรงดันไบอัส 60 V และกระแสที่แรงดันไบอัสสูงๆ ของซีดกียที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมจะมีค่าน้อยกว่ากระแสของซีดกียไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัม

4.4.2 การทดสอบคุณสมบัติรอยสัมผัสซีดกียไดโอด

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสซีดกียที่สำคัญ ซึ่งได้แก่ความสูงกำแพงศักย์ซีดกีย ซึ่งเราจะพิจารณาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันร่วมกับการคำนวณ [54] โดยการนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (แกน y) ในแบบกึ่งล็อก (semi-log) กับแรงดันไบอัส (แกน x) ในลักษณะเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.24 จากนั้นทำการหาค่ากระแสอิมิตัวย้อนกลับ (I_0) หรือ กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ โดยมีขนาดพื้นที่ 1.44 mm² จากจุดตัดแกนแรงดันเท่ากับศูนย์โวลต์ของกราฟด้านไบอัสตรง โดยจะได้กระแสอิมิตัวย้อนกลับมีค่า 0.5 และ 0.2 nA ตามลำดับ

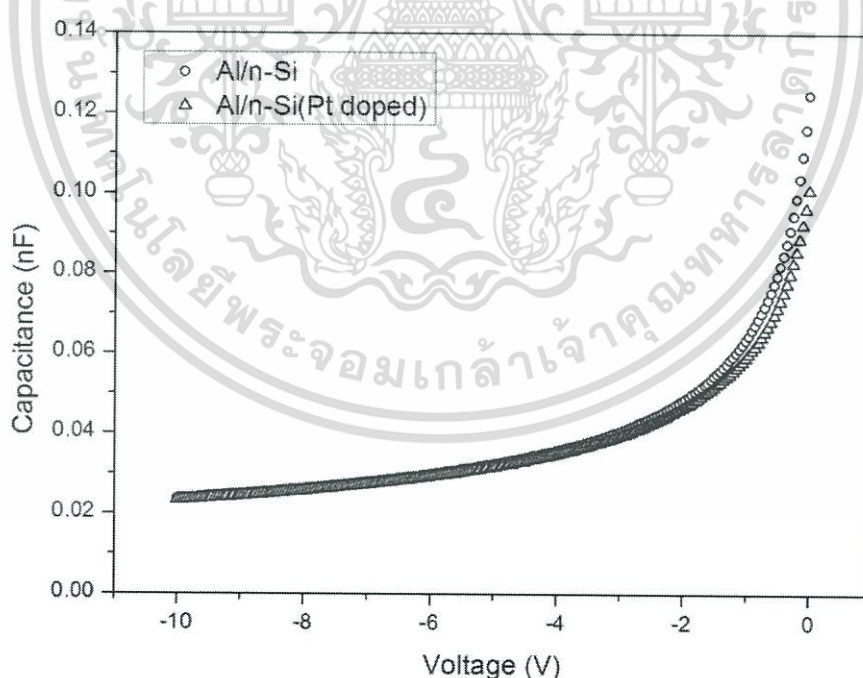


รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัสเพื่อหากระแสอิมิตัวย้อนกลับของซีดกียไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัมและไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลตทินัม

และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 จะสามารถหาค่าค่าแกงศักย์ซีดกียได้มีค่าเท่ากับ 0.86 และ 0.88 eV ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี [18] โดยค่าค่าแกงศักย์ของซีดกียไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย

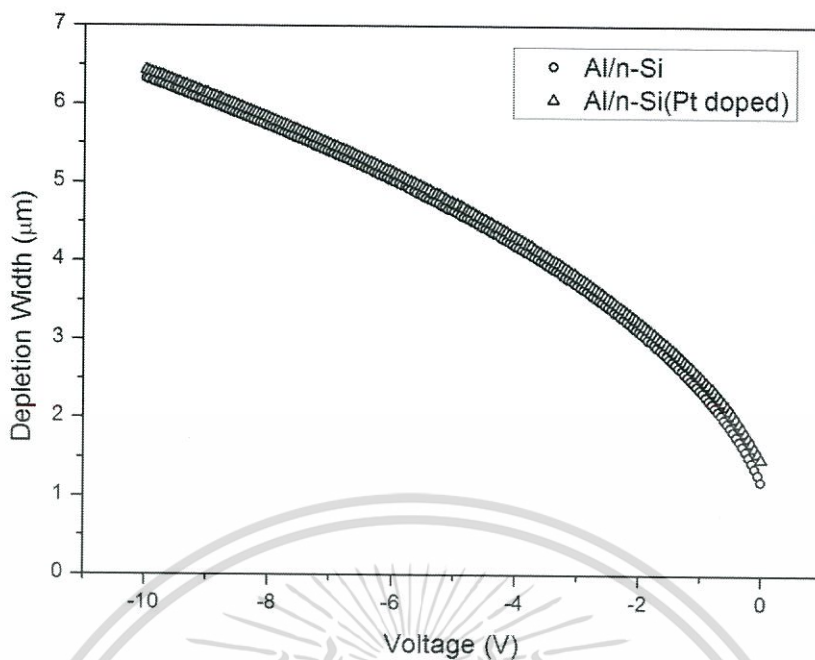
4.4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดกียไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและซีดกียไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม

การทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดกียไดโอดในการทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ จากรูปที่ 4.25 จะเห็นว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากแรงดันไบอัสที่มากขึ้นทำให้เกิดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง และที่แรงดันไบอัส 0 V หรือไม่ได้รับแรงดันไบอัส ค่าความจุไฟฟ้าของซีดกียที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและซีดกียไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม มีค่าเท่ากับ 0.125 และ 0.101 nF ซึ่งพบว่าซีดกียไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำกว่าซีดกียไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม และเราสามารถนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะซึ่งแสดงในรูปที่ 4.26 โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.13



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุและแรงดันของซีดกียไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



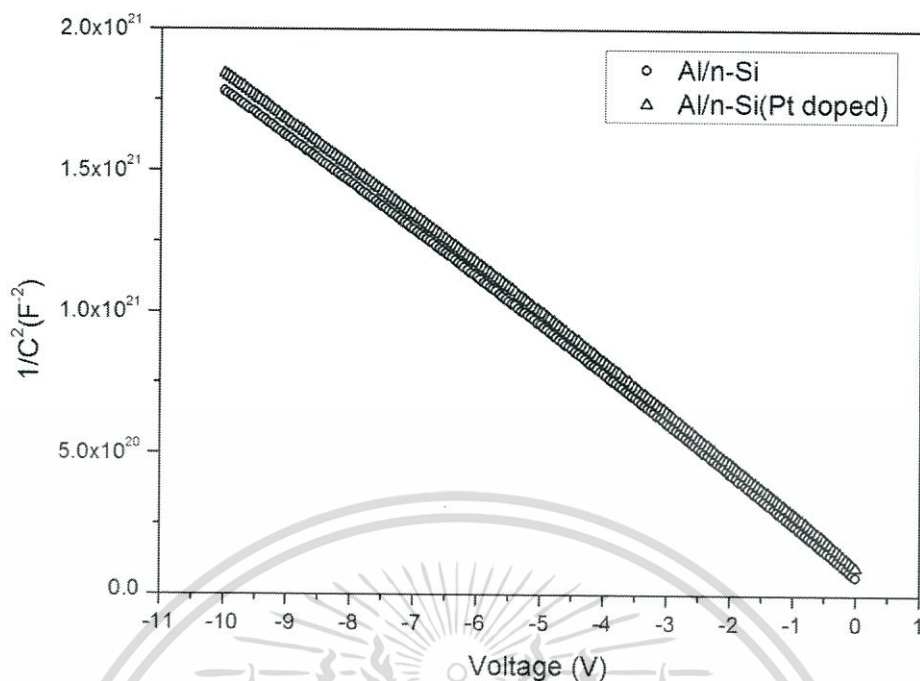
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของซีดกียไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม

จากกราฟรูปที่ 4.26 จะพบว่าค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของซีดกียไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม ที่แรงดัน -5 V มีค่าเท่ากับ 4.63 และ 4.74 μm ตามลำดับ เมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.12 และจากค่าที่ได้พบว่าซีดกียไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีความกว้างบริเวณปลอดพาหะมากกว่าซีดกียไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม

ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันที่วัดได้นั้นสามารถนำมาหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย โดยซีดกียไดโอดนั้นมีค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) ประมาณ $0.2-0.4$ V แรงดันภายในสามารถหาได้จากสมการที่ 2.13 และทำการจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการพล็อตค่า $1/C^2$ กับแรงดันไบอัส กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.27

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของไดโอด แรงดันภายในหาได้จากจุดตัดแกนแรงดัน ซึ่งค่าแรงดันภายในของซีดกียไดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม มีค่า 0.40 และ 0.42 V ค่าที่ได้จะประมาณใกล้เคียงกันคือ $0.3-0.4$ V ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันว่าไดโอดที่ได้ทำการสร้างขึ้นนี้มีคุณสมบัติเป็นซีดกียไดโอดอย่างแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซีดกีย์ไดโอด

4.4.4 การศึกษาความหนาแน่นของพาหะ เปรียบเทียบระหว่างซีดกีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือปนและซีดกีย์ไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือปน

จากผลของลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดกีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร์และถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือปนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของพาหะ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความจุไฟฟ้าตามสมการที่ 2.14 โดยความหนาแน่นของพาหะ N_D นั้นสามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟรูปที่ 4.27 ($\text{slope} = 2 / A^2 q \epsilon_s N_D$) ซึ่งความหนาแน่นของพาหะของซีดกีย์ไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือปนและซีดกีย์ไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือปนมีค่าดังนี้ 3.45×10^{14} และ $3.41 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งจะมีค่าลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ามีอะตอมสารเจือปนเข้าไปทำหน้าที่จับพาหะของอะตอมสารเจือปนอยู่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะทำการศึกษาผลของอะตอมสารเจือปนพลติทินัมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีดทีก็ไโดโอด โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ในส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของพื้นที่ และรูปร่างของขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีดทีก็ไโดโอด ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของอะตอมสารเจือปนพลติทินัมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีดทีก็ไโดโอด โดยจะทำการสร้างซีดทีก็ไโดโอดบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) สภาพต้านทานแผ่น 3-8 Ω -cm มีความหนา 625 μm

งานวิจัยในส่วนแรกนั้นจะเป็นการศึกษาผลของพื้นที่และรูปร่างของขั้วไฟฟ้าโลหะ โดยทำการออกแบบขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีขนาดแตกต่างกันดังนี้ 0.01, 0.04, 0.09, 0.36 และ 1.44 mm^2 จากผลการทดลองพบว่า กระแสแรงดันไบอัสตรงและกระแสแรงดันไบอัสย้อนกลับนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าตามขนาดพื้นที่ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของรูปร่างนั้นได้ทำการออกแบบขั้วไฟฟ้าโลหะออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้ สี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน และ วงกลม จากผลการทดลองพบว่ากระแสแรงดันไบอัสตรงของวงกลมมีค่าสูงสุด รองลงมาคือสี่เหลี่ยมขอบมน และสี่เหลี่ยม ตามลำดับ และในส่วนของกระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของ สี่เหลี่ยม มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ สี่เหลี่ยมขอบมน และวงกลมตามลำดับ จากผลที่ได้จึงพบว่าซีดทีก็ไโดโอดขั้วไฟฟ้าวงกลมนั้นมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด แต่เนื่องจากเพื่อความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงและประยุกต์ใช้กับวงจรรวมอื่นๆ ขั้วไฟฟ้าสี่เหลี่ยมขอบมนจะมีความเหมาะสมมากที่สุด ดังนั้นจึงทำการเลือกขั้วไฟฟ้าสี่เหลี่ยมขอบมนในการสร้างชิ้นงานเพื่อทดสอบในหัวข้อต่อไป

งานวิจัยในส่วนที่สองนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติของซีดทีก็ไโดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลติทินัม และซีดทีก็ไโดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลติทินัม พบว่ากระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงของซีดทีก็ไโดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลติทินัมนั้นมีค่าลดลงจาก 75.15 mA เป็น 58.96 mA ในส่วนของแรงดันไบอัสย้อนกลับนั้นพบว่าซีดทีก็ไโดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลติทินัมนั้นมีกระแสรั่วไหลลดลงจาก 2.34 nA เป็น 0.97 nA หรือต่ำกว่าซีดทีก็ไโดโอดที่ไม่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือปนพลติทินัมประมาณ 2.5 เท่า และเมื่อทำการวัดกระแสที่แรงดันไบอัสสูงๆเราจะได้ค่าของแรงดันพังทลาย ซึ่งพบว่าแรงดันพังทลายของซีดทีก็ไโดโอดทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ที่ 60 V

เมื่อพิจารณาในส่วนของค่าแรงดันภายใน และค่ากำแพงศักย์ช็อกติย ของช็อกติยไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมและช็อกติยไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมจะพบว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยค่าแรงดันภายในมีค่า 0.40 และ 0.42 V ตามลำดับ ค่ากำแพงศักย์ช็อกติยมีค่าอยู่ที่ 0.86 และ 0.88 eV ตามลำดับ

ต่อมาทำการศึกษาลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของช็อกติยไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีค่าต่ำกว่าช็อกติยไดโอดที่ไม่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม เมื่อพิจารณาที่แรงดัน 0 V มีค่าความจุไฟฟ้า 0.101 และ 0.125 nF ตามลำดับ จากค่าความจุไฟฟ้าสามารถนำมาหาค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะได้ ซึ่งพบว่าช็อกติยไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัมมีความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของพาหะ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความจุไฟฟ้าโดยความหนาแน่นของพาหะ N_D สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพาหะกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ โดยพบว่าความหนาแน่นพาหะของช็อกติยไดโอดที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม นั้นมีค่าลดลงเล็กน้อยจาก $3.45 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ เป็น $3.41 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ดังนั้นแพลตทินัมจึงมีผลทำให้ความหนาแน่นพาหะของแผ่นผลึกซิลิคอนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าแพลตทินัมที่ถูกแพร์นั้นมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณพาหะเดิมที่มีอยู่ในแผ่นผลึกซิลิคอน

จากผลการทดลองพบว่าการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมนั้นทำให้เกิดแทรกหรือจุดดักจับพาหะในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งทำหน้าที่ดักจับอิเล็กตรอนจึงส่งผลให้กระแสรั่วไหลมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ต้องการในช็อกติยไดโอด เพื่อที่จะพัฒนาเป็นตัวตรวจวัดแสงต่อไป ดังนั้นการเติมอะตอมสารเจือแพลตทินัมในปริมาณน้อยนี้จึงเป็นการปรับปรุงลักษณะกระแส-แรงดันของช็อกติยไดโอดได้อีกวิธีหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Hellings, J. Join, A. Lorenz and R. Mertens. "Al GaN schottky diodes for detector application in UV Wavelength range", **Electron Devices, IEEE Transactions on**, Vol. 56, No. 11, 2009, pp. 2833-2839
- [2] J. H. Oh, S. W. Moon, D. S. Kang, and S. D. Kim. "High-performance 94-GHz single-balanced diode mixer using disk-shaped GaAs Schottky diodes", **IEEE Trans. Electron Devices**, Vol. 30, No. 3, 2009, pp. 206-208
- [3] R. D. Harris, and A. J. Frasca. "Proton Irradiation of Silicon Schottky Barrier Power Diodes", **IEEE Transactions on nuclear science**, Vol. 53, No. 4, 2006, pp. 1995-2003
- [4] Y. J. Lin, B. C. Huang, Y. C. Lien, C.T. Lee, C.L. Tsai and H. C. Chang. "Capacitance-voltage and current-voltage characteristics of Au Schottky contact on n-type Si with a conducting polymer." **Applied Physics**, Vol. 42, No. 16, 2009
- [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] M. Valdinoci, L. Colalongo, A. Pellegrini, and M. Rudan. "Analysis of Conductivity Degradation in Gold/platinum-Doped Silicon", **IEEE Transactions on Electron Devices**, Vol. 3, No. 12, 1996, pp. 2269-2275
- [8] K.P. Lisiak, A.G. Milnes. "Platinum as a lifetime control deep impurity in silicon", **applied Physics**, Vol. 46, No. 12, 1975, pp. 5229-5235
- [9] M. D. Miller. "Limitations on the use of Platinum in power devices." **Electron Devices Meeting**. Vol. 22, 1976, pp. 491-494
- [10] M. D. Miller. "Differences Between Platinum- and Gold-Doped Silicon Power Devices", **IEEE Transactions on Electron Devices**, Vol. 23, No. 12, 1976, pp.1279-1283
- [11] B. J. BALIGA AND E. SUN. "Comparison of Gold, Platinum, and Electron Irradiation for Controlling Lifetime in Power Rectifiers", **IEEE Transactions on Electron Devices**, Vol. 24, No. 6, 1977, pp. 685-688

- [12] V. Benda. "Carrier Lifetime Control in Power Semiconductor Devices", *Physics of Semiconductor Devices*, 2007, pp. 755-761
- [13] J. Prabket, M. Saenlamool, W. Yamwong, etc. "Evaluation of Schottky barrier parameters of Al Schottky contacts on Platinum Doped n-Silicon", *ECTI-CON*, 2012, pp. 1-4
- [14] จีรวัดน์ ปราบเขต. "ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์ของซิลิคอนไดโอดหลังผ่านการเติมด้วยอะตอมแพลตินัม" วิทยานิพนธ์ของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [15] กุลวรงค์ นุตะมาน. "การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเทอร์ดิเจิต" วิทยานิพนธ์ของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [16] สุรชาติ เมืองอ่ำ. "การศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ" วิทยานิพนธ์ของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [17] สมเกียรติ ศุภเดช. *เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์*. พิมพ์ครั้งที่ 4, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [18] สุรดา เอื้อมานะพงษ์. "การศึกษาเพื่อปรับปรุงกระแสรั่วไหลต่ำของไดโอดกำลังด้วยการฉายรังสีเอ็กซ์" วิทยานิพนธ์ของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
- [19] A. G. MILNES. *Deep Impurities in Semiconductors*. A Wiley-Interscience publication Company, Inc. 1973.
- [20] E.Savitsky, V.Polyakova, N.Gorina and N.Roshan. "Physical metallurgy of platinum metals", Moscow, Mir publishers, 1978
- [21] ชาญณรงค์ สมทอง, ประภากร ชันทองดี. "ผลของอะตอมทองคำในรอยต่อ พี - เอ็น" วิทยานิพนธ์ของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [22] อนุชา เรื่องพานิช. "การศึกษา และวิจัยผลของอะตอมทองคำต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ประเภทมอยซ์" วิทยานิพนธ์ของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [23] คงกฤษณ์ ไพรวัลย์. "สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si (Au Doped)/Al" วิทยานิพนธ์ของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

- [24] 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
- [25] 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
- [26] D.K.Schroder. “Carrier lifetimes in silicon”, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-44, pp. 160, 1997
- [27] 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
- [28] V.K. Khanna. “Physical understanding and technological control of carrier lifetimes in semiconductor materials and devices: A critical and conceptual development, state of art and applications”, *Progress in Quantum Electronics*, Vol. 29, 2005, pp. 159-163
- [29] C.T. Sah, R.N.Noyce and W.Schockley. “Carrier generation and recombination in P-N junctions and P-N junction characteristics”, *Proceedings of IRE*, Vol. 45, 1957, pp. 1228-1243
- [30] จักรพันธ์ ศรียาภัย. “การศึกษาคุณสมบัติและกระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN” วิทยานิพนธ์ของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [31] M. Falah, D. Linton, J. Williamson. “Design of Schottky diode using Silvaco”, *High Frequency Postgraduate Student Colloquium*, 2002
- [32] A. Prabhakar, T.C. McGill, M-A Nicolet. “Platinum diffusion into silicon from PtSi”, *Applied Physics Letters*, Vol. 43, No. 12, 1983, pp. 1118–1120
- [33] M. Inoue, K. Hashizume, H. Tsuchikawa. “The properties of aluminum thin films sputter deposited at elevated temperatures”, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 6, No. 3, 1988 pp. 1636–1639
- [34] ศนิ กลิ่นสนิท, สุรดา เอื้อมานพงษ์, อิศระ ศรีธนะชัย, บุศรา นรารักษ์, ศุภกร จันทร์ประภา, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, นิภาพรรณ กลิ่นเงิน, อัมพร โพธิ์ไย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส- แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงรอยสัมผัสซีออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน” *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, Volume II* หน้า 1029-1032, 12-14 ธ.ค. 2555

- [35] Sani Klinsanit, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Budsara Nararug, Chaba Suriya-amaranout, Sunya Khunkhao, Surasak Niemcharoen, "Study on Schottky Diode Characteristics Improving by X-ray Irradiation" *Key Engineering Materials and Computer*, 3 4 - มีนาคม 2556



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] ศนิ กลิ่นสนิท, สุรดา เอื้อมานพงษ์, อีสระ ศรีธนะชัย, บุศรา นรารักษ์, ศุภกร จันทรประภา, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, นิภาพรรณ กลิ่นเงิน, อัมพร โพธิ์ไย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส- แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงรอยสัมผัสชนิดกึ่งบนฐานรองซิลิคอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, Volume II หน้า 1029-1032, 12-14 ธ.ค. 2555
- [2] Sani Klinsanit, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Budsara Nararug, Chaba Suriya-amaranout, Sunya Khunkhao, Surasak Niemcharoen, “Study on Schottky Diode Characteristics Improving by X-ray Irradiation” Key Engineering Materials and Computer, 3 4 - มีนาคม 2556

NEECTEC

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35
The 35th Electrical Engineering Conference

BANGKOK UNIVERSITY
THE CREATIVE UNIVERSITY

50
CREATIVITY

NECTEC
a member of NSTDA

สนับสนุนโดย

จัดการประชุมโดย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ และ
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ณ รอยัลฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา นครนายก
12-14 ธันวาคม 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส- แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงรอยสัมผัสชนิดซีลีคอน Study on the I-V Characteristics of Schottky Photodetector Base on Silicon

ศนิ กลิ่นสนิท¹, สุรดา เอื้อมานพงษ์¹, อิศระ ศรีธนชัย¹, บุศรา นารักษ์¹, ศุภกร จันทร์ประภา¹, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง¹, นิภาพรรณ กลิ่นเงิน²,
อัมพร โพธิ์ไชย², สุรศักดิ์ เนียมเจริญ¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ. ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

²ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

โทรศัพท์: 089-668-2186 E-mail:saniklin@gmail.com

บทคัดย่อ

ในบทความนี้กล่าวถึงการนำสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์มาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงชนิดซีลีคอน โดยนำอินเดียมทินออกไซด์มาสร้างเป็นขั้วโปร่งใสแทนที่อลูมิเนียมซึ่งขั้วไฟฟ้าโปร่งใสนี้จะทำให้แสงสามารถส่องผ่านลงไปยังบริเวณปลดพาหะได้ขั้วไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดกระแสไหลมากขึ้น จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวตรวจวัดแสง อินเดียมทินออกไซด์ที่นำมาใช้ทำขั้วนั้นได้จากการเตรียมด้วยวิธี อาร์เอฟสปีดเตอร์ โดยมีความหนา 230 nm มาสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงบนฐานรอง ITO/n-Si และ ITO/p-Si พบว่ารอยสัมผัสระหว่างอินเดียมทินออกไซด์ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี เป็นรอยสัมผัสแบบซีลีคอน มีแรงดันภายใน 0.2-0.4 V มีค่ากำแพงศักย์ 0.74 V และ 0.73 V ที่แรงดัน 5 V มีค่ากระแสรั่วไหล 5.03 μA และ 5.38 μA พบว่ามีคุณสมบัติความเป็นซีลีคอนไดโอดที่ดี

คำสำคัญ: อินเดียมทินออกไซด์, ซีลีคอน, ซีลีคอน, ตัวตรวจวัดแสง

Abstract

This paper reports the characteristics of Schottky photodetector with indium tin oxide (ITO) transparent electrode by replace Al with ITO. Because of the characteristics of ITO films which are transparent, The light can pass through ITO electrode to the depletion region. Therefore, photodetector has more efficiency. ITO films prepared by R.F. sputter techniques with 230 nm thickness. The thin films were fabricated on n-Si and p-Si substrate. The results from experiments show that ITO/n-Si and ITO/p-Si have good characteristics of photodetector, built-in voltage are $V_{bi} = 0.2-0.4\text{V}$. Schottky barrier of ITO/n-Si and ITO/p-Si are $\phi_{bn} = 0.74\text{V}$, $\phi_{bp} = 0.73\text{V}$. ITO/n-Si and ITO/p-Si have leakage current 5.03 μA and 5.38 μA

Keyword: Indium tin oxide, Silicon, Schottky, Photodetector

1. บทนำ

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่มีการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ในปัจจุบันมีตัวตรวจวัดแสงออกมามากมายตามท้องตลาดมากมายหลายชนิด ซึ่งมีการประยุกต์ใช้งานหลายประเภท เช่น โฟโตไดโอดรอยต่อพี-เอ็น เป็นไดโอดที่มีอัตราเร็วในการทำงานสูงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง โฟโตไดโอดแบบ PN เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้ดีและมีความเร็วในการทำงานสูง นิยมนำไปใช้งานสื่อสารด้วยคลื่นแสง โฟโตไดโอดแบบอะวาลันซ์ เป็นโฟโตไดโอดที่สามารถทนแรงดันสูงได้และมีความเร็วในการทำงานสูง เป็นต้น [1-2] จากที่ยกตัวอย่างมาจะเห็นได้ว่า โฟโตไดโอดมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง สิ่งที่ทำให้ตัวตรวจวัดแสงเหล่านี้มีลักษณะการทำงานที่ต่างกันคือฐานรอง, โครงสร้างและสารที่นำมาใช้ในกระบวนการสร้าง อุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงส่วนใหญ่มีองค์ประกอบหลักๆคือ ฐานรอง, โครงสร้างภายในของอุปกรณ์ และ ส่วนของบริเวณขั้วที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ ตัวตรวจวัดแสงในปัจจุบันนั้นมีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากแสงไม่สามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าได้ ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแก้ปัญหาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงชนิดรอยสัมผัสซีลีคอน ซึ่งเป็นไดโอดที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการสร้าง และวิเคราะห์ผลการทดลอง ส่วนประกอบหลักของไดโอดคือ ฐานรอง, โครงสร้างภายในและขั้วโลหะที่บดแสง จากการวิเคราะห์ไดโอดชนิดนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพของไดโอด ทำได้โดยเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าจากสารที่บดแสงเป็นสาร โปร่งใส เนื่องจากแสงสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าโลหะที่บดแสงได้น้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของไดโอดลดลง และอีกเหตุผลหนึ่งคือ เมื่อใช้ขั้วโลหะที่บดแสงที่มีความหนาหลายๆจะเกิดการสะท้อนและการกระเจิงของแสงทำให้แสงไม่ทะลุผ่านขั้วไฟฟ้า ตัวตรวจวัดแสงจึงใช้งานได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นเมื่อเรานำขั้วไฟฟ้าโปร่งใสมาแทนที่ขั้วไฟฟ้าที่บดแสง แสงจะสามารถทะลุผ่านอุปกรณ์ได้มากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

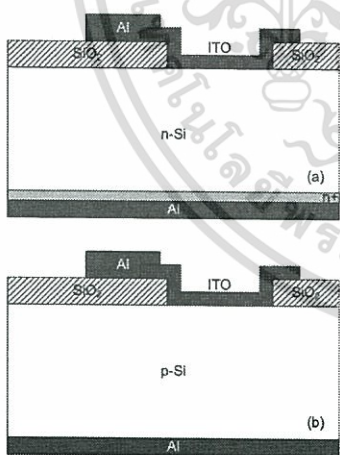
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35) 12 - 14 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยกรุงเทพและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

งานวิจัยนี้จะเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงโดยนำสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ [3-5] มาทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสแทนโลหะทึบแสง เนื่องจากมีสภาพต้านทานต่ำ จุดหลอมเหลวและการส่องผ่านแสงสูงจึงทำให้ มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาแทนขั้วโลหะทึบแสงได้ โดยคาดว่าสารอินเดียมทินออกไซด์เป็นสารโปร่งใสทำให้แสงสามารถทะลุผ่านบริเวณขั้วไฟฟ้าได้ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงได้ โดยเมื่อแสงตกกระทบขั้วโลหะทึบแสง แสงจะไม่สามารถผ่านไปได้ทำให้บริเวณปลอดพาหะได้ขั้วไม่มีการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์จึงน้อย แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสแสงจะสามารถทะลุผ่านไปยังบริเวณปลอดพาหะได้ ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดกระแสมากขึ้น จึงส่งผลให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพดีขึ้น

วิธีการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์นั้นเตรียมโดยใช้วิธีอาร์เอฟ สเปคเตอร์ (RF Sputter) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมและมีความเหมาะสมที่สามารถสร้างชั้นฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพ เนื่องจากให้ความราบเรียบ และควบคุมความหนาของฟิล์มได้ และยังเป็นวิธีที่สะดวกและไม่ยุ่งยาก หลังจาก ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si และ ITO/p-Si แล้วจึงทำการศึกษาคูสมบัติกระแส-แรงดัน เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติตัวตรวจวัดแสงและนำไปใช้งานต่อไป [6-7]

2. การเตรียมชิ้นงาน



รูปที่ 1 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสง (a) ITO/n-Si (b) ITO/p-Si

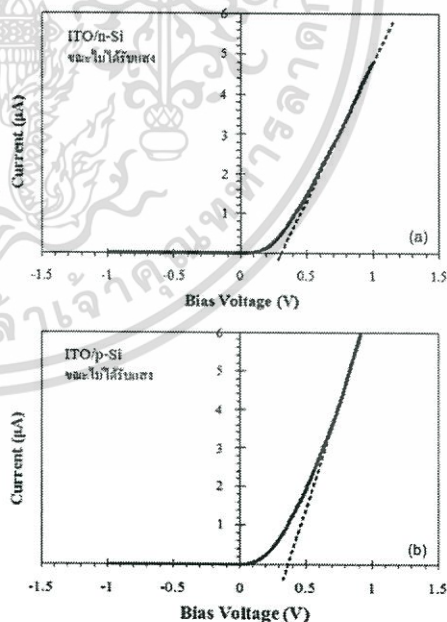
ทำการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าโลหะโดยใช้เป็นรูปวงกลม ขนาด 0.0625 mm² จากนั้นจึงออกแบบลวดลายกระจกดินแบบเพื่อใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงรอยสัมผัสชนิดซีดกี โดยจะทำการออกแบบกระจกดินแบบไว้ทั้งหมด 3 แบบ คือ Oxide Mask, ITO Mask, Al Mask จากนั้นจะทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง ในการสร้าง

ลวดลายต่าง ๆ นั้นจะใช้เทคนิคของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงนี้จะใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดทีและชนิดเอ็นระนาบ (100) มีสภาพต้านทาน 10 Ω-cm และมีความหนาประมาณ 300 μm กระบวนการสร้างเริ่มจากสร้างชั้น Oxide จากนั้นทำการแพร์สารเจือ n+ เฉพาะแผ่นเอ็น แล้วจึงสัคชั้น SiO₂ ออก จากนั้นทำการสร้างลวดลายชั้นฟิล์มบาง ITO ตามด้วยการสร้างลวดลายของอลูมิเนียม (Al) และสุดท้ายจึงทำการเคลือบอลูมิเนียมที่ด้านหลังแผ่นซึ่งไดโอดที่สร้างขึ้นเป็นชนิดแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 1 เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างชิ้นงานแล้ว จึงนำอุปกรณ์ไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อ ได้แก่ แรงดันภายใน (V_{bi}) ค่าแพนดักซ์ซีดกี (φ_n, φ_p) และกระแสมืด (I₀) โดยจะทำการป้อนแรงดันตั้งแต่ -5V ถึง 1V

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 การศึกษาลักษณะของรอยสัมผัสระหว่าง ITO/n-Si และ ITO/p-Si

จากผลการทดลองได้กราฟดังรูปที่ 2 จากกราฟพบว่ารอยสัมผัสทั้ง 2 เป็นรอยสัมผัสแบบ ซีดกี โดยรอยสัมผัส ITO/n-Si มีแรงดันภายในประมาณ 0.3 V และ รอยสัมผัส ITO/p-Si มีแรงดันภายในประมาณ 0.35 V กระแสมืดมีค่า 5.03 μA (ITO/n-Si) และ 5.38 μA (ITO/p-Si)



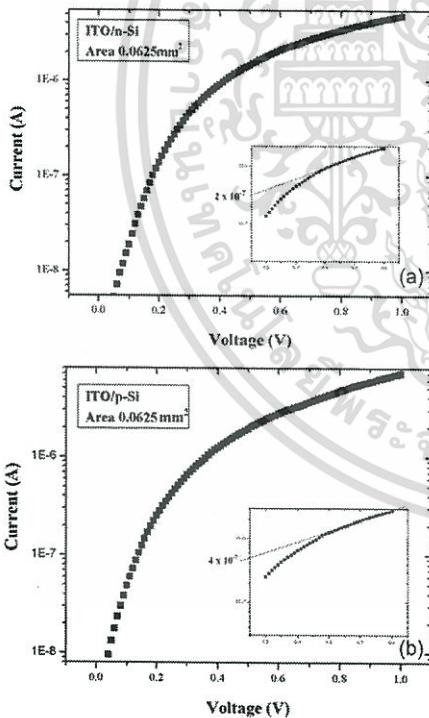
รูปที่ 2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (a) ITO/n-Si (b) ITO/p-Si

จากการทดสอบค่ากระแส-แรงดัน สามารถคำนวณความสูงของค่าแพนดักซ์ซีดกีได้ดังรูปที่ 3 จากรูปแสดงการหาค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สูงของค่าแรงศักย์ช็อคติย์กับรอยสัมผัส ITO/n-Si (ϕ_{bn}) และ ITO/p-Si (ϕ_{bp}) จากสมการที่ 1 จะเห็นว่าค่าความสูงของค่าแรงศักย์ นั้นมีผลต่อกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ของรอยสัมผัส ITO/n-Si และ ITO/p-Si ซึ่งค่า กระแสอิ่มตัวย้อนกลับหาได้จากรูปที่ 4 ซึ่งมีค่า 3.2 μA และ 6.4 μA ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณค่าความสูงค่าแรงศักย์ จะได้ $\phi_{bn} = 0.74 \text{ V}$ และ $\phi_{bp} = 0.73 \text{ V}$ จากการคำนวณหาค่า ความสูงค่าแรงศักย์นี้ จะเห็นว่าค่าความสูงค่าแรงศักย์ของรอยสัมผัส ระหว่าง ITO/n-Si เป็นรอยสัมผัสที่มีค่า $q\phi_M > q\phi_S$ ซึ่งเป็นรอย สัมผัสแบบช็อคติย์ แต่พบว่าความสูงค่าแรงศักย์ของรอยสัมผัส ระหว่าง ITO/p-Si มีค่า 0.73 V ซึ่งควรจะมิตค่า 0.38 V ($\phi_{bn} + \phi_{bp} = E_g(\text{Si})$) เกิดจากผลของ surface state ใน กระบวนการสปีดเตอร์ โดยจะเกิดชั้น SiO_2 ขึ้นอยู่ระหว่างชั้นของ ITO และซิลิคอน [8]

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{RT^2}{I_0} \right) \quad (1)$$

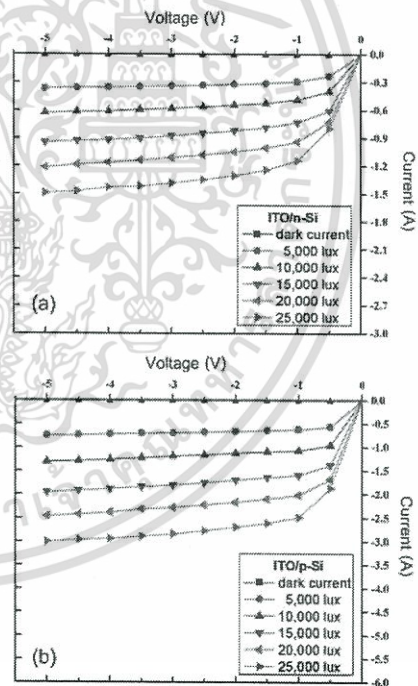


รูปที่ 3 กราฟหาค่ากระแสอิ่มตัว (a) ITO/n-Si (b) ITO/p-Si

3.2 การทดลองลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

เมื่อทำการศึกษาลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัด แสงขณะไม่ได้รับแสง สามารถคำนวณค่าแรงดันภายในของรอย

สัมผัสช็อคติย์ได้แล้ว ในการทดลองนี้จะทำการฉายแสงไปยังตัว ตรวจวัดแสง โดยใช้หลอดฮาโลเจน (Halogen lamp) กำลัง 150 W ฉายลงบนตัวตรวจวัดแสงทั้ง 2 โครงสร้างโดยมีความเข้มแสงค่า ต่างๆ ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 klux ผลที่ได้พบว่าความเข้มแสงที่ เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าทำให้กระแสแสงมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน เท่าทั้ง 2 โครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4 กระแสแสงของโครงสร้าง ITO/n-Si มีค่าสูงสุดประมาณ 1.5 mA ที่แรงดัน 5 V ความเข้มแสง 25 klux และ ส่วนโครงสร้าง ITO/p-Si กระแสแสงมีค่าสูงสุดประมาณ 3 mA ที่แรงดัน 5 V ความเข้มแสง 25,000 lux ปริมาณกระแสแสงที่ วัดได้จากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/p-Si มีปริมาณมากกว่าตัว ตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si เนื่องจากกลไกการเกิดกระแส แสงในช็อคติย์โคโอดเกิดจากพาหะส่วนน้อยซึ่งในตัวตรวจวัดแสง ฐานรองชนิดที่กระแสแสงเกิดจากพาหะส่วนน้อยคืออิเล็กตรอน เคลื่อนที่ไปยังขั้ว โลหะ และในตัวตรวจวัดแสงฐานรองชนิดเอ็น กระแสแสงเกิดจากพาหะส่วนน้อยคือโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้ว โลหะ ซึ่ง สภาพคล่องของอิเล็กตรอนนั้นมีมากกว่าโฮล ประมาณ 2 เท่า ทำให้ การเกิดกระแสแสงในตัวตรวจวัดแสงฐานรองชนิดที่สูงกว่าชนิดเอ็น

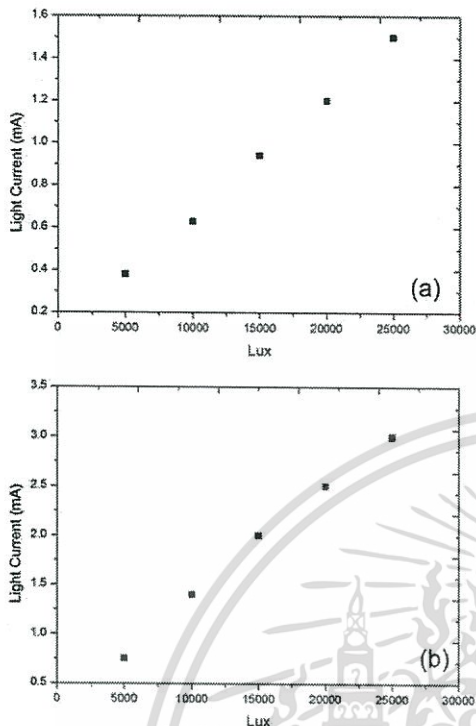


รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันที่ความเข้มแสงค่า ต่างๆ (a) ITO/n-Si (b) ITO/p-Si

ลักษณะการเพิ่มของกระแสแสงที่แรงดัน 5 V แสดงดังรูป ที่ 5 จากกราฟจะพบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงนั้นมีการ เพิ่มแบบเป็นเส้นตรงเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มแสงต่ำ กระแสแสงที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

มากขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์นี้สามารถที่จะนำไปวิเคราะห์การเกิดกระแสแสงที่ความเข้มต่ำกว่านี้หรือสูงกว่านี้ได้



รูปที่ 5 กระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ (a) ITO/n-Si (b) ITO/p-Si

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองเมื่อนำสารประกอบ ITO มาสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงขั้วไฟฟ้าโปร่งใสที่มีขั้วเป็นวงกลม มีขนาด 0.0625 mm^2 พบว่ามีกระแสรั่วไหลต่ำโดยมีค่าประมาณ $5.03 \mu\text{A}$ ที่แรงดัน 5 V (ITO/n-Si) และ $5.38 \mu\text{A}$ (ITO/p-Si) รอยสัมผัสระหว่าง ITO/n-Si และ ITO/p-Si มีค่าแรงดันภายใน 0.3 V และ 0.35 V ค่าแรงสัมผัสขั้วต่อขั้วมีค่า 0.74 V (ITO/n-Si) และ 0.73 V (ITO/p-Si) จากนั้นเมื่อนำชิ้นงานไปวัดกระแสเมื่อฉายแสงที่มีความเข้มต่างกัน พบว่าความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าทำให้กระแสแสงมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าทั้ง 2 โครงสร้าง กระแสแสงของโครงสร้าง ITO/n-Si ที่แรงดัน 5 V ความเข้มแสง 25 klux มีค่าสูงสุดประมาณ 1.5 mA และ ส่วนโครงสร้าง ITO/p-Si กระแสแสงมีค่าสูงสุดประมาณ 3 mA จากผลการทดลองทั้งหมดนี้เมื่อนำสารประกอบ ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงบนฐานรองซิลิคอนสรุปได้ว่า คุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรองชนิดนี้มีความเหมาะสมและมีคุณสมบัติดีกว่าการสร้างบนฐานรองชนิดอื่น เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรอง p-Si อิเล็กตรอนเป็นพาหะทำให้เกิดกระแสในส่วนฐานรองชนิดอื่นโฮลเป็นพาหะ ซึ่งสภาพคล่องของอิเล็กตรอนนั้นสูงกว่าโฮลส่งผลให้กระแสแสงที่ได้มีค่าสูงกว่าฐานรองชนิดอื่นถึง 2 เท่า จากผลการทดลองพบว่าเราสามารถนำ ITO มาเป็นขั้วไฟฟ้า

ของตัวตรวจวัดแสงได้ และงานวิจัยนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างและการวัดชิ้นงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ilja Goushcha, Bernd Tabbert, and Alexander O. Goushcha "Silicon PIN Photodiode Array for Medical Imaging Applications: Structure, Optical Properties and Temperature Coefficients", IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, Vol 5, 2005, pp. 2840-2844.
- [2] Hata, S., "Performance of p-i-n photodiode compared with avalanche photodiode in the longer-wavelength region of 1 to $2 \mu\text{m}$ ", Electronics Letters, Vol 13, pp. 668 – 669.
- [3] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กุศลวรรณตะมาน และ อิสระ ศรีธัญชัย, "ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วโปร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), หน้า 1201-1204, 2551.
- [4] นางสาวอุติพร เลิศสินกุล, นายฤทธิชัย คุรุมนตร และ นางสาวสุรดา เอื้อมานะพงษ์, "การศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดรีดักทีฟโดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส", คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547.
- [5] S. Jay Chey, Wei Liu, Min Yuan, and David B. Mitzi "Characterization of Indium Tin Oxide and Al-doped Zinc Oxide thin films Deposited by Confocal RF Magnetron Sputter Deposition", Photovoltaic Specialists Conference, 2009, pp. 1149-1153.
- [6] I. Srithanachai, K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemchareon and S. Supadech "Preparation and Properties Indium Tin Oxide Thin Films by RF Sputtered for Photodetectors", Advanced Material Research, Vol. 55-57, pp. 796-772, 2008.
- [7] V. Tvarozekl, I. Novotny, P. Sutta "Physical Properties of Transparent Conductive Oxides Prepared by RF Reactive Sputtering", Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, 2006, pp.169-172.
- [8] S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981



ttp trans tech publications inc.
Publishers in Science and Engineering

KEMCS 2013

**2013 2nd International Conference on
Key Engineering Materials and Computer Science**

March 3-4, 2013, Phuket, Thailand

Conference Program Guide

Co-sponsors

**Information Engineering Research Institute, USA
Trans Tech Publications Inc.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study on Schottky Diode Characteristics Improving by X-ray Irradiation

Sani Klinsanit^{1, a}, Itsara Srithanachai^{1, b}, Surada Ueamanapong^{1, c},
Budsara Nararug¹, Chaba Suriya-amaranout¹, Sunya Khunkhao²,
Surasak Niemcharoen¹

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

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

^asaniklin@gmail.com, ^bsrithanachai@gmail.com, ^cusurada@gmail.com,

Keywords: Soft X-ray annealing, Schottky diode, Built in voltage

Abstract. The effect of soft X-ray irradiation to the Schottky diode properties was analyzed in this paper. The built-in voltage, leakage current, and work function of Schottky diode were investigated. The current-voltage characteristics of the Schottky diode are measured at room temperature. After irradiation at 70 keV for 55 seconds the forward current and leakage current are increase slightly. On the other hand, the built-in voltage is decrease from the initial value about 0.12 V. Consequently, this method can cause the Schottky diode has low power consumption. The results show that soft X-ray can improve the characteristics of Schottky diode.

Introduction

Schottky contact is one of the most widely used structures in the electronics industry. Because of low built in voltage and high speed switching. These contacts are rectifying Metal-Semiconductor (MS) junctions. Their forward current consists of majority carriers injected from the semiconductor into the metal. The rectifying property of MS contact was first described by a German physicist named Walter H. Schottky since 1930s [1]. Due to their characteristics Schottky contacts are used in many applications such as voltage clamping, power supply, microwave detectors and mixer diodes [2, 3]. Low built-in voltage is a good advantage for the electronics devices because the devices can turn on at low bias voltage. Therefore, Electronics devices consume less electric energy. In general, a good Schottky diode properties would have high speed switching, low built in voltage, and low leakage current. However, fabrication process may affect the lattice defect in silicon bulk. The defect in silicon bulk can cause decreasing built-in voltage and low performance of Schottky diode which is fabricated on silicon substrate.

There are a few researches that investigate the effect of X-ray irradiation on electronic devices [4, 5]. Most of them indicated that X-ray is the cause of electronic devices degeneration. On the contrary, our experiment results show that X-ray can reduce the built in voltage and improve the performance of diode at the optimize exposure time. Besides, soft X-ray annealing use low temperature and short annealing time. Hence, this technique is a very interesting method for increasing the Schottky diode performance. In this paper presents soft X-ray technique for decrease the defect in silicon bulk. Appropriate conditions of X-ray energy and exposure time can reduce the defect in Schottky diode and also do not damage the structure of devices. The aim of this work is decrease built-in voltage of Schottky for reduce the power consumption. We have investigated the effect of electrical property of Schottky diode compared between before and after X-ray irradiation.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experiment

The Schottky diode flow process with CMOS technology at Thai micro electronics center (TMEC). First, design the electrode mask by using rounding corner electrode with area $100 \times 100 \mu\text{m}^2$. The diodes were fabricated on the $300 \mu\text{m}$ thick (111) n-type silicon substrate. The process consist of (i) deposition silicon dioxide on the substrate. (ii) dry etching the backside of substrate and implantation of phosphorous for ohmic contacts follow by a thermal annealing at $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ for 60 min (iii) dry etching the active area on the front side of wafer. (iv) Al deposition $1 \mu\text{m}$ thick on the front and the back side of substrate. The final crosssection was shown in Fig.1

After finish process the diodes were irradiated by soft X-ray with energy exposure of 50 keV for 55 sec. The devices were measure by using a HP4156B. The current-voltage (I-V characteristics) were measure on the devices with a bias voltage range of -10 to 1 V at the step of 25 mV for both reverse (V_R) and forward (V_F) voltage.

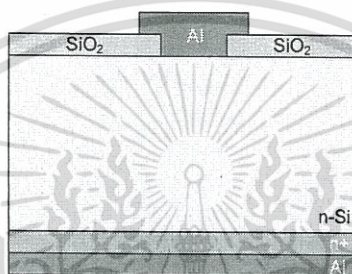


Fig.1 crosssection of Schottky diode.

Results and discussion

The results are presented in terms of current measured in reverse and forward bias. These measurements are widely used to study the behavior of devices such as leakage current, built-in voltage and work function. Fig. 2 shows the experimental semi-log forward and reverse-bias characteristics of the Schottky diodes compare between before and after X-ray irradiation. It was found that the forward current after X-ray irradiation is increased about 3 times of none X-ray irradiation.

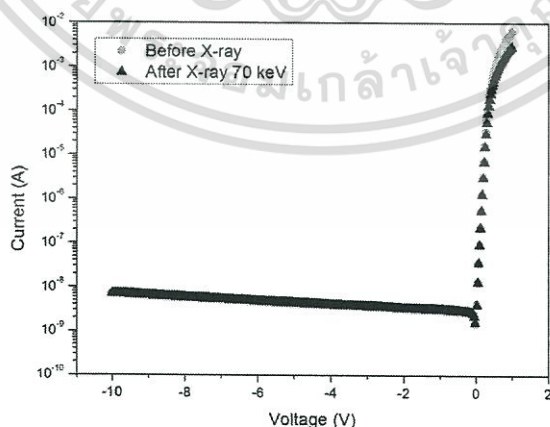


Fig.2 Semi-log I-V characteristics of Schottky diode before and after X-ray irradiation

In the case of considering at reverse current, after X-ray irradiation the reverse current is slightly decreased as shown in Fig3. The saturation current (I_0) was examined from Fig4, $I_0 = 2 \times 10^{-8}$. It shows the same value both before and after irradiation. The work function (ϕ_{bn}) is calculated from equation (1). Work function of diodes before and after irradiation are 0.64 eV

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{RT^2}{I_0} \right) \tag{1}$$

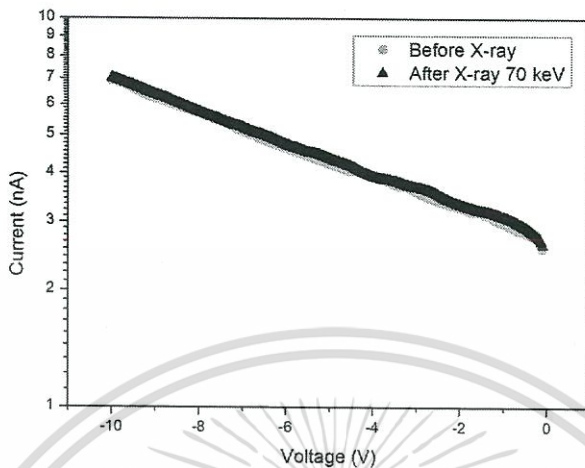


Fig.3 Reverse current of Schottky diode before and after X-ray irradiation

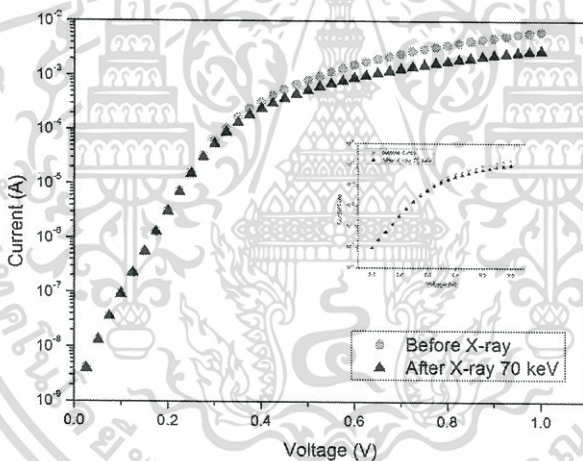


Fig.4 Semi-log forward current of Schottky diode before and after X-ray irradiation

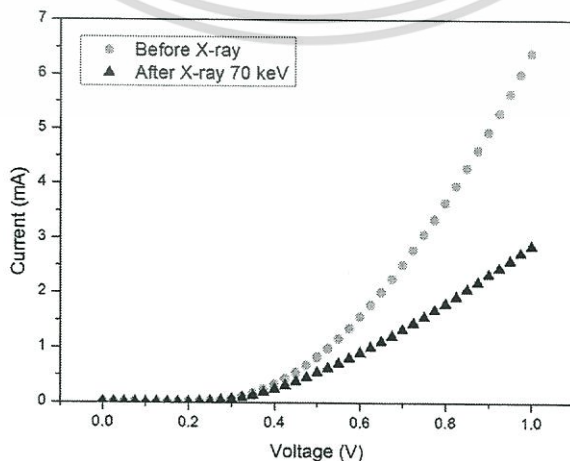


Fig.5 Forward current of Schottky diode before and after X-ray irradiation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Summary

The I-V characteristics of Schottky diode before and after X-ray irradiation were presented in this paper. The results shows that X-ray can decrease the reverse current slightly, although the forward current is increased about 3 times of non X-ray irradiation. Furthermore, the built-in voltage is decreased from the initial value about 0.12 V. The built-in voltage reduces because X-ray can damage the defect in silicon bulk. This method can cause the Schottky diode has low power consumption. The results show that soft X-ray annealing is important technique which can improve the characteristics of Schottky diode.

Acknowledgment

The fabrication work was supported by King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMTNB) for providing the X-ray exposure equipment, Thai Microelectronics Center (TMEC) for fabrication Schottky diode, National Electronics and Computer Technology Center. The authors would like to thank Thailand and Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST).

References

- [1] Information on <http://www.nndb.com/people/438/000172919/>
- [2] G. Hellings, J. Join, A. Lorenz, P. Malinowski and R. Mertens: *ALGaN schottky diodes for detector application in UV Wavelength range* (Trans. Electron Devices)
- [3] J. H. Oh, S. W Moon, D. S. Kang and S. D. Kim: IEEE Electron Device Lett, vol 30. No. 3, Mar, 2009.
- [4] Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai, 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, Surasak Niemcharoen, 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
- [7] S. M. Sze: Physics of Semiconductor Devices, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, (2007).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาว ศนิ กลิ่นสนิท
วัน เดือน ปีเกิด 19 สิงหาคม 2532
สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ 59 ซ. สุวรรณดี1 ถ. ริมคลองประปา แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ
กรุงเทพฯ 10800 โทร 0-2585-7047

ประวัติการศึกษา 2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
2.) เครื่องมือวัดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] ธนวัฒน์ ทองหนัก, สุรดา เอื้อมานพงษ์, อิศระ ศรีธัญชัย, บุศรา นรารักษ์, ศุภกร จันทร์ประภา, ศนิ กลิ่นสนิท, อัมพร โพธิ์ไย, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สมเกียรติ ศุภเดช “การสร้างฟิล์มบางอะมอर्फัสซิลิคอนด้วยเทคนิคอาร์-เอฟ สปีดเตอร์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, Volume II หน้า 1009-1012, 12-14 ธ.ค. 2555
- [2] สุรดา เอื้อมานพงษ์, บุศรา นรารักษ์, อิศระ ศรีธัญชัย, ศนิ กลิ่นสนิท, ศุภกร จันทร์ประภา, นิภาพรรณ กลิ่นเงิน, อัมพร โพธิ์ไย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาระดับพลังงานกระตุ้นของซิลิคอนไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกแพร์ด้วยแพลตทินัม” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมต้นของซิลิคิฟฟ้า ครั้งที่ 35, Volume II หน้า 1013-1016, 12-14 ธ.ค. 2555
- [3] Supakorn Janprapha, Itsara Sriphanachai, Surada Ueamanapong, Thanawat Thongnak, Sani Klinsanit, , Sunya Khunkhao, Surasak Niemcharoen, “The Effect of X-ray Irradiation on the Electrical Properties of Pt-Doped P-N Diode” Key Engineering Materials and Computer, 3 4 - มีนาคม 2556