

การสร้างโฟโตไดโอดโลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ โครงสร้างชั้นอินเตอร์ดิจิต
ร่วมกับกระบวนการผลิตซีมอส

INTERDIGITATED METAL/ SEMICONDUCTOR/ METAL PHOTODIODES
IN CMOS FABRICATION PROCESS



วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-043-012

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างโฟโตไดโอดโลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ โครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิตเทท
ร่วมกับกระบวนการผลิตซีมอส

INTERDIGITATED METAL/ SEMICONDUCTOR/ METAL PHOTODIODES
IN CMOS FABRICATION PROCESS



T110453



รัตนาวรรณ สันบุญตัน

RATTANAWAN SANBOONTAN

อพ.
ร378ก
9553

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**110453**
วัน,เดือน,ปี.....**-2 พ.ย. 2553**

b.....**1225bA20**
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-043-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**INTERDIGITATED METAL/ SEMICONDUCTOR/ METAL PHOTODIODES
IN CMOS FABRICATION PROCESS**



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

2010

KMITL-2010-EN-M-043-012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างโฟโตไดโอดโลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ โครงสร้างขั้วอินเทอร์ดิจิตเทร ร่วมกับ
กระบวนการผลิตซีมอส

Thesis Title Interdigitated Metal/Semiconductor/metal Photodiodes in CMOS Fabrication Process

นักศึกษานางสาวรัตนาวรรณ สันบุญตัน

รหัสประจำตัว 49061352

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-043-012

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช	
รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ	
ดร.อัมพร โพธิ์ไย	
รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

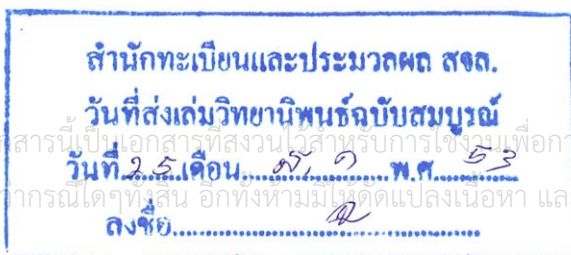
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างโฟโตไดโอดโลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ โครงสร้างชั้นอินเตอร์ดีจิตเท ร่วมกับกระบวนการผลิตซิมอส
นักศึกษา	นางสาวรัตนาวรรณ สันบุญตัน
รหัสนักศึกษา	49061352
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการสร้างและการศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสงร่วมกับกระบวนการสร้างซิมอส ตัวตรวจวัดแสงใช้รอยสัมผัส AlCuSi/n-well ที่ผ่านการซินเตอร์ริงในช่วงอุณหภูมิ 300-500°C และเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือด้วยวิธีการยิงฝัประจุ ที่ปริมาณสารเจือ 1×10^{12} และ 3×10^{12} ions/cm² พบว่าอุณหภูมิซินเตอร์ริง 400°C ให้คุณสมบัติความเป็นรอยสัมผัสช็อคติคัลที่ดีที่สุด โดยมีความสูงกำแพงศักย์ช็อคติคัล 0.71 V และ 0.674V ที่แรงดันไบอัสกลับ 2 V จะมีกระแสรั่วของรอยสัมผัสประมาณ 80 nA ความจุไฟฟ้า 5 pF และค่าแรงดันพังทลายสูงกว่า 20 V จากนั้นการทดสอบเพื่อสร้างเป็นโฟโตไดโอด MSM ที่มีขั้วอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวพบว่า อุปกรณ์ให้กระแสมืดต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแสงตกกระทบ เงื่อนไขของการสร้าง n-well และซินเตอร์ริงในกระบวนการสร้างซิมอสคือ 3×10^{12} ions/cm² 400°C โฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดีจิตเทถูกออกแบบและสร้างร่วมกับวงจรรวมซิมอส ที่แรงดันไบอัส 5 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดขนาด 1, 2 และ 3 ไมครอนให้กระแสมืด 35, 20 และ 15 μ A และกระแสแสงมีค่า 170, 145 และ 140 μ A กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงเป็นผลจากปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบลงบนโฟโตไดโอดมีมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดอาจทำให้พื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ ที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้เกิดกระแสแสง โดยกระแสแสงส่วนใหญ่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าเท่ากับ 0.526 μ m ที่แรงดันไบอัสกลับ 5 V สาเหตุที่บริเวณปลอดพาหะแคบเนื่องจากความเข้มข้นของอะตอมสารเจือมีค่ามาก จึงทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวได้น้อย ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นตามขนาดของจำนวนขั้วอิเล็กโทรด ที่ระยะห่างขั้วอิเล็กโทรด 1, 2 และ 3 μ m และมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 9, 4 และ 3 pF ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Interdigitated Metal/Semiconductor/Metal Photodiodes in CMOS Fabrication Process
Student	Ms. Rattanawan Sanboontan
Student ID	49061352
Degree	Master of Engineering
Program	MicroElectronics Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis presents the fabrication and characterization of photodetector together with CMOS fabrication process. The detector employed the AlCuSi/n-well interface with sintering temperature ranging from 300 to 500 °C and ion implantation dose of 1×10^{12} and 3×10^{12} ions/cm². It was found that sintering at 400 °C produced the optimum Schottky contact having the barrier height of 0.71 V and 0.674 V. At biasing voltage of 2 V, the junction leakage current was approximately 80 nA with junction capacitance of 5 pF and breakdown voltage more than 20 V. After that, a Metal-Semiconductor-Metal (MSM) photodiode, with single slit area, was fabricated. It was found that the device produced low dark current and responded to incident light. The conditions for fabricating were 3×10^{12} ions/cm² 400°C producing n-well and sintering in CMOS fabrication process. A MSM based photodiode with interdigitated electrodes was designed and fabricated together with CMOS circuits. At biasing voltage of 5 V, electrodes spacing of 1, 2, and 3 μm had dark current of 35, 20, and 15 μA, respectively. Similarly, photocurrents were 170, 145, and 140 μA, respectively. Photocurrent, increasing with respect to incident light intensity, was a result from greater number of photon reaching the photodiode. As a result, the rate of electron-hole pair generation was also increasing. Although larger electrode spacing might produce larger exposed area, the resulting photocurrent was mainly unaffected. This was because most of photocurrent was generated in the depletion region of photodiode. The depletion region width was only 0.526 μm at -5 V biasing. It was a result of high doping concentration, and therefore, low expansion of the region. Furthermore, the junction capacitance also decreased as the biasing voltage increasing, and increased as a function of number of electrode. At the spacing of 1, 2, and 3 μm, the junction capacitance were 9, 4, and 3 pF, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ที่ให้แนวความคิด คำปรึกษา การแก้ไขปัญหาและสนับสนุนการทำวิจัย และให้กำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ดร. อัมพร โพธิ์โย ที่ให้โอกาสในการศึกษาและให้การสนับสนุนในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่คอยช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์การวัด

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2553

ขอบคุณ ดร. ศุภนิจ คุณวิน คุณสิรพัฒน์ คุณอภิชาติ และทุก ๆ ท่านในวิทยาลัยนาโนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ

ขอบคุณคุณจิราวัฒน์ ปราบเขต คุณอิสระ ศรีธนะชัย คุณสุรดา เอื้อมานะพงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการชี้แนะการวัดชิ้นงาน

ขอบคุณทุกท่านที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านกระบวนการสร้าง รวมถึงเครื่องมือในการวัดต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอบคุณทุกท่านที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) ที่คอยให้คำแนะนำมาโดยตลอด

ขอบคุณ คุณธนิชฐ์ เมนะเนตรที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา และมารดา ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง และเป็นผู้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการเรียนมาโดยตลอด จนทำให้ข้าพเจ้ามีความสำเร็จในวันนี้ได้ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอกให้กับบิดามารดา และอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นสถานที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	5
2.1.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic contact).....	5
2.1.2 รอยสัมผัสแบบช็อตคีย์ (Schottky contact).....	6
2.1.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น.....	8
2.2 โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector).....	15
2.2.1 โฟโตไดโอดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM Photodiode).....	16
2.2.2 สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM.....	22
2.2.3 สมบัติความจุ-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM.....	23
2.3 การเจือสาร (Doping).....	25
2.3.1 การแพร่สารเจือ (Diffusion).....	26
2.3.2 การยิงฝังประจุไอออน (Ion implant).....	27
2.3.3 การแอนนัล.....	28
2.4 โฟโตไดโอด MSM ในกระบวนการสร้างชิปอส.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบ และการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 การทดสอบรอยสัมผัส	32
3.1.1 โครงสร้างรอยสัมผัส Ti/p-Si.....	32
3.1.2 โครงสร้างรอยสัมผัส AlCuSi/p-Si	33
3.1.3 โครงสร้างรอยสัมผัส Ti/n-well.....	33
3.1.3 โครงสร้างรอยสัมผัส AlCuSi/n-well	34
3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ของปริมาณสารเจือ และอุณหภูมิที่มีผลต่อรอยสัมผัสแบบชนิดกึ่ง	34
3.3 การสร้างโฟโตไดโอด MSM บนวงจรรวมซิลิคอน	35
3.3.1 การออกแบบทวดลายสำหรับสร้างโฟโตไดโอด MSM บนวงจรรวมซิลิคอน	35
3.3.2 ขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอด MSM ร่วมกับวงจรรวมซิลิคอน	36
3.3.3 การทดสอบอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	41
4.1 ผลการทดสอบรอยสัมผัส	41
4.1.1 ผลการทดสอบรอยสัมผัส Ti/p-Si.....	41
4.1.2 ผลการทดสอบรอยสัมผัส AlCuSi/p-Si	43
4.1.3 ผลการทดสอบรอยสัมผัส Ti/n-well	44
4.1.3 ผลการทดสอบรอยสัมผัส AlCuSi/n-well.....	45
4.2 ผลกระทบจากปริมาณสารเจือในบ่อเอ็น และอุณหภูมิซินเตอร์ริงของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well.....	47
4.2.1 ผลการทดลองปริมาณสารเจือและอุณหภูมิซินเตอร์ริงรอยสัมผัส AlCuSi/n-well.....	48
4.2.2 ความจุไฟฟ้าต่อแรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือ.....	58
4.2.3 การหาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือ	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการวัดคุณสมบัติของโฟโตไดโอด MSM ที่สร้างร่วมกับซีมอส	67
4.3.1 ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	67
4.3.2 ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ขณะได้รับแสงตก กระทบ	69
4.3.3 ผลการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM	72
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	74
เอกสารอ้างอิง	76
ภาคผนวก ก ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าฟังก์ชันงานของโลหะชนิดต่างๆ	9
2.2 อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity) ของสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.3 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ช็อคกีร์ระหว่างโลหะต่างๆ กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี.....	12
3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบโฟโตไดโอด MSM.....	36
4.1 ค่าแรงดันภายในและความสูงกำแพงช็อคกีร์.....	55
4.2 ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ปริมาณสารเจือค่าต่างๆ.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 บริเวณปลอดภัยประจุพาหะที่เกิดหลังหลังจากการยิงฝึงประจุ.....	3
2.1 ลักษณะรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบรอยสัมผัสโอห์มมิก	6
2.2 คุณสมบัติระหว่างกระแส และแรงดันของรอยสัมผัสโอห์มมิก	6
2.3 ลักษณะรอยสัมผัสแบบช็อคกี.....	7
2.4 แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ- สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี	7
2.5 แถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อน และหลังเกิดรอยสัมผัส.....	8
2.6 แถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อคกี หรือเกิดสภาวะสมดุลความร้อน.....	11
2.7 แถบพลังงานของรอยสัมผัสขณะได้รับแรงดัน ไปอัสตรง	12
2.8 แถบพลังงานของรอยสัมผัสขณะได้รับแรงดัน ไปอัสกลับ	13
2.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อคกีไค โอคและ ไค โอคแบบรอยต่อ พี-เอ็น	14
2.10 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยต่อช็อคกี.....	15
2.11 โฟโตไดโอด MSM	16
2.12 โฟโตไดโอดชนิด MSM โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิต	17
2.13 ภาพตัดขวางของ MSM โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิต	17
2.14 สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอด MSM.....	17
2.15 สนามไฟฟ้าภายใต้ขั้วของโฟโตไดโอด MSM	17
2.16 แถบพลังงานโฟโตไดโอด MSM ในภาวะสมดุลความร้อน	18
2.17 โฟโตไดโอด MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส.....	19
2.18 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในบริเวณปลอดภัยและบริเวณนิวทรัลเงื่อนใจ การให้แสงตกกระทบกรณีระยะห่างระหว่างขั้วกว้าง	21
2.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....	23
2.20 ความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด MSM	23
2.21 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM.....	24
2.22 การเกิดที่ว่างในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	25
2.23 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	26
2.24 การกระจายตัวของปริมาณสารเจือด้วยวิธีการแพร่และวิธียิงฝึงประจุ.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25	ขั้นตอนก่อน และหลังการอบปรับสภาพ.....28
2.26	การสร้างโฟโตไดโอด MSM บนพื้นฐานกระบวนการสร้างซิมอส.....31
3.1	โครงสร้าง Ti/p-Si.....32
3.2	โครงสร้าง AlCuSi/p-Si.....33
3.3	โครงสร้าง Ti/n-well.....33
3.4	โครงสร้าง AlCuSi/n-well34
3.5	ข้อสังเกตโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตัล.....35
3.6	ลายวงจรของซิมอส.....36
3.7	ภาพถ่ายโฟโตไดโอด MSM ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์.....39
3.8	แผนภาพอุปกรณ์วัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง.....40
4.1	การวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัส Ti/p-Si.....41
4.2	สมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส Ti/p-Si.....42
4.3	การหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส Ti/p-Si.....42
4.4	การวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัส AlCuSi/p-Si.....43
4.5	สมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/p-Si.....43
4.6	การวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัส Ti/n-well.....44
4.7	สมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสโครงสร้าง Ti/n-well.....44
4.8	การวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well.....45
4.9	สมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well.....45
4.10	การหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well46
4.11	แบบจำลองแผนภาพและวงจรภายในโครงสร้างทดสอบรอยสัมผัส AlCuSi/n-well.....46
4.12	การหาความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well ที่ ปริมาณสารเจือ 1×10^{12} ions/cm ² อุณหภูมิซินเตอร์ริง 400 °C48
4.13	การหาความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well สำหรับเงื่อนไข ปริมาณสารเจือค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 300 °C50
4.14	การหาความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well สำหรับเงื่อนไข ปริมาณสารเจือค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 400 °C50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

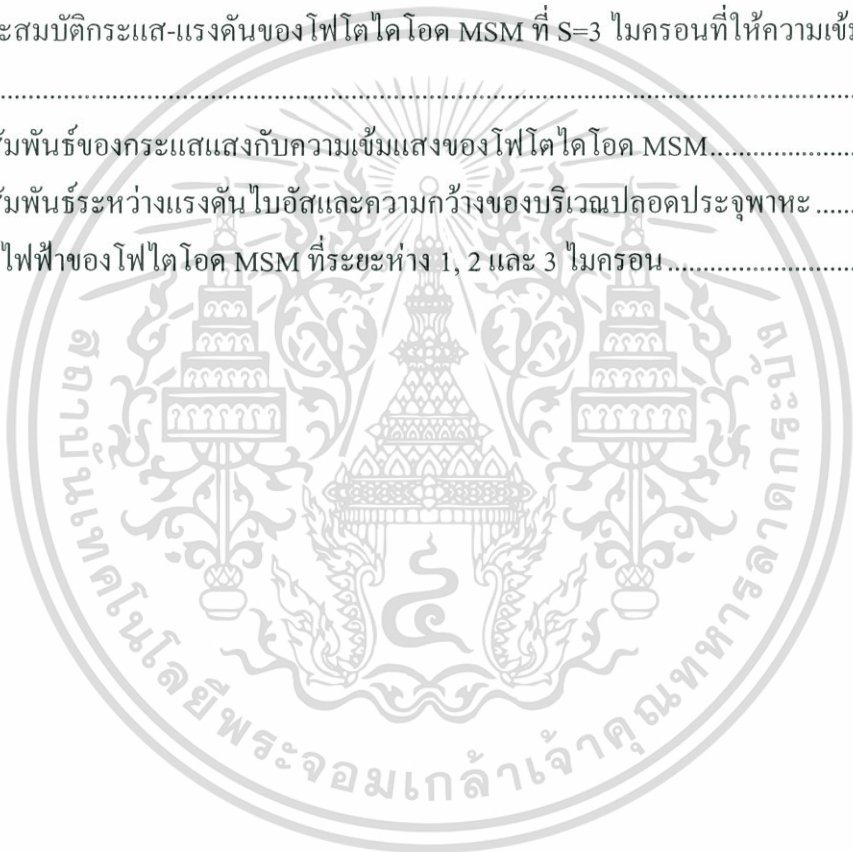
สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การหาความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well สำหรับเงื่อนไข ปริมาณสารเจือค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500 °C	51
4.16 ภาพจาก SEM ของรอยสัมผัสที่ปริมาณสารเจือ 1×10^{12} ions/cm ² ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500 °C	51
4.17 การเกิดอลูมิเนียมแพร่ไปยังซิลิกอน (Aluminium Spiking).....	52
4.18 กระแสของรอยสัมผัสขณะไบอัสตรงที่ปริมาณสารเจือค่าต่างๆ	52
4.19 กระแสของรอยสัมผัสขณะไบอัสกลับที่ปริมาณสารเจือค่าต่างๆ	53
4.20 แถบพลังงานของรอยสัมผัสและการเคลื่อนที่ของพาหะที่ความหนาแน่น อะตอมสารเจือต่าง ๆ	53
4.21 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันภายในต่อปริมาณสารเจือ	55
4.22 กราฟความสัมพันธ์ของความสูงกำแพงช็อคกีย์ต่อปริมาณสารเจือ	56
4.23 กราฟความสัมพันธ์ของความสูงกำแพงช็อคกีย์ กระแสรั่วไหลรอยสัมผัส ต่อปริมาณสารเจือ	56
4.24 ความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือที่อุณหภูมิ 400 °C 15 นาที.....	58
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C'$ กับแรงดันที่ได้จากการวัดความจุไฟฟ้า.....	59
4.26 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_D) ต่อปริมาณสารเจือ (Dose).....	60
4.27 แรงดันพังทลายของรอยสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นอะตอมสารเจือ	61
4.28 โครงสร้างทดสอบ โฟโตไดโอด MSM	62
4.29 การทดสอบโฟโตไดโอด MSM ที่มีขั้วอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว	62
4.30 กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ n-well ค่า 5.39×10^{15} atoms/cm ³	63
4.31 กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ n-well ค่า 2.53×10^{16} atoms/cm ³	63
4.32 กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ n-well ค่า 1.2×10^{17} atoms/cm ³	64
4.33 กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ n-well ค่า 2.59×10^{17} atoms/cm ³	64
4.34 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นอะตอมสารเจือ	65
4.35 ความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่น อะตอมสารเจือ.....	66
4.36 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ 1, 2 และ 3 ไมครอนขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 ความสัมพันธ์กระแสมีดกับจำนวนขั้วอิเล็กโทรคของโฟโตไดโอด MSM	68
4.38 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ $S=1$ ไมครอนที่ให้ความเข้มแสงค่า ต่างๆ.....	69
4.39 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ $S=2$ ไมครอนที่ให้ความเข้มแสงค่า ต่างๆ.....	69
4.40 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ $S=3$ ไมครอนที่ให้ความเข้มแสงค่า ต่างๆ.....	70
4.41 ความสัมพันธ์ของกระแสแสงกับความเข้มแสงของโฟโตไดโอด MSM.....	71
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสและความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะ	71
4.47 ความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด MSM ที่ระยะห่าง 1, 2 และ 3 ไมครอน	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วมาโดยตลอด และถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์มากมาย โดยเฉพาะด้านการสื่อสารทางแสง การส่งผ่านข้อมูลผ่านใยแก้วนำแสง ตลอดจนใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจรับแสง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความรวดเร็วเที่ยงตรง แม่นยำ และมีน้ำหนักเบา สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงที่สำคัญได้แก่ ตัวตรวจรับแสง ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงที่ตกกระทบ ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ในการนำอุปกรณ์ตรวจรับแสงไปใช้งานพบว่าถูกนำไปใช้ร่วมกับวงจรภายนอก เช่น วงจรขยายเป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนและสูญเสียภายในสายสัญญาณ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจรับแสงลดลง ดังนั้นหากสามารถทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจรับแสงร่วมกับวงจรที่สามารถขยายสัญญาณในตัว อาจช่วยลดปัญหาของสัญญาณรบกวน และลดการสูญเสียภายในสายสัญญาณ อีกทั้งเป็นการเพิ่มเกนการขยายสัญญาณให้กับอุปกรณ์ตรวจรับแสงอีกด้วย จึงเป็นจุดเริ่มต้นของวิทยานิพนธ์นี้คือการเริ่มต้นทำการศึกษการสร้างอุปกรณ์ตรวจรับแสงร่วมกับกระบวนการสร้างวงจรรวมของซิมอส เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจรับแสงในวงจรรวม โดยทำการศึกษานิดของตัวตรวจรับแสงจากกลุ่มของโฟโตไดโอด เพื่อทำการเลือกชนิดของโฟโตไดโอดสำหรับศึกษาสร้างร่วมกับวงจรรวมซิมอส โดยชนิดของโฟโตไดโอดมีดังนี้ พีเอ็นโฟโตไดโอด, พินโฟโตไดโอด, อวาแลนซ์โฟโตไดโอด และ เอ็มเอสเอ็มโฟโตไดโอด (MSM) [1] และจากโครงสร้างของโฟโตไดโอดทั้ง 4 ชนิดพบว่าโฟโตไดโอด MSM มีความเหมาะสมสำหรับสร้างร่วมกับวงจรรวมซิมอส เนื่องจากมีโครงสร้างง่าย และลักษณะการสร้างเป็นแบบพลาแนร์ เมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ พบว่าลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง (Vertical) ซึ่งมีความซับซ้อนในการสร้างมากกว่า

โฟโตไดโอดชนิดเอ็มเอสเอ็ม (Metal Semiconductor Metal:MSM) เป็นโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างประกอบด้วย รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสองรอยสัมผัส โดยทั้งสองรอยสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกี 2 รอยสัมผัสต่อแบบหันหลังชนกัน [2] โฟโตไดโอดชนิดนี้ได้รับความสนใจอย่างมาก และคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในอนาคตอันใกล้นี้ เนื่องจากโฟโตไดโอดชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ให้กระแสมีคต่ำ, ความจุไฟฟ้าต่ำ, สภาพการตอบสนองที่ดี และทำงานด้วยความเร็วสูง อีกทั้งกระบวนการสร้างน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการสร้างของโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบวนการสร้างโฟโตไดโอด MSM ร่วมกับกระบวนการสร้างวงจรมือส เทคโนโลยี 0.8 ไมครอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ และทฤษฎีของโฟโตไดโอด MSM ศึกษาการรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ
2. ศึกษาการรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ แบบต่างๆ
3. ศึกษาการรอยสัมผัสที่ได้รับผลกระทบจากปริมาณสารเจือในบ่อเอ็น และอุณหภูมิซินเตอร์ริง
4. ศึกษาการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ร่วมกับกระบวนการสร้างซีมอส
5. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แบบขั้วอินเตอร์ดิจิตที่เงื่อนไขต่างๆ คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว และจำนวนขั้ว

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

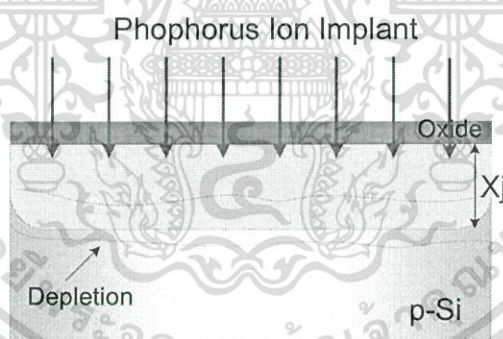
เมื่อพิจารณาโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีโครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิต จากลักษณะโดยทั่วไป ให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีคือกระแสรั่ว และความจุไฟฟ้าต่ำ สมบัติทางกระแส-แรงดันและความจุ-แรงดันมีความสมมาตรกัน ทั้งแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ส่วนกระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น โดยกระแสแสงที่ได้ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส, พื้นที่ในการรับแสง, ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เป็นต้น จากผลงานวิจัยโฟโตไดโอดชนิดเอ็มเอสเอ็มภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมาเป็นการศึกษาวิจัยโฟโตไดโอด MSM ที่สร้างบนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นแล้วให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสแบบช็อคกี และให้คุณสมบัติในการตรวจรับแสงได้ดี

จึงมีแนวคิดในการสร้างโฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิต (Interdigitated) ร่วมกับกระบวนการสร้างซีมอส เนื่องจากการสร้างซีมอสใช้แผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยการสร้างโฟโตไดโอด MSM สามารถสร้างได้ทั้งบริเวณ p-Substrate, บริเวณ p-well (ซึ่งเป็นบริเวณของ nmos) หรือบริเวณ n-well (ซึ่งเป็นบริเวณของ pmos) ก็ได้ แต่ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณ p-substrate และบริเวณ p-well เป็นบริเวณเดียวกัน การใช้งานจำกัด เนื่องจากเป็นบริเวณที่ต้องต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งบริเวณ n-well เป็นบริเวณที่อิสระจากอุปกรณ์อื่นๆ ดังนั้นจึงทำการพิจารณาเลือกบริเวณ n-well พิจารณาสำหรับสร้างโฟโตไดโอด MSM การสร้าง n-well ทำได้โดยยิงฝังประจุฟอสฟอรัสที่ปริมาณสารเจือต่ำลงบนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้เกิดเป็นบริเวณบ่อเอ็น (n-well) สัมผัสกับโลหะอลูมิเนียมอัลลอยกลายเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกีนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากปริมาณสารเจือค่าสูงจะทำให้เกิดรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกซ์ขึ้น ที่ปริมาณสารเจือค่าสูงผลให้ค่าแรงช็อคก็ยมีค่าสูงกว่าที่ปริมาณสารเจือค่าสูง เนื่องจากปริมาณสารเจือค่าสูงค่าแรงช็อคก็จะมีค่าลดลง ซึ่งมีผลให้พาหะสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสได้ปริมาณมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดสอบหาเงื่อนไขของปริมาณสารเจือ ที่เหมาะสมสำหรับสร้างอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM ร่วมกับการสร้างวงจรรวมชิมอส โดยทำการออกแบบลวดลายให้มีขนาดเล็กเพื่อลดพื้นที่บนชิ้นงาน ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีความจุไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลต่ำ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากสมมติฐานที่ได้กล่าวข้างต้น การยิงฝังประจุด้วยอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสบนสารกึ่งตัวนำชนิดพี เพื่อต้องการให้บริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณเอ็นเกิดขึ้นทำได้โดยการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสที่พลังงานสูง และอบปรับสภาพเป็นเวลานาน เพื่อให้อะตอมของฟอสฟอรัสแพร่ลึกลงไป เนื่องจากป้องกันการรบกวนจากบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและบริเวณที่ยิงฝังประจุให้เป็นชนิดเอ็น [3] ดังรูปที่ 1.1 เป็นแผนภาพจำลองความลึกของสารเจือจากการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสบนสารกึ่งตัวนำชนิดพี



รูปที่ 1.1 บริเวณปลอดประจุที่เกิดขึ้นหลังจากการยิงฝังประจุ

การเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด MSM ทำโดยออกแบบให้อุปกรณ์มีขนาดเล็ก เพื่อลดผลของความจุไฟฟ้า และลดกระแสรั่วของรอยสัมผัส อีกทั้งการลดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขยายออกจากขั้วที่ได้รับแรงดันไบอัสกลับ (ขั้วแคโทด) กล่าวคือบริเวณปลอดพาหะขยายครอบคลุมบริเวณรับแสง และเมื่อให้ความเข้มแสงและให้แรงดันไบอัสแก่โฟโตไดโอด MSM เพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล ในบริเวณปลอดพาหะ คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าแรงไปยังขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดเป็นกระแสไหลสู่อุปกรณ์ ส่งผลให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้น และค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าผกผันกับบริเวณปลอดพาหะกรณีให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์มากขึ้น จะส่งผลให้ความจุที่บริเวณรอยต่อมีค่าลดลง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีของโฟโตไดโอดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM Photodiode) โดยศึกษาการสร้างโฟโตไดโอด MSM ร่วมกับวงจรรวมซิมอสเทคโนโลยี 0.8 ไมครอนของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบคุณสมบัติรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ ทดสอบรอยสัมผัสชนิดที่ 2 จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในบ่อเอ็น (n-well) ด้วยวิธียิงฝัประจุอออน และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซินเตอร์ริงของรอยสัมผัส จากนั้นออกแบบโฟโตไดโอด MSM ลวดลายขั้วแบบอินเตอร์ดิเจนท์ที่เงื่อนไขต่างๆ เช่นระยะห่างระหว่างขั้ว และจำนวนขั้วอิเล็กโทรดเป็นต้น จากนั้นทำการสร้าง โฟโตไดโอดร่วมกับการสร้างวงจรรวมซิมอส โดยโฟโตไดโอด MSM ถูกสร้างเพียงไม่กี่ขั้นตอนในกระบวนการสร้างซิมอส จากนั้นนำอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่น กระแสแรงดัน, ความจุแรงดัน และทดสอบคุณสมบัติทางแสงภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบบนจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัยและขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ และทฤษฎีพื้นฐานของโฟโตไดโอด โครงสร้าง หลักการทำงาน ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงที่สำคัญของโฟโตไดโอด MSM

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ, กระบวนการสร้าง และการทดลองเพื่อวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด MSM

บทที่ 4 ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎี

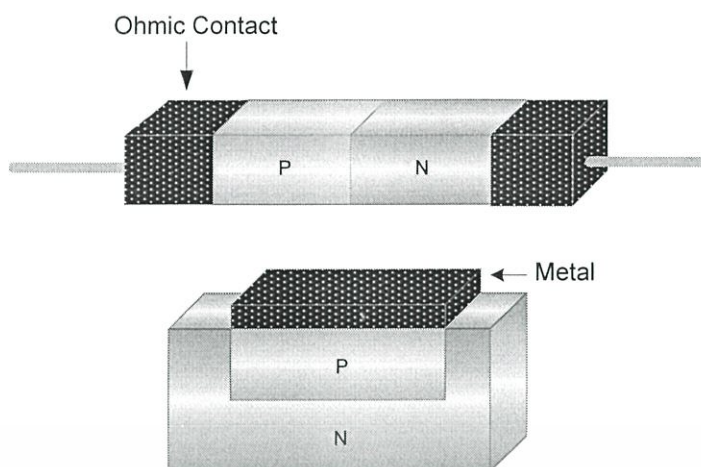
ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ คุณสมบัติต่างๆ ของรอยสัมผัส เช่น กระแส-แรงดัน ความจุ-แรงดัน เป็นต้น และอธิบาย ถึงโครงสร้าง หลักการทำงานของโฟโตไดโอดโอดเอ็มเอสเอ็ม ลักษณะสมบัติสำคัญต่างๆ ของโฟโตไดโอดโอดเอ็มเอสเอ็ม ได้แก่ กระแสมืด กระแสแสง ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพการตอบสนองทางแสง วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด และความเร็วในการตอบสนอง และแบนด์วิดท์ จากนั้นกล่าวถึงซิลิคอนโฟโตไดโอดเอ็มเอสเอ็มบนบอเอิน ในการสร้างร่วมกับวงจรรวมซิลิคอน

2.1 รอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ [4]

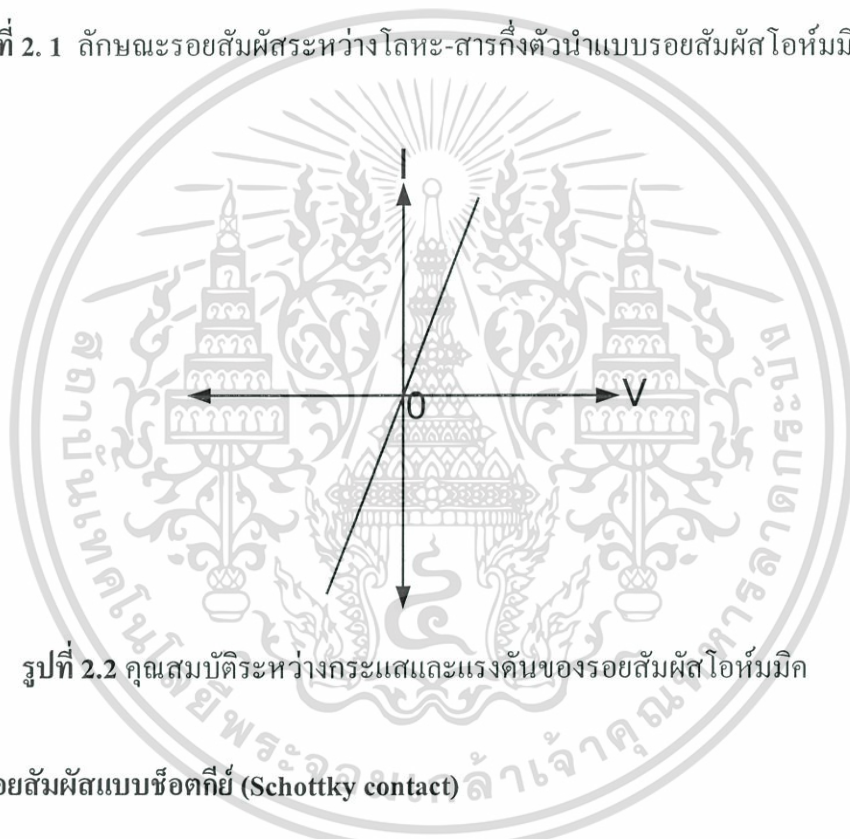
รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัส 2 กรณีคือ รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic contact) และรอยสัมผัสแบบช็อตคีย์ (Schottky contact) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ และสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นรอยสัมผัส โดยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของโลหะ (ϕ_m) ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ (χ_s) ที่นำมาสัมผัส

2.1.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic contact)

รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก แสดงในรูปที่ 2.1 คือรอยสัมผัสที่ไม่แสดงพฤติกรรมกั้นขวางการไหลของกระแสในทางอุดมคติ โดยปกติถูกนำไปใช้งานเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก รอยสัมผัสแบบโอห์มมิกจะไม่มีผลเกี่ยวกับทิศทางกรไหลของกระแส กระแสสามารถไหลได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่สามารถนำกระแสได้สูง ไม่มีแรงดันตกคร่อมที่รอยสัมผัส กราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสโอห์มมิกแสดงในรูปที่ 2.2 โลหะที่ใช้มักเป็นอลูมิเนียม และทองคำ เป็นต้น รอยสัมผัสแบบโอห์มมิกถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่นเป็นขั้วสัมผัสของส่วนต่างๆ ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อการเชื่อมต่อภายในระหว่างอุปกรณ์ของวงจรรวมหรือเพื่อต่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ



รูปที่ 2.1 ลักษณะรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบรอยสัมผัสโอห์มมิก

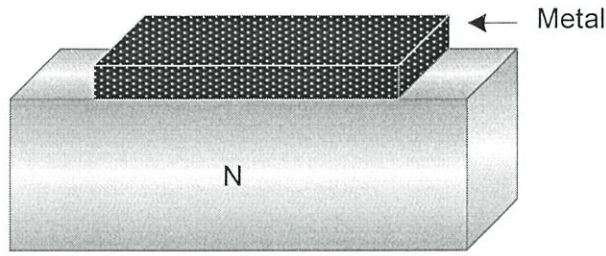


รูปที่ 2.2 คุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสโอห์มมิก

2.1.2 รอยสัมผัสแบบชอตคีย์ (Schottky contact)

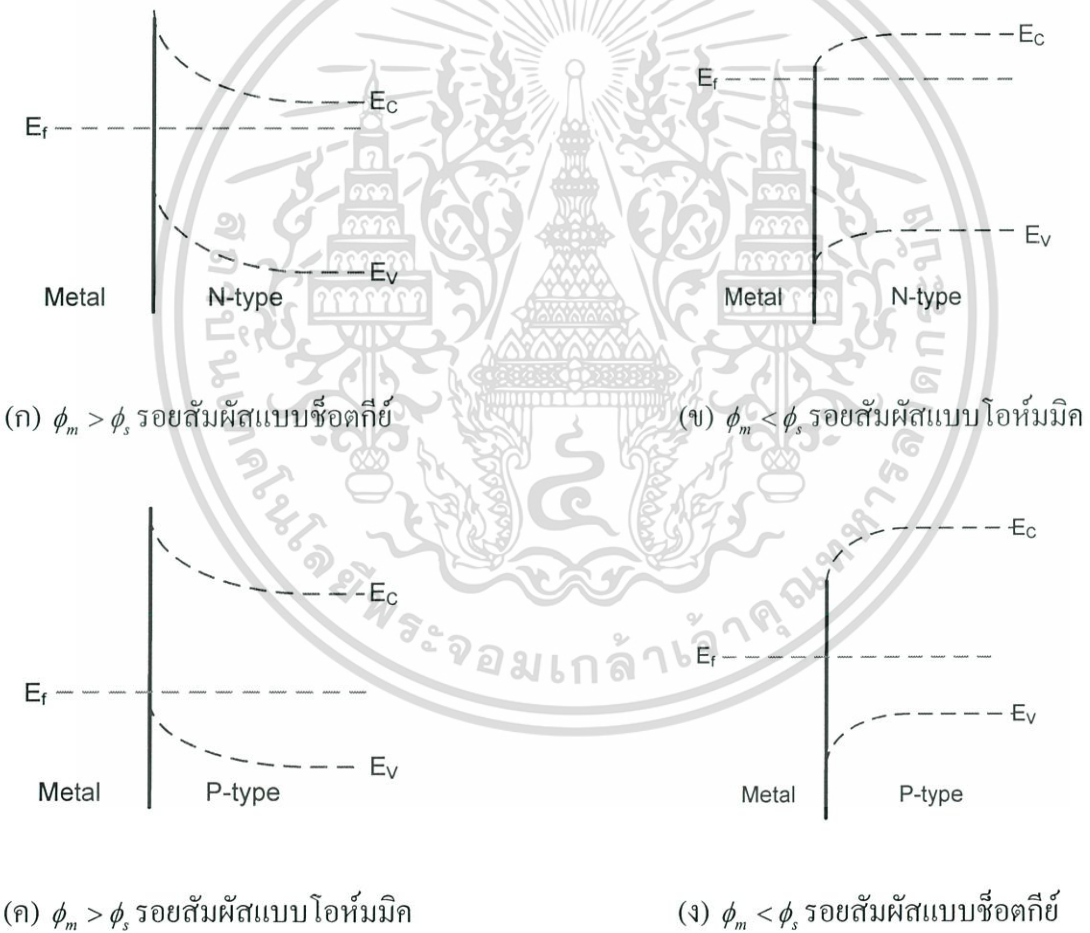
รอยสัมผัสชอตคีย์ คือรอยสัมผัสที่เกิดกำแพงศักย์ไฟฟ้า หรือกำแพงศักย์ชอตคีย์ (Schottky barrier) บริเวณผิวสัมผัส กำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแสดงพฤติกรรมกั้นขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง รอยสัมผัสชอตคีย์ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ หรืออาจเรียกว่าชอตคีย์ไดโอด สารกึ่งตัวนำอาจเป็นชนิดเอ็นหรือพีก็ได้ แต่เนื่องจากค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าโฮล ดังนั้น ในการนำไปใช้งานเป็นโฟโตไดโอดที่มีอัตราเร็วในการทำงานสูงจึงมักนิยมใช้โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รูปที่ 2.3 แสดงรอยสัมผัสแบบชอตคีย์มีคุณสมบัติเป็นเรกติไฟร์ (rectifier) คือยินยอมให้กระแสไหลได้ทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ลักษณะรอยสัมผัสแบบช็อดทกี

ชนิดของรอยสัมผัสสามารถแบ่งจาก กรณีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ- สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี

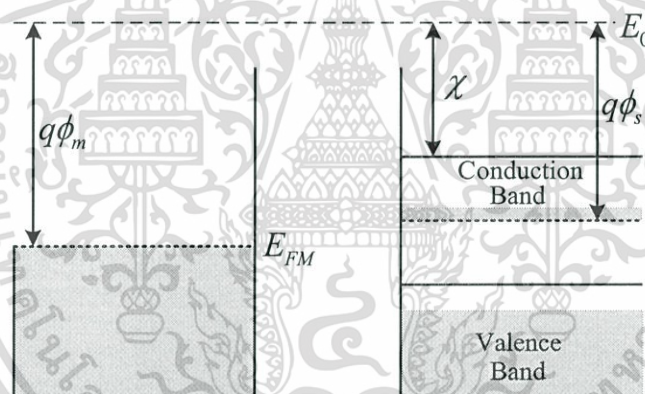
การทำวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กรณี ฟังก์ชันงานของโลหะมากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($\phi_m > \phi_s$) ที่ทำให้เกิดรอยสัมผัส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นโปรดให้ณาเบเซประยชนค่านการค้ำ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบช็อคกี๋ ซึ่งจะแสดงสมบัติเป็นเรกติไฟร์เท่านั้น โดยใช้ทฤษฎีนี้ในการอ้างอิงการสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะอุมิเนียมอัลลอย (AlCuSi) กับบ่อเอ็น (n-well) ที่เกิดจากการยิงฝังประจุยออนฟอสฟอรัสลงบนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพีทำให้เป็นบริเวณบ่อเอ็น ซึ่งจะอธิบายคล้ายเนื้อหาของรอยสัมผัสระหว่างโลหะอุมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2.1.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [5]

2.1.3.1 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในภาวะสมดุลความร้อน

รอยสัมผัสแบบช็อคกี๋เกิดจากการนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก่อนเกิดรอยสัมผัสแสดงดังรูปที่ 2.5 ระดับสูญญากาศ (Vacuum level: E_0) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งนิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็ง และหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือพลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ



รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัส

ระดับเฟอร์มีด้านโลหะ (Fermi level: E_{FM}) คือค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่อยู่ในโลหะนั้น ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มีและระดับสูญญากาศถูกเรียกว่า “ฟังก์ชันงาน” (Work function: $q\phi_m$) หมายถึงพลังงานค่าน้อยที่สุด ที่อิเล็กตรอนในโลหะต้องการเพื่อให้อิเล็กตรอนหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวภายนอกของโลหะ ซึ่งมีค่าดังสมการ (2.1)

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

โดยในโลหะที่ต่างชนิดกันจะมีค่าฟังก์ชันงาน ($q\phi_m$) ที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าฟังก์ชันงานของโลหะชนิดต่างๆ [6]

Metal	(Work Function)
Ag (silver)	4.26
Al (aluminum)	4.28
Au (gold)	5.1
Chromium	4.6
Molybdenum	4.37
Nickel	5.15
Palladium	5.12
Platinum	5.65
Titanium	4.33
Tungsten	4.55
Stainless Steel	4.4
Gold	4.8
Copper	4.5

ระดับเฟอร์มิด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (E_{FS}) จะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน และอยู่ต่ำกว่าระดับ E_C ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_s$) มีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสูญญากาศดังสมการ (2.2)

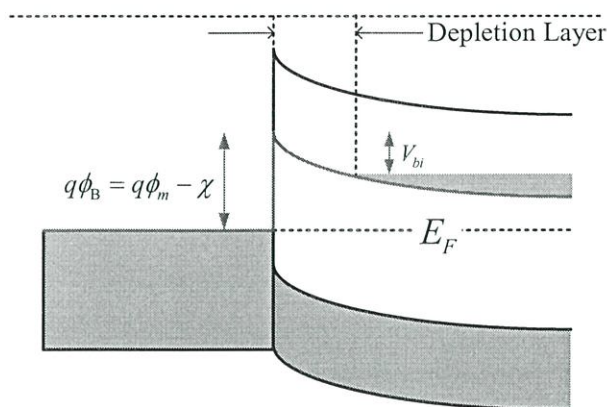
$$q\phi_s = E_0 - E_{FS} \quad (2.2)$$

ส่วนค่าความแตกต่างระหว่างระดับสูญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเรียกว่า “อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี” (Electron affinity: χ) นิยามว่าเป็นค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานของแถบนำไฟฟ้าต้องการเพื่อเคลื่อนที่ไปหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวภายนอกของสารกึ่งตัวนำ ตารางที่ 2.2 แสดงค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้

ตารางที่ 2.2 อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity) ของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำ	ค่าสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน
Ge, germanium	4.31
Si, silicon	4.01
GaAs, gallium arsenide	4.07
AlAs, aluminum arsenide	3.5

ในภาวะเริ่มสัมผัสพบว่าแถบพลังงานมีลักษณะเป็นแถบราบเป็นปกติ แต่ภายหลังการสัมผัสดังรูปที่ 2.6 จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของสารทั้งสองไม่เท่ากัน โดยฟังก์ชันงานของโลหะ (ϕ_m) มีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) โดยระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงทำให้เกิดการถ่ายเทประจุพาหะเกิดขึ้นระหว่างสารทั้งสอง กล่าวคืออิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนที่แพร่เข้าไปทางด้านโลหะ ทั้งให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ปรากฏที่บริเวณรอยสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ และกลายเป็นบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้างเท่ากับ W อิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำซึ่งเคลื่อนที่แพร่เข้าไปในโลหะ จะไปสะสมอยู่ในโลหะเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น ไม่ได้กระจายเข้าไปในส่วนใดของโลหะ ประจุบวกที่เกิดขึ้นจากไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ย่านปลอดพาหะ จะมีค่าเท่ากับประจุซึ่งสะสมอยู่ที่ผิวสัมผัส (Surface Interface) ทางด้านโลหะ และประจุบวกเหล่านี้จะทำให้มีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำ สนามไฟฟ้างกล่าวนี้ จะมีทิศทางจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งเป็นทิศทางที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้แพร่เข้าไปยังด้านโลหะ อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาแรกๆ สนามไฟฟ้านี้จะมีค่าน้อย จึงไม่สามารถต่อต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ทั้งหมด การแพร่ของอิเล็กตรอนจึงยังคงสามารถดำเนินการต่อไปได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป สนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในที่สุดก็จะมีค่ามากพอที่จะหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ได้อย่างสมบูรณ์ ขณะนี้รอยสัมผัสจะเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งกระแสสุทธิที่ไหลผ่านรอยสัมผัสจะมีค่าเป็นศูนย์ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำ สามารถสังเกตเห็นได้ จากการโค้งงอของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อคีย์ในภาวะสมดุลความร้อน

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสอง จะปรับอยู่ในระดับเดียวกันโดยตลอด การโค้งงอของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสโลหะ มีความหมายว่ามีศักย์สัมผัส (Contact Potential: V_{bi}) หรือกำแพงศักย์ (Potential Barrier) เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำและทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของอิเล็กตรอนในแถบความนำของสารกึ่งตัวนำไม่ให้เข้าไปในด้านโลหะ การโค้งงอของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำจะมีผลทำให้เกิดการโค้งงอของระดับสูญญากาศในด้านสารกึ่งตัวนำด้วย เนื่องจากอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี ($q\chi$) ต้องมีค่าคงที่ การโค้งงอของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามากที่สุด ที่ตำแหน่งผิวสัมผัสกับโลหะ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่จุดนี้จะมีค่ามากที่สุด ขณะที่รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุล กระแสที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ และจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเท่ากัน กระแสสุทธิที่ผ่านรอยสัมผัสจึงมีค่าเป็นศูนย์ ศักย์สัมผัสหรือแรงดันภายในรอยสัมผัส V_{bi} ซึ่งเป็นกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น กำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านสารกึ่งตัวนำคือ

$$q\phi_{V_{bi}} = q(\phi_m - \phi_s) \quad (2.3)$$

และกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะซึ่งจะกั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากฝั่งโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำซึ่งเรียกว่า “ช็อตคีย์ แบรีเออร์” หรือกำแพงช็อตคีย์ มีค่าดังสมการ (2.4) ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความสูงของกำแพงช็อตคีย์เมื่อนำโลหะสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

$$q\phi_B = q(\phi_m - \chi) \quad (2.4)$$

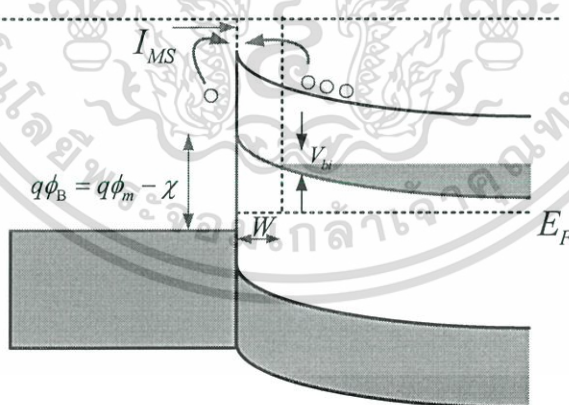
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าความสูงของกำแพงช็อคติย์ระหว่างโลหะต่างๆ กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี

กำแพงช็อคติย์ (eV)	โลหะ					
	Ag	Al	Au	Cu	Ni	Ti
$q\phi_{Bn}$	0.56	0.50	0.81	0.69	0.61	0.5
$q\phi_{Bp}$	0.54	0.58	0.34	0.46	0.51	0.61

2.1.3.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก และด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์ลบ ดังแสดงในรูป 2.7 ความสูงกำแพงช็อคติย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อคติย์เข้าไปด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ซึ่งเป็นกระแสที่ไหลตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากกำแพงช็อคติย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อย และเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการ (2.5)



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของรอยสัมผัสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

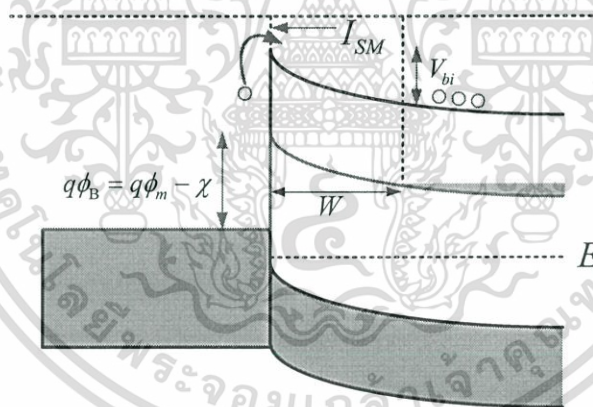
โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ R วน คือ สำหรับค่าคงตัวของริชาร์ดสัน มีค่า $110 A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$ ($n = Si$) โดยขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ_{bn}	คือ	ความสูงกำแพงช็อคกีย์
q	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} C$
k	คือ	ค่าคงที่โบลต์มันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} eV/K$
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

2.1.3.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ แก่รอยสัมผัส โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบและด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์บวก ดังแสดงในรูป 2.8 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ และบริเวณปลอดพาหะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อคกีย์ เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดกระแสที่ไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสส่วนนี้ยังมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส มีค่าดังสมการ (2.6)



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของรอยสัมผัสขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ

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

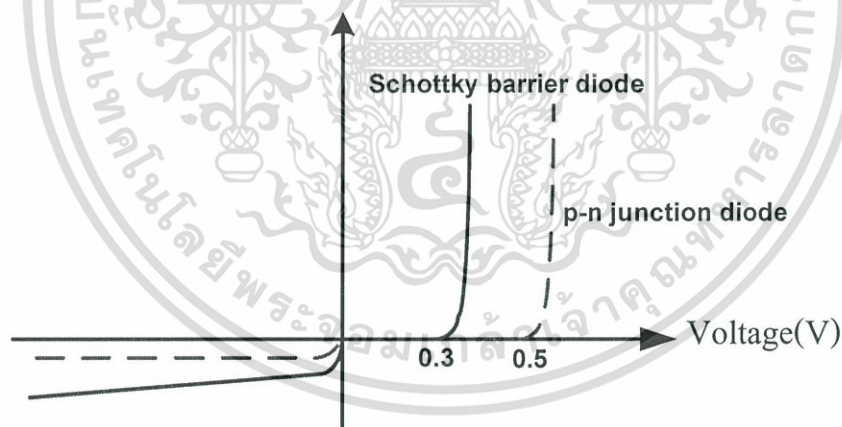
ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion width: W) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการ (2.7) เมื่อแรงดันไบอัสกลับมีค่าสูงมากขึ้น ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.7)$$

โดยที่ ε_s คือ เปรอริมิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ ของซิลิกอนมีค่าเท่ากับ $11.8 \varepsilon_0 (F/cm)$
 ε_0 คือ เปรอริมิติวิตีในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-14} (F/cm)$
 N_D คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})

2.1.3.4 สมบัติกระแส-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอด [7]

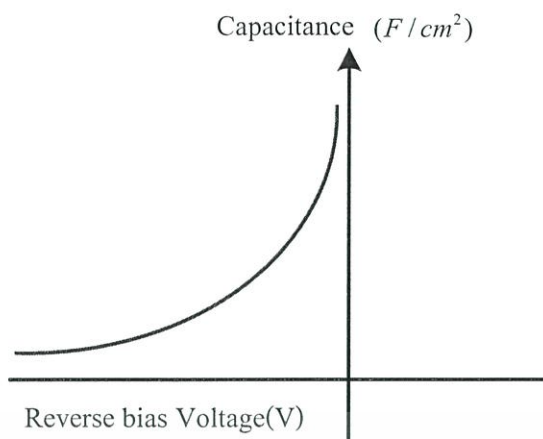
จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสเรกติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น คือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวคือไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก ดังแสดงในรูป 2.9 พบว่าแรงดันภายในของช็อตกีย์ไดโอดมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ซึ่งต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ที่มีค่าประมาณ 0.5-0.7V และเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนกระแสรั่วไหลของช็อตกีย์ไดโอดมีค่าสูงกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

2.1.3.5 สมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอด

ความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงดังรูป 2.10 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยจะแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะดังสมการ (2.8)



รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยต่อพีเอ็น

$$C = \frac{\epsilon_r}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_r N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.8)$$

โดยที่

ϵ_r คือ เปรอริมิทริวิตีของสารกึ่งตัวนำ

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

N_D คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

V_A คือ แรงดันไบอัสกลับ

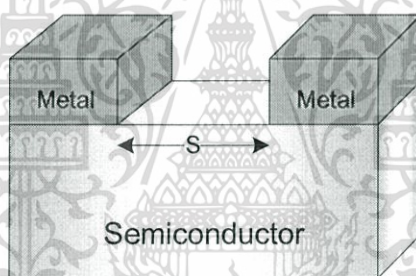
2.2 โฟโตดีเทกเตอร์ (Photodetector)

ตัวตรวจวัดแสง (Photodetector) คืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าส่วนมากมักสร้างมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ปัจจุบันโฟโตดีเทกเตอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือโฟโตคอนดักเตอร์ และโฟโตไดโอด (Photodiode) โดยโฟโตไดโอด ยังแบ่งย่อยตามลักษณะโครงสร้างเช่นโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (metal-semiconductor photodiode), โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal photodiode), โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น (p-n photodiode), โฟโตไดโอด ชนิดอะวาแลนซ์ (Avalanche Photodiode : APD), โฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น (p-i-n photodiode) ซึ่งในแต่ละชนิดนั้นต่างก็มีคุณสมบัติการทำงานและข้อดี-ข้อเสีย ที่แตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและชนิดของตัวตรวจวัดแสง โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 โฟโตไดโอดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM Photodiode)

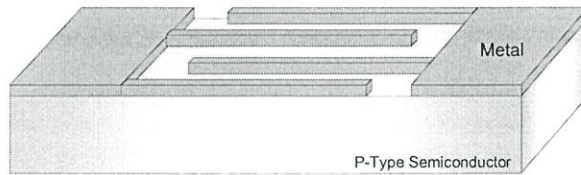
โฟโตไดโอด MSM ถูกนำเสนอโดย Slavman และ Figueroa และ Wei et al ในปี 1981 โฟโตไดโอดชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่สร้างได้ง่าย การตอบสนองรวดเร็ว ความจุไฟฟ้าต่ำ และมีพื้นที่แอคทีฟขนาดใหญ่ โฟโตไดโอด MSM เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของ โฟโตไดโอดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal) ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสำหรับรับแสงอยู่ระหว่างขั้วโลหะสองขั้ว [8] ดังแสดงดังรูปที่ 2.11 รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกีส์ ซึ่งรอยสัมผัสลักษณะนี้จะป้องกันการไหลของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะไม่ให้ไหลมายังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 ส่วนการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะเกิดขึ้นขณะแสงตกกระทบ และไหลไปยังขั้วสัมผัสของโลหะ ผลคือกระแสแสงเนื่องจากแสงตกกระทบ โฟโตไดโอด MSM มีข้อดีมากกว่าโฟโตไดโอดทั่วไป เช่น มีความเร็วสูงและสามารถสร้างรวมกับเทคโนโลยีของวงจรรวม FET และมีลักษณะเป็นแบบพลาเนอร์ ซึ่งง่ายต่อการสร้าง ให้ความจุไฟฟ้าต่ำและกระแสมืดต่ำ (กระแสขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ)



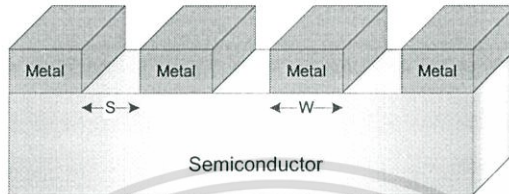
รูปที่ 2.11 โฟโตไดโอด MSM

2.2.1.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน

โฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วอินเทอร์ดีคิเตท แสดงดังรูปที่ 2.12 ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสองรอยสัมผัส โดยมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (S) หรือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เป็นส่วนแยกรอยสัมผัสทั้งสอง โดยรูปที่ 2.13 แสดงภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วอินเทอร์ดีคิเตท โดยทั่วไปจะออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดแคบมากๆ เพื่อให้โฟโตไดโอดสามารถทำงานด้วยความเร็วสูง ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นซิลิกอน จะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอดชนิด MSM คล้ายกับช็อคกีส์ไดโอดสองตัวหันหลังชนกัน (Back to Back Diode) ดังรูปที่ 2.14



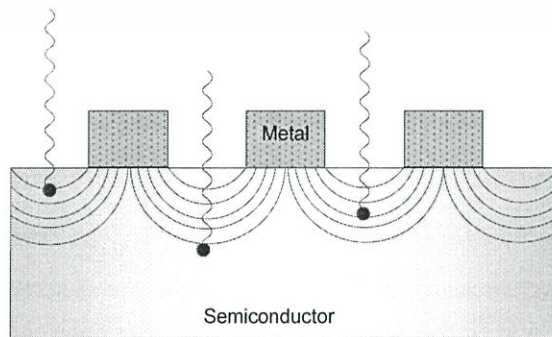
รูปที่ 2.12 โฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิต



รูปที่ 2.13 ภาพตัดขวางของ MSM โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิต

รูปที่ 2.14 สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอด MSM

หลักการการทำงานของโฟโตไดโอด MSM ส่วนพื้นที่รับแสงจะเป็นพื้นที่บริเวณสารกึ่งตัวนำโดยจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) [9] การสร้างรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะแบบชนิดกึ่งทั้งสองรอยสัมผัสบนสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากการปรับระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่แพร่เข้ามาทางด้านสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่รับแสง แสดงดังรูปที่ 2.15

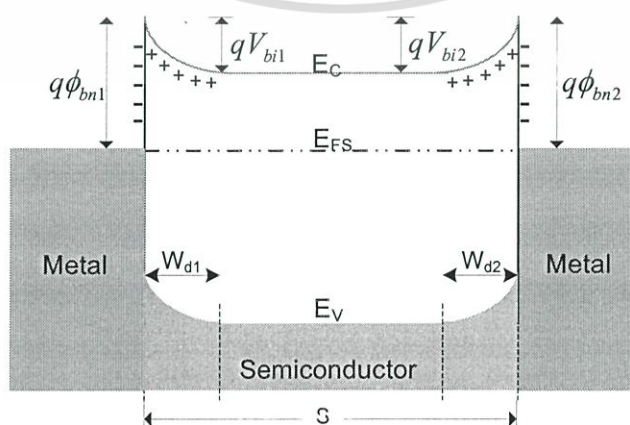


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 2.15 สนามไฟฟ้าภายใต้ขั้วของโฟโตไดโอด MSM [10]** ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโลหะมีประจุพาหะเป็นจำนวนมาก สามารถพิจารณาได้ว่าไม่มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นด้านโลหะ กระบวนการโฟโตวอลตาจิก เกิดจากการที่พลังงานโฟตอนของแสงที่ตกกระทบบริเวณพื้นที่ทางด้านสารกึ่งตัวนำ บริเวณสนามไฟฟ้า และบริเวณใกล้สนามไฟฟ้า พลังงานโฟตอนของแสงนี้มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระ-โฮลอิสระ กล่าวคือ $h\nu \geq E_g$ ที่บริเวณปลอดพาหะ และบริเวณพื้นที่ใกล้ๆ กับบริเวณปลอดพาหะนี้ โดยสนามไฟฟ้านี้จะเป็นตัวพัดพาให้อิเล็กตรอน และโฮลอิสระที่เกิดจากแสงให้ออกไปสู่วงจรรายนอกเกิดเป็นกระแสไหลผ่านตัวโฟโตไดโอด โฟโตไดโอด MSM สามารถทำการไบอัสบวก และลบได้ทั้งสองทิศทางเนื่องจากทั้งสองรอยสัมผัสมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน เมื่อทำการไบอัสโฟโตไดโอดจะทำให้รอยต่อชนิดกึ่งตัวนำหนึ่งเป็นไบอัสตรง และอีกด้านเป็นไบอัสกลับ เนื่องจากด้านไบอัสกลับมีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูง และมีบริเวณปลอดพาหะกว้าง เมื่อแสงตกกระทบคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าพัดพาให้มีผลต่อกระแสเอาต์พุตมากที่สุด

2.2.1.2 โฟโตไดโอด MSM ขณะสมดุล

แถบพลังงานของโฟโตไดโอด MSM ในภาวะสมดุลความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.16 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยกำแพงศักย์ที่รอยสัมผัสทั้งสองมีค่าเท่ากันเนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบสมมาตร โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (Cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอนโนด (Anode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอนโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน โดยกำแพงศักย์ช้อตกึ่งของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอนโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากัน $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ และกำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอนโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bn}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอนโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร

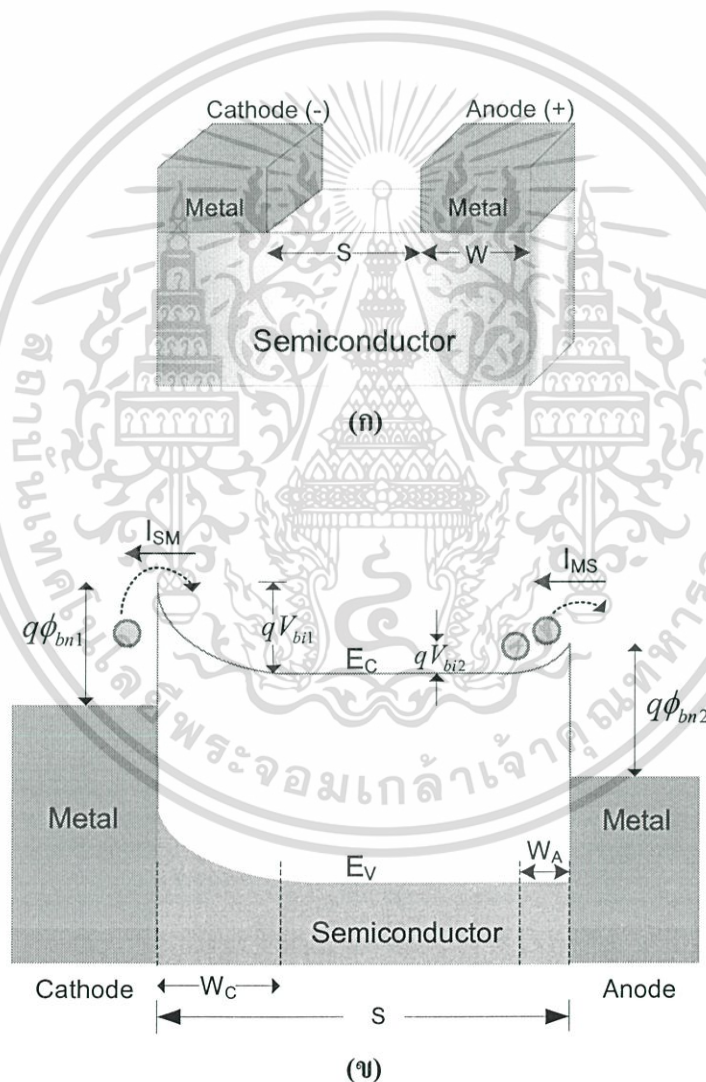


รูปที่ 2.16 แถบพลังงานโฟโตไดโอด MSM ในภาวะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.3 โฟโตไดโอด MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส

โฟโตไดโอด MSM เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.17(ก) โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดได้รับไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวาเป็นขั้วแอโนดได้รับไบอัสตรงจากรูปที่ 2.17(ข) บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_1)$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงแต่อิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช้อตกีย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช้อตกีย์



รูปที่ 2.17 โฟโตไดโอด MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส

(ก) ภาพจำลองการตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด MSM ขณะให้แรงดันไบอัส

(ข) แถบพลังงานในขณะได้รับแรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนด้านแอนโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโอด (W_A) แคมมากขึ้น เนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $(V_{bi} - V_2)$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโอดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำปริมาณน้อย ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ไหลออกจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะด้านแอนโนดก็น้อยด้วย (เนื่องจากความหนาแน่นประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากัน จึงมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนออกไปโลหะด้าน Anode ด้วยการแพร่เกิดขึ้น) จึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยลงไปด้วยซึ่งก็คือกระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM โดยกระแสมืดที่เกิดขึ้นจะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น

2.2.1.4 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบอัส

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม (W_T) ของโฟโตไดโอด MSM เป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านแคโอด (W_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้านแอนโนด (W_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงดังสมการที่ (2.9)

$$W_T = W_C + W_A \quad (2.9)$$

โดยที่

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.10)$$

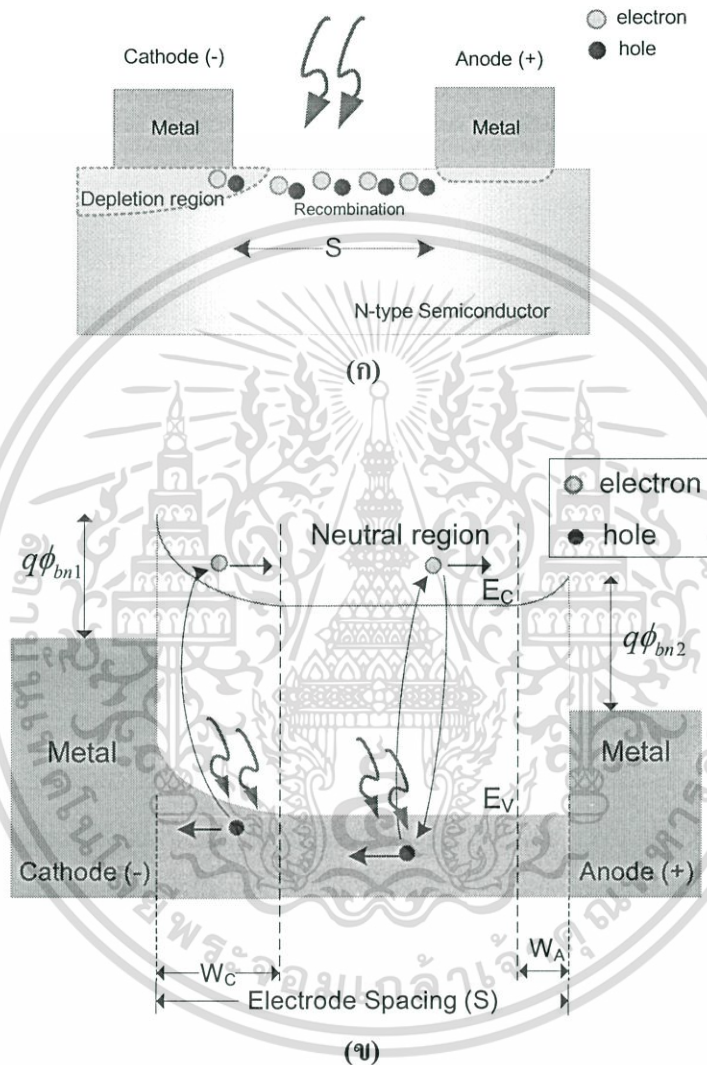
$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.11) พบว่าเมื่อแรงดันไบอัสกลับมากขึ้นส่งผลให้บริเวณปลอดพาหะกว้างขึ้นตามด้วย

2.2.1.5 MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ [11]

MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM จะอยู่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองด้านดังรูปที่ 2.18 ภายใต้เงื่อนไขการให้แรงดันไบอัส เมื่อมีแสงตกกระทบบนพื้นที่รับแสงกรณีระยะห่างระหว่างขั้วกว้างสามารถแบ่งพื้นที่ในการรับแสงเป็น 2 ส่วน คือพื้นที่ปลอดประจุพาหะ (Depletion) และพื้นที่เป็นกลาง (Neutral) พลังงานของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ $h\nu \geq E_g$ จะกระตุ้นให้เกิด คู่ อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole Pair) ภายในพื้นที่ปลอดประจุพาหะ และพื้นที่เป็นกลาง ส่วนคู่ อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณนิวทรัลโฟตอนจะถูกดูดกลืน และเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล แสดงดังรูปที่ 2.18(ข)



รูปที่ 2.18 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลเนื่องจากการให้แสงตกกระทบบนกรณีระหว่างขั้วกว้าง
 (ก) แบบจำลองการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล
 (ข) แถบพลังงานขณะได้รับแสงตกกระทบบนกรณีระหว่างขั้วกว้าง

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบบน และมีการกระตุ้นให้เกิดโฮล ทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากัน ในแต่ละจุดทำให้เกิดการแยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดประจุพาหะและถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะส่วนใหญ่ในชั้นสาร ส่วนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในบริเวณนิวทรัลจะไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้เนื่องจากเป็นพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำ ส่วนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดประจุพาหะ โฮลจะถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือเรียกว่ากระแสแสง (Photocurrent: I_{Photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอนโนด ซึ่งต้องเคลื่อนที่ผ่านบริเวณนิวทรัล แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกจากบริเวณปลอดประจุพาหะเป็นพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้

2.2.2 สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM

2.2.2.1 กระแสมืดของโฟโตไดโอด (Dark current: I_{dark})

กระแสมืด คือ กระแสที่เกิดจากพาหะส่วนน้อย เนื่องจากการไบอัสย้อนกลับในขณะที่โฟโตไดโอดไม่ได้รับแสง โดยปกติจะมีค่าน้อย กระแสมืดหรือกระแสรั่วจัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งต้องถูกควบคุมให้มีค่าต่ำสุด เพราะ ถือเป็นสัญญาณรบกวนแบบหนึ่งในโฟโตไดโอด

2.2.2.2 กระแสแสงของโฟโตไดโอด (Photo current : I_{photo})

กระแสแสงคือกระแสที่เกิดขึ้นในโฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแสง กระแสชนิดนี้เกิดจากการดูดกลืนโฟตอน ในโฟโตไดโอดทำให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล อิสรระ สนามไฟฟ้าในไดโอดจะทำให้พาหะเหล่านี้ เคลื่อนที่เข้าหาขั้วโธและกลายเป็นกระแสแสงไหลในวงจร กระแสแสงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและบ่งบอกถึงขีดความสามารถในการตรวจวัดแสง ปกติค่าของกระแสแสงที่ได้ควรมีค่ามากพอที่จะแสดงนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสมืด โดยทั่วไปขนาดของกระแสแสงจะขึ้นกับความเข้มแสง พื้นที่รับแสงและประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอด และค่าของกระแสแสงของโฟโตไดโอดสามารถคำนวณหาได้จากผลต่างของกระแสรวม และกระแสมืด ดังสมการที่ (2.12) โฟโตไดโอดที่ดีจะต้องสามารถให้กระแสแสงได้สูง กระแสรวมที่ไหลในวงจรขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแสง เป็นผลรวมของกระแสแสงและกระแสมืด

$$I_{photo} = I_{Total} - I_{Dark} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \quad (2.13)$$

C_A คือ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ 1 = $\sqrt{(q\epsilon_s N_D / 2(V_{bi} - V_A))}$

C_C คือ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ 2 = $\sqrt{(q\epsilon_s N_D / 2(V_{bi} + V_A))}$

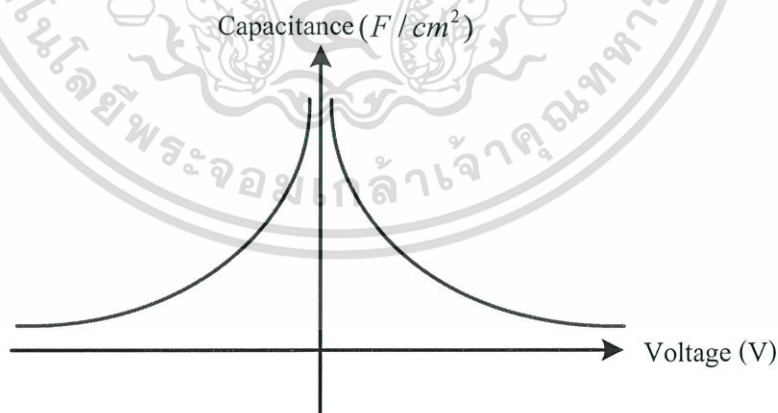
โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบสมมาตรและถ้า $V \ll V_{bi}$ ($= V_{bi1} = V_{bi2}$) ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าจะลดลงและเท่ากับ

$$C_T = \sqrt{\left(\left(\frac{q\epsilon_s N_d}{2} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{(V_{bi} - V_A)} + \sqrt{(V_{bi} + V_A)}} \right] \right)} \quad (2.14)$$

เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มมากขึ้น โดยส่วนใหญ่แรงดันที่ไบอัสจะตกคร่อมอยู่ที่รอยสัมผัสที่ 1 และความหนาแน่นความจุไฟฟ้าจะเท่ากับ

$$C_T = \sqrt{\left(\left(\frac{q\epsilon_s N_d}{2} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{(V + V_{bi})} + \sqrt{(V_{bi})}} \right] \right)} \quad (2.15)$$

ในรูปที่ 2.21 แสดง ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสโดยความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นและมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.21 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

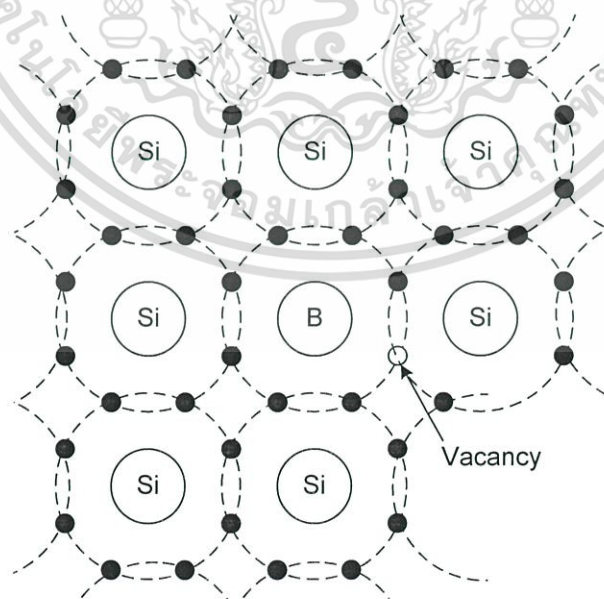
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเจือสาร (Doping) [12]

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) เมื่อถูกเจือสารเข้าไปแล้ว จะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic Semiconductor) สารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์นี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (Negative type: N-Type) และสารกึ่งตัวนำชนิด พี (Positive type: P-Type) ในการเจือสารเบื้องต้นทำได้โดยการหลอมซิลิคอนบริสุทธิ์ให้ละลายด้วยอุณหภูมิ 900 ถึง 1400 °C แล้วจึงเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 3 หรือ 5 ตัวลงไปให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน รอจนแข็งตัวแล้วนำมาตัดเป็นแผ่นวงกลมโดยแผ่นเจือสารด้วยธาตุหมู่ 3 เรียกว่า ฐานรองที่เจือสารชนิด พี (P-type Substrate) แผ่นที่เจือสารด้วยธาตุหมู่ 5 เรียกว่า ฐานรองที่เจือสารชนิด เอ็น (N-type Substrate) โดยสารกึ่งตัวนำในแต่ละชนิดมีลักษณะดังนี้

1. สารกึ่งตัวนำชนิดพี

หากเติมสารเจือที่มีจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 3 ตัวลงไป เช่น อะลูมิเนียม (Aluminium), โบรอน (Boron), แกลเลียม (Gallium) และ อินเดียม (Indium) อะตอมของสารเจือปนตัวหนึ่งจะยึดเกาะกับอะตอมของเจอร์เมเนียม หรือซิลิคอน จำนวน 4 ตัว ด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว เกิดที่ว่าง (Vacancy) โดยที่ว่างนี้แสดงประจุไฟฟ้าเป็นบวก ลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่ได้นี้จึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากภายนอกได้อีก เพื่อให้จำนวนอิเล็กตรอนในพันธะมีครบจำนวน สารเจือปนที่เติมให้นี้เรียกว่า “สารเจือปนผู้รับ (Acceptor Impurity) หรือ ที่เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด พี (Positive type : P-Type)

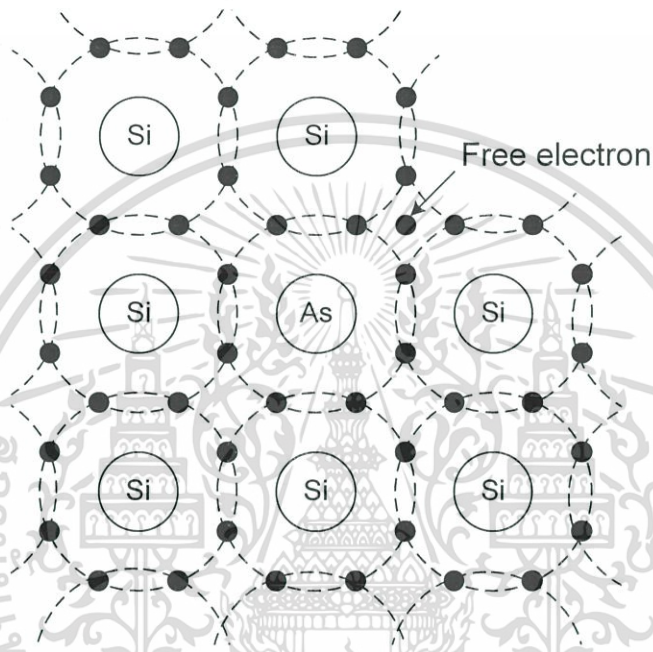


รูปที่ 2.22 การเกิดที่ว่างในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สารเจือที่มีจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 5 ตัว เช่น สารหนู (Arsenic), พลวง (Antimony), ฟอสฟอรัส (Phosphorus) อะตอมของสารเจือปนตัวหนึ่งจะไปยึดเกาะกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำข้างเคียงในพันธะโควาเลนต์ ในการยึดเกาะของหนึ่งอะตอมจะทำให้มีอิเล็กตรอน 1 ตัว ไม่สามารถเข้ามายึดเกาะในพันธะได้ จึงมีอิเล็กตรอนเกิน 1 ตัวสารเจือปนที่เติมให้นี้เรียกว่า “สารเจือปนผู้ให้” (Donor Impurity) หรือที่เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (Negative type : N-Type)



รูปที่ 2.23 การเกิดอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

กระบวนการเจือสารเพื่อทำให้เกิดเป็นบริเวณ สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น หรือ สารกึ่งตัวนำชนิด พี ที่นิยมใช้ทั่วไปในปัจจุบันมี 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีการแพร่ (Diffusion) และวิธีการยิงฝังประจุ (Ion Implantation)

2.3.1 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

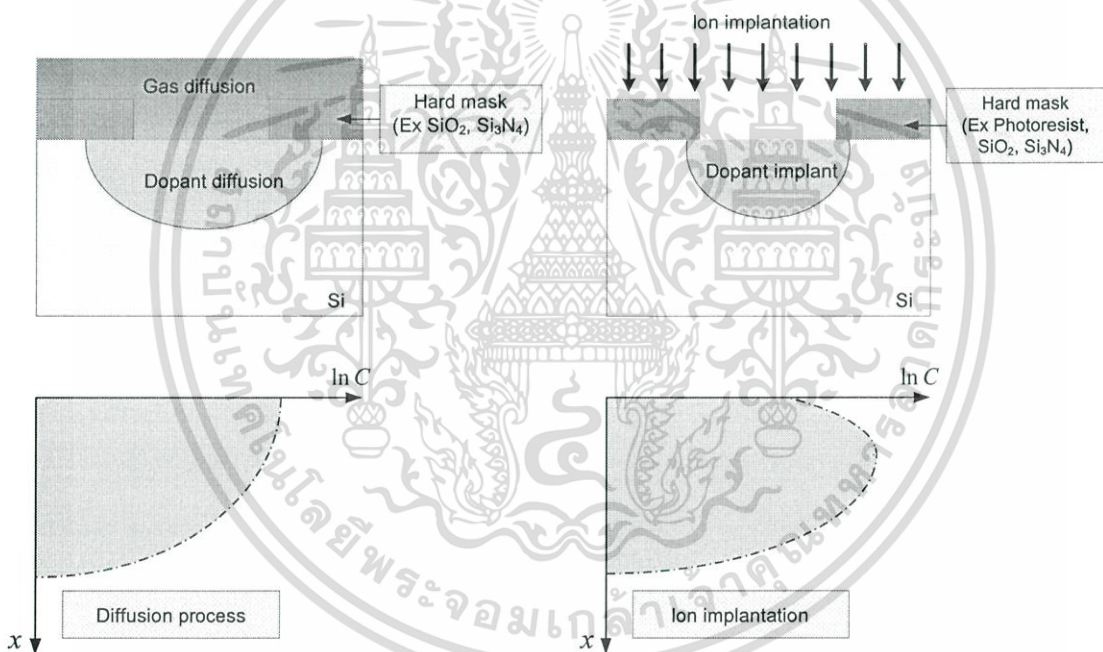
การเติมสารเจือลงในผลึกซิลิกอน สามารถกระทำได้โดยการแพร่ (Diffusion) โดยอาศัยการแพร่จากสารที่มีความเข้มข้นมากไปสู่สารที่มีความเข้มข้นน้อยภายใต้อุณหภูมิสูงในบรรยากาศไนโตรเจนหรือก๊าซเฉื่อย กระบวนการแพร่ในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นการแพร่ภายในของแข็ง (Solid state diffusion) โดยปรากฏการณ์แพร่แบบนี้ จะเกิดขึ้นได้ก็เฉพาะในสถานะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงๆ ประมาณ 900 ถึง 1200 °C ในขณะที่อุณหภูมิสูงๆอนุภาคสารใดๆ จะสามารถแพร่เข้าไปในวัตถุของแข็งอื่นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการอื่นใดเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การยิงฝังประจุไอออน (Ion implant) [13]

การยิงฝังประจุ (Ion Implantation) คือการเจือสารโดยการอาศัยเครื่องจักรมาเพิ่มพลังงานให้กับประจุที่ต้องการเจือ เพื่อเร่งให้ประจุนั้นมีพลังงานสามารถเข้าไปฝังในเนื้อแผ่นซิลิคอนได้ วิธีการยิงฝังประจุ ทำโดยการสร้างประจุไอออนของสารเจือแล้วทำการยิงฝังประจุด้วยพลังงานทางไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องทำภายใต้อุณหภูมิสูง

ในปัจจุบันการเจือสารด้วยวิธียิงฝังประจุ ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายในกระบวนการสร้างวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) อย่างมากเนื่องจากวิธีการยิงฝังประจุสามารถควบคุมการแพร่ด้านข้าง (Lateral Diffusion) , ควบคุมปริมาณสารเจือ (Dose Control) , ควบคุมความลึก (Junction Depth Control) และควบคุมการปนเปื้อนบริเวณพื้นผิวได้มากกว่าวิธีการแพร่ โดยการเลือกใช้น้ำยาไวแสงเป็นหน้ากากป้องกัน (Mask) การยิงฝังประจุเป็นต้น

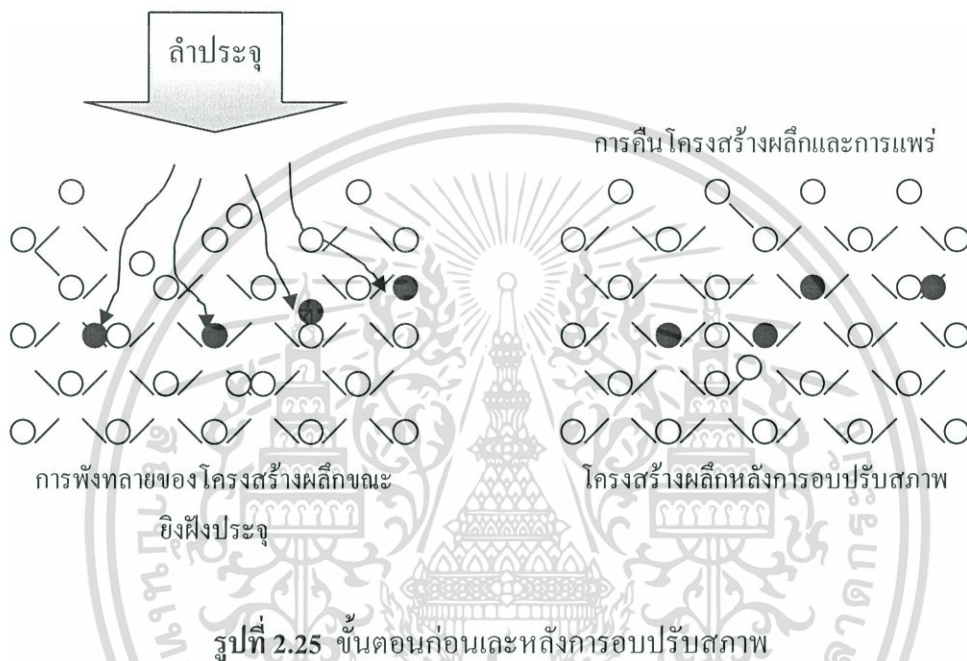


รูปที่ 2.24 การกระจายตัวของปริมาณสารเจือด้วยวิธีการแพร่และวิธียิงฝังประจุ

จากรูป 2.24 แสดงลักษณะการกระจายตัวของปริมาณสารเจือวิธีแพร่และวิธียิงฝังประจุ โดยที่ C คือความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ และ X คือความลึกจากผิวหน้าผลึกซิลิคอน การเจือสารด้วยวิธีการแพร่เกิดการกระจายตัวของสารเจือทุกทิศทาง ซึ่งส่งผลให้การแพร่ด้านข้างมีบริเวณเทียบเท่ากับ การแพร่ด้านลึก อีกทั้งยังยากที่จะควบคุมความลึกในการแพร่ ให้อยู่ในระดับที่แน่นอนได้ยาก เมื่อการแพร่ด้านข้างมีบริเวณกว้างส่งผลให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ตาม สำหรับการเจือสารด้วยวิธีการยิงฝังประจุพบว่า การกระจายตัวของสารเจือด้านข้างเกิดขึ้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของความลึกเอกสตรนเป็นเอกสตรนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างได้จะมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบที่พื้นที่ที่เท่ากันจำนวนของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยวิธีการยิงฝัประจุจะมีมากกว่าวิธีการแพร่ โดยจะขอกกล่าวเพียงรายละเอียดของการเจือสารด้วยวิธียิงฝัประจุเท่านั้นเนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการเจือสารด้วยวิธียิงฝัประจุ เนื่องจากต้องการปริมาณสารเจือที่แน่นอน

2.3.3 การแอนนัล



กระบวนการแอนนัล เป็นกระบวนการปรับโครงสร้างของเนื้อของวัสดุเป้าหมายหลังการยิงฝัประจุ เพื่อทำการซ่อมแซมส่วนที่ไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการยิงสารเจือหรือสร้างโครงสร้างผลึกขึ้นมาอีกครั้ง (regrowth of crystal) และเป็นการรวมตัวพันธะระหว่างอะตอมสารเจือกับอะตอมซิลิคอนหรือเรียกว่า แอคติเวชัน (activation)

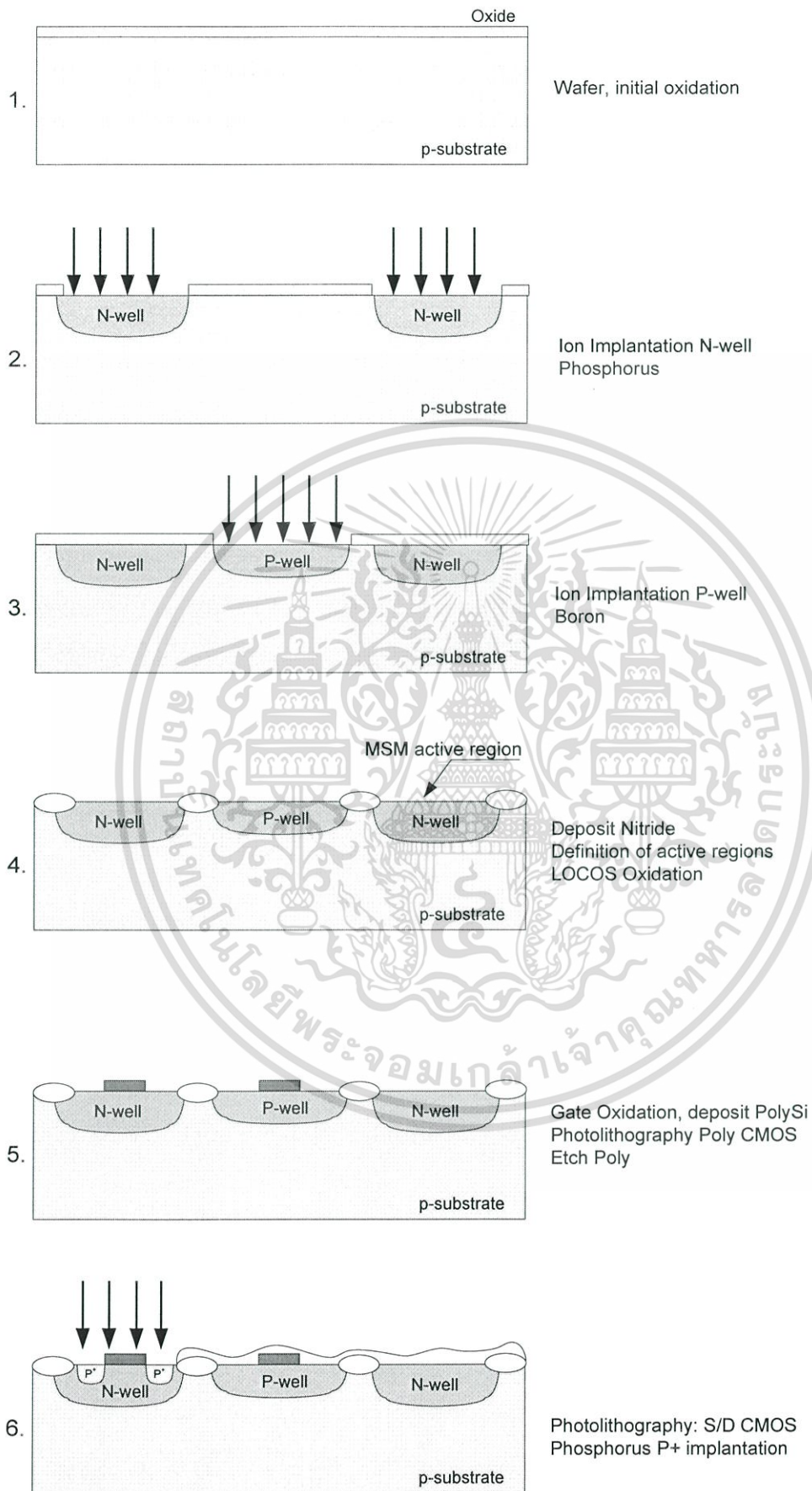
2.4 โฟโตไดโอด MSM ในกระบวนการสร้างชิมอส [14]

โดยทั่วไปกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด MSM มักสร้างอยู่บนพื้นฐานหรือดัดแปลงจากกระบวนการสร้างวงจรรวม [15] กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด MSM ทั่วไปที่ถูกรายงานไว้ [16] พบว่าสามารถสร้างร่วมกับกระบวนการผลิตชิมอส โดยอธิบายรายละเอียดอย่างย่อในกระบวนการสร้างชิมอส ซึ่งประกอบด้วยการสร้างโฟโตไดโอด MSM

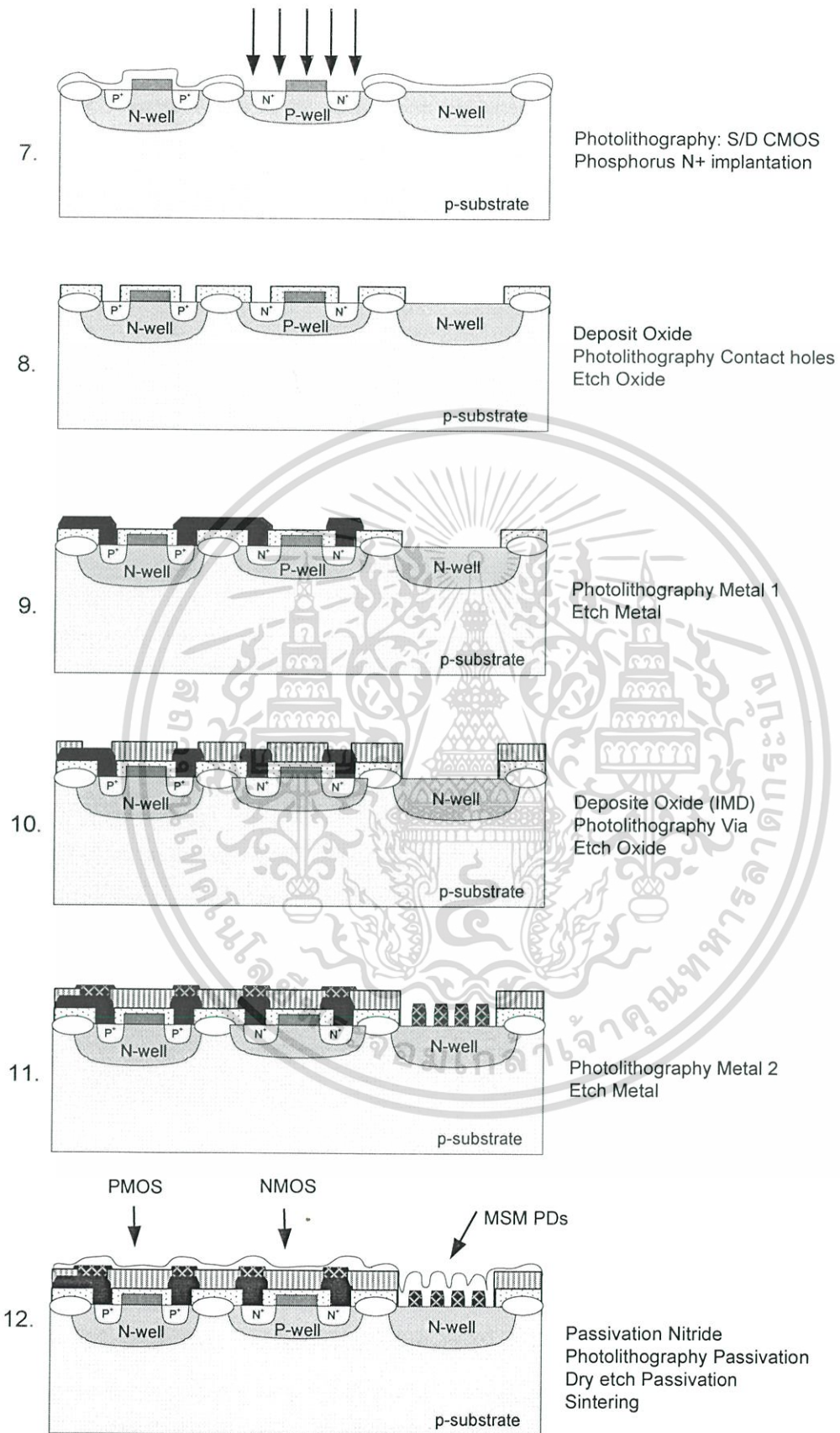
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการสร้างแสดงดังรูปที่ 2.26 เริ่มต้นจากขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ชนิดพี ทำความสะอาดด้วยสารเคมี ขั้นตอนที่ 2 สร้างบริเวณบ่อเอ็น โดยวิธีการยิงฝูประจุฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นบริเวณของ พี-มอส ทรานซิสเตอร์ และโฟโตไดโอด MSM ขั้นตอนที่ 3 สร้างบ่อพีด้วยวิธียิงฝูประจุโบรอนสำหรับเอ็น-มอสทรานซิสเตอร์ ในขั้นตอนที่ 4 บริเวณแอคทีฟของทั้ง PMOS , NMOS ทรานซิสเตอร์ และโฟโตไดโอด MSM ถูกคลุมด้วยฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์เพื่อสร้างบริเวณ LOCOS การปรับค่า V_{th} และค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) ใน NMOS และ PMOS ทรานซิสเตอร์ใช้การยิงฝูประจุโดยไม่ได้แสดงในแผนภาพนี้ กระบวนการสร้างในขั้นตอนที่ 5 เป็นการสร้างเกตออกไซด์และโพลีซิลิกอนบนพื้นที่แอคทีฟของ NMOS และ PMOS ทรานซิสเตอร์ โดยโฟโตไดโอด MSM จะถูกกัดชั้นฟิล์มเกตออกไซด์ และโพลีซิลิกอนออก ขั้นตอนที่ 6-7 เป็นการกำหนดบริเวณซอสเตรนของ NMOS และ PMOS ทรานซิสเตอร์ บริเวณซอสเตรนของทั้ง NMOS และ PMOS ทรานซิสเตอร์ถูกยิงฝูประจุด้วยฟอสฟอรัสและโบรอนตามลำดับ และแอนนัลโดยโฟโตไดโอด MSM จะไม่ถูกยิงฝูประจุในกระบวนการสร้างซอสเตรน ขั้นตอนที่ 8 สร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ (ILD) สำหรับรู contact เพื่อเชื่อมต่อบริเวณซอสเตรนของ NMOS และ PMOS ทรานซิสเตอร์กับชั้น โลหะ บริเวณแอคทีฟของโฟโตไดโอด MSM ถูกกัดชั้นออกไซด์ไปจนถึงชั้นสารกึ่งตัวนำ ขั้นตอนที่ 9 สร้างฟิล์มโลหะที่ 1 คือ Ti/TiN/AiCuSi/TiN และสร้างสวดลายโลหะชั้นที่ 1 ขั้นตอนที่ 10 สร้างลายเชื่อมต่อโลหะที่ 1 และโลหะชั้นที่ 2 ด้วยฟิล์มออกไซด์ (IMD) ขั้นตอนที่ 11 สร้างฟิล์มโลหะและสวดลายโลหะชั้นที่ 2 คือ AiCuSi/TiN โดยโฟโตไดโอด MSM จะถูกสร้างสวดลายขั้วอินเตอร์ดิคิเตทที่ชั้นโลหะที่ 2 ขั้นตอนที่ 12 สร้างชั้นป้องกันความชื้นโดยทั่วไปมักใช้ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และซิลิกอนไนไตรด์ที่สร้างด้วยกระบวนการ CVD และกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเปิดหลุม PAD ขนาดใหญ่ของทั้ง NMOS, PMOS และ MSM สำหรับเป็นขั้ววัดทางไฟฟ้า ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการชินเตอร์ริงเพื่อให้รอยสัมผัสมีความสมบูรณ์ขึ้น

จากการศึกษากระบวนการสร้างซิมอส พบว่าการสร้างโฟโตไดโอด MSM สามารถใช้กระบวนการสร้างร่วมกับซิมอสได้ โดยโฟโตไดโอด MSM ใช้เพียง 4 กระจกต้นแบบของซิมอส โดยก่อนที่จะทำการสร้างร่วมกับกระบวนการผลิตซิมอสนั้น จะทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM ก่อน เช่นเงื่อนไขบ่อเอ็น ชนิดของโลหะ และเงื่อนไขการชินเตอร์ริง เพื่อทดสอบว่าหากใช้เงื่อนไขเดียวกันกับกระบวนการกับสร้างซิมอส สามารถทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพในการทำงานเป็นตัวตรวจรับแสงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 การสร้างโฟโตไดโอด MSM บนพื้นฐานกระบวนการสร้างซีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการขังนเพื่อการค้ากษ ใ้เห็น เมื่ออยู่ใ้เห็นน ใ้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ และการดำเนินงานวิจัย

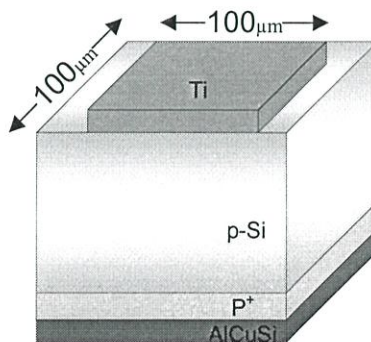
การออกแบบ และดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบคุณสมบัติรอยสัมผัสชนิดกึ่งจากโครงสร้างรอยสัมผัสแบบต่างๆ ขั้นตอนที่สองเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของปริมาณสารเจือและอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีผลต่อรอยสัมผัส ขั้นตอนที่สามเป็นการออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ตรวจรับแสงร่วมกับกระบวนการชิมอสที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นทดสอบอุปกรณ์ที่ทำการสร้าง เพื่อหาคุณสมบัติการทำงาน พารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวอุปกรณ์

3.1 การทดสอบรอยสัมผัส

การทดสอบรอยสัมผัสเป็นการทดสอบคุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียมอัลลอย และไททาเนียมด้วยวิธีการสปัดเตอร์ริง โดยนำโลหะทั้งสองสัมผัสกับบริเวณบ่อเอ็น (n-well) ที่ถูกยิงฝังประจุฟอสฟอรัส และสัมผัสกับแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เพื่อทดสอบหารอยสัมผัสชนิดใดให้คุณสมบัติความเป็นขั้วกึ่ง

3.1.1 โครงสร้างรอยสัมผัส Ti/p-Si

โครงสร้างรอยสัมผัส Ti/p-Si สร้างโดยใช้แผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพีระนาบ (100) สภาพต้านทานไฟฟ้า 20-30 Ω -cm สร้างบริเวณ P+ ด้วยวิธีการยิงฝังประจุโบรอนบริเวณด้านหลังแผ่น และแอนนัลที่อุณหภูมิ 900°C 30 นาที สร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมอัลลอยหนา 1000 nm เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง และสร้างโลหะ Ti หนา 1000nm จากนั้นทำการซินเตอร์ริง ที่อุณหภูมิ 400°C ในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที ดังรูปที่ 3.1

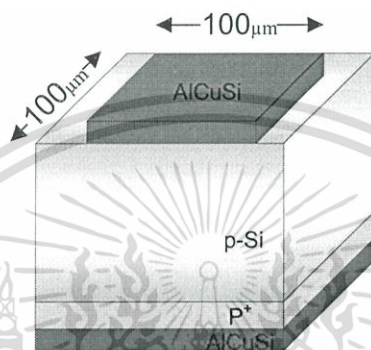


รูปที่ 3.1 โครงสร้าง Ti/p-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 โครงสร้างรอยสัมผัส AlCuSi/p-Si

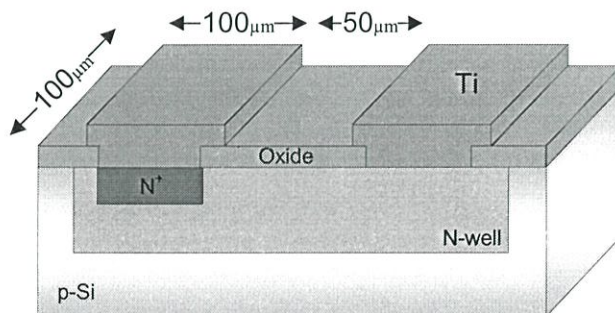
โครงสร้างรอยสัมผัส AlCuSi/p-Si สร้างโดยใช้แผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพีระนาบ (100) สภาพต้านทานไฟฟ้า 20-30 Ω -cm สร้างบริเวณ P+ ด้วยวิธีการยิงฝังประจุโบรอนด้านหลังแผ่นและแอนนีสที่อุณหภูมิ 900°C 30 นาที จากนั้นสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมเนียมอัลลอยหนา 1000 nm เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน แล้วทำการซินเตอร์ริง ที่อุณหภูมิ 400°C ในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้าง AlCuSi/p-Si

3.1.3 โครงสร้างรอยสัมผัส Ti/n-well

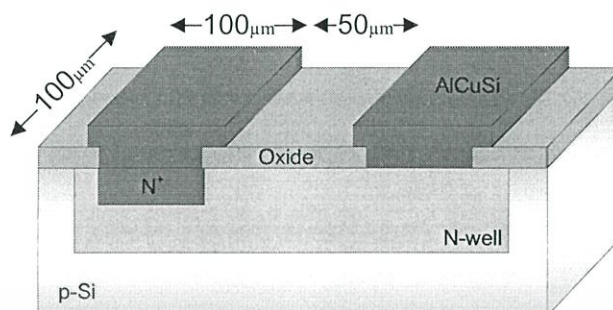
โครงสร้างรอยสัมผัส Ti/n-well ดังรูปที่ 3.3 สร้างโดยใช้แผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพีระนาบ (100) สภาพต้านทานไฟฟ้า 20-30 Ω -cm ยิงฝังประจุฟอสฟอรัสสำหรับสร้างเป็น n-well ที่ปริมาณสารเจือ 3×10^{12} ions/cm² และแอนนีสที่อุณหภูมิ 1050°C 900 นาที จากนั้นยิงฝังประจุให้เกิดเป็นบริเวณ N⁺ ที่ขั้วด้านหนึ่งของอุปกรณ์ โดยถูกสร้างให้เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกด้วยวิธีการยิงฝังประจุไอออนที่ปริมาณสารเจือสูง ขั้วอีกด้านหนึ่งถูกสร้างให้สัมผัสกับโลหะอลูมิเนียมเนียมหนา 1000nm จากนั้นทำการซินเตอร์ริง ที่อุณหภูมิ 400°C ในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 3.3 โครงสร้าง Ti/n-well

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.3 โครงสร้าง Ti/n-well ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 โครงสร้างรอยสัมผัส AlCuSi/n-well



รูปที่ 3.4 โครงสร้าง AlCuSi/n-well

โครงสร้างรอยสัมผัส AlCuSi/n-well การสร้างคล้ายกันกับโครงสร้าง Ti/n-well แต่แตกต่างกันที่โลหะที่ใช้เป็นโลหะไททาเนียม ดังรูปที่ 3.4

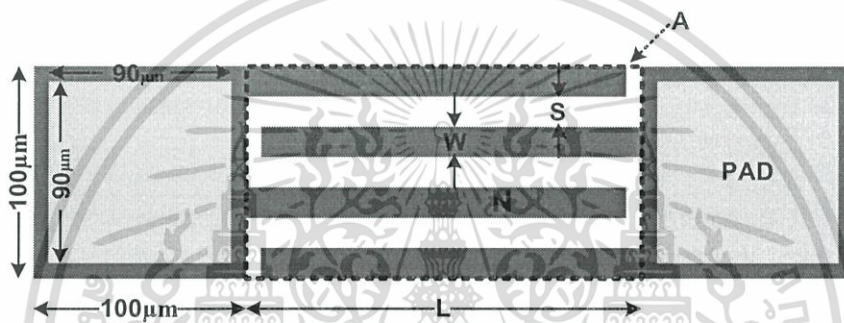
3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ของปริมาณสารเจือ และอุณหภูมิที่มีผลต่อรอยสัมผัสแบบซีอติจี้

การสร้างมีขั้นตอนเช่นเดียวกับการสร้างรอยสัมผัส AlCuSi/n-well แต่แตกต่างกันที่การสร้างบ่อเอ็นจะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือจากการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสทั้งหมด 6 ค่าคือ 1×10^{12} , 3×10^{12} , 1×10^{13} , 3×10^{13} , 1×10^{14} , 3×10^{14} ions/cm² และแปรอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่ 300°C, 400°C และ 500°C เป็นเวลา 15 นาที โดยศึกษาผลของกระแส-แรงดัน ความจุไฟฟ้าแรงดัน เพื่อหาคุณสมบัติของรอยสัมผัส

3.3 การสร้างโฟโตไดโอด MSM บนวงจรรวมซีมอส

3.3.1 การออกแบบลวดลายสำหรับสร้างโฟโตไดโอด MSM บนวงจรรวมซีมอส

การออกแบบโฟโตไดโอด MSM บนวงจรรวมซีมอส จะทำการออกแบบให้โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิตัล ซึ่งประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมและซิลิกอนสัมผัสกัน โดยมีพื้นที่รับแสงอยู่ระหว่างขั้วสัมผัส ดังรูป 3.5 ลักษณะโครงสร้างมักคล้ายกับส้อม (Fork) วางสลับกัน 2 ด้าน การออกแบบใช้โปรแกรม L-edit ออกแบบตัวอุปกรณ์เนื่องจากโปรแกรม L-edit เป็นซอฟต์แวร์ที่สนับสนุนการออกแบบวงจรรวม



รูปที่ 3.5 ขั้วเล็กโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตัล

ในการสร้างอุปกรณ์ซีมอสมีลวดลายวงจรทั้งหมด 11 ชั้นลายวงจร ซึ่งผ่านกระบวนการมากมายหลายกระบวนการ โดยการสร้างโฟโตไดโอด MSM ในกระบวนการซีมอสนั้นมีเพียง 4 ชั้นลายวงจรคือ ชั้นบ่อเอ็น (N-well), ชั้นแอคทีฟ (Active), ชั้นโลหะ (Metal) และชั้นป้องกันความชื้น (Passivation) โดยแต่ละชั้นลายวงจรมีรายละเอียดดังนี้

1. ชั้นที่ 1 ชั้นบ่อเอ็น (n-well) เกิดจากการยิงฟุ้งประจุฟอสฟอรัสบนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้บริเวณนั้น ๆ กลายเป็นบริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
2. ชั้นที่ 2 ชั้นแอคทีฟ เป็นชั้นที่มีลักษณะการสร้าง Field Oxide เพื่อแยกอุปกรณ์ออกจากกัน
3. ชั้นที่ 3 ชั้นขั้วโลหะ เป็นชั้นที่มีลักษณะของขั้วโลหะแบบอินเตอร์ดิจิตัลที่มีการกำหนดความกว้างของขั้วอินเตอร์ดิจิตัลแต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างขั้วอินเตอร์ดิจิตัล, และจำนวนขั้ว ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

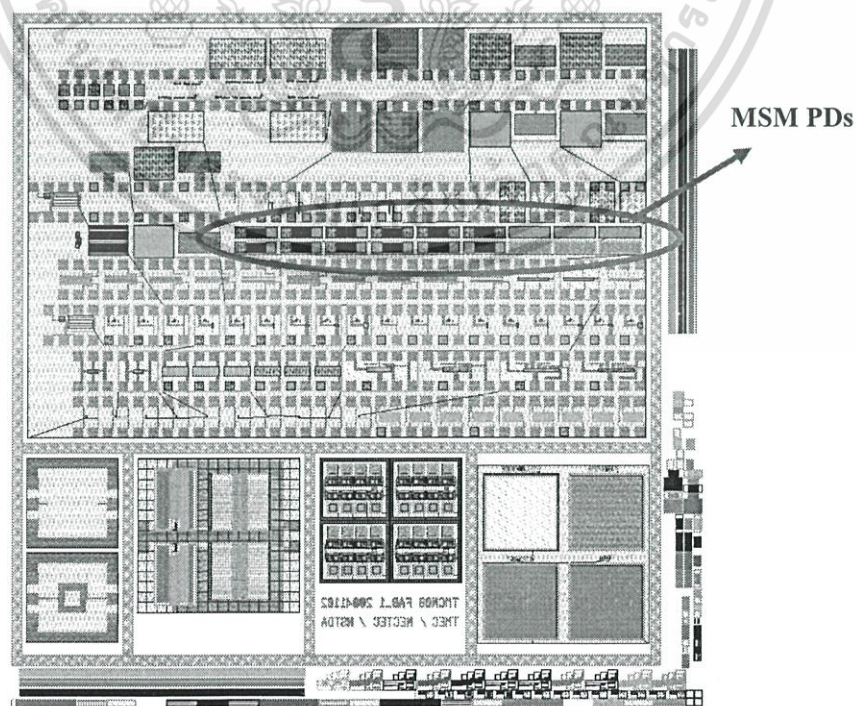
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบโฟโตไดโอด MSM

การ ออกแบบ	ความกว้างขั้ว อิเล็กโทรด (W)	ระยะห่างขั้ว อิเล็กโทรด (S)	จำนวนขั้ว อิเล็กโทรด (N)	ความยาวขั้ว อิเล็กโทรด (L)	พื้นที่รับแสง (A)
1	1 μm	1 μm	50	195 μm	200x100 μm^2
2	1 μm	2 μm	34	195 μm	200x100 μm^2
3	1 μm	3 μm	24	195 μm	200x100 μm^2

4. ชั้นที่ 4 ชั้นฉนวนป้องกันความชื้น (Passivation) เป็นชั้นที่ปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์เพื่อป้องกันความชื้น อีกทั้งยังเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบ ลวดลายลายวงจรชั้นนี้จะปิดที่ผิวหน้าบริเวณรับแสงทั้งหมด แต่จะเปิดเฉพาะบริเวณขั้ววัดไฟฟ้า (PAD) เท่านั้น ขนาดของชั้นฉนวนป้องกันความชื้นมีขนาด 90x90 ตารางไมครอน

3.3.2 ขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอด MSM ร่วมกับวงจรรวมชิมอส

ตามที่ได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 2 แล้วในส่วนของการสร้างโฟโตไดโอด MSM ร่วมกับการสร้างชิมอสนั้น โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการสร้างโฟโตไดโอด MSM โดยจะขอกกล่าวเพียงขั้นตอนโฟโตไดโอดถูกสร้างในกระบวนการสร้างชิมอสเท่านั้น



รูปที่ 3.6 วงจรรวมชิมอส

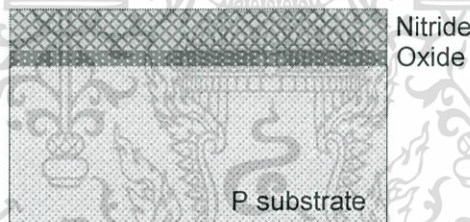
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 เป็นลวดลายของอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM ที่อยู่ร่วมกับลายวงจรรวมซิมอส โดยขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอด MSM มีขั้นตอนดังนี้

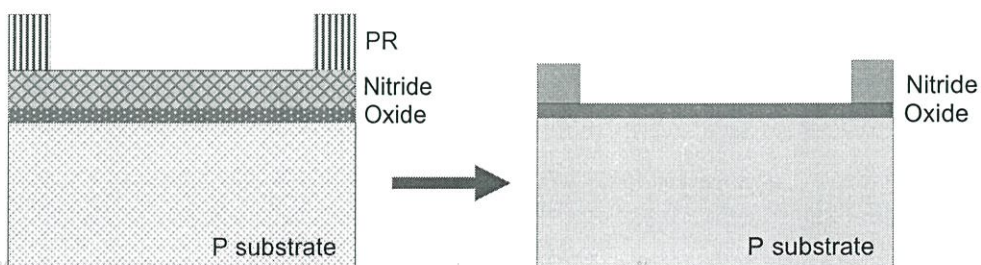
1. เตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) ชนิดพี (P-Type) สภาพต้านทาน 1-20 Ohm.cm
2. ทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำด้วยสารเคมี (Cleaning) ดังนี้
 - SC1 ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{DI}:\text{H}_2\text{O}_2$) ทำความสะอาดฝุ่น
 - PIR สำหรับทำความสะอาดสาร Organic ต่างๆ
 - HF สำหรับลอกฟิล์มออกไซด์บางที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับซิลิกอน
 - DI สำหรับล้างทำความสะอาดสารเคมี
3. ปลูกลงชั้นฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ SiO_2 และชั้นฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4)

- SiO_2 หนา 25nm

- Si_3N_4 หนา 150nm

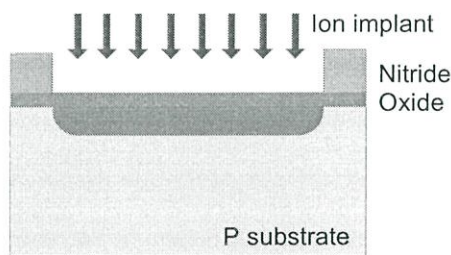


4. สร้างชั้นลายบ่อเอ็น (n-well) เพื่อเป็นหน้ากักป้องกันจากการยิงฝังประจุ ด้วยกระบวนการถ่ายย้อมแบบและกระบวนการกัด โดยทำการกัดถึงชั้นฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ และเหลือฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากักป้องกันการเสียหายของผิวหน้าซิลิกอนไนไตรด์ในการยิงฝังประจุอ็อน

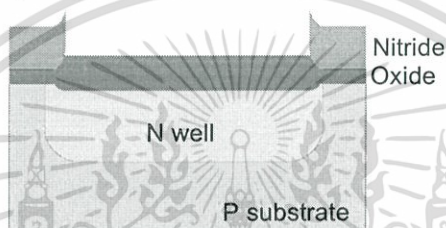


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

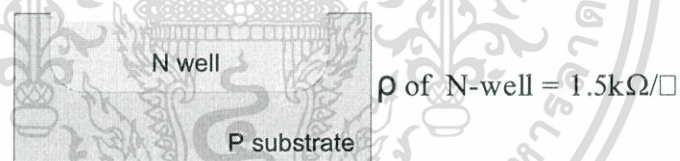
5. ยิงฝังประจุไอออนอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการ Ion implantation ที่พลังงาน $140\text{keV } 3 \times 10^{12} \text{ ions/cm}^2$



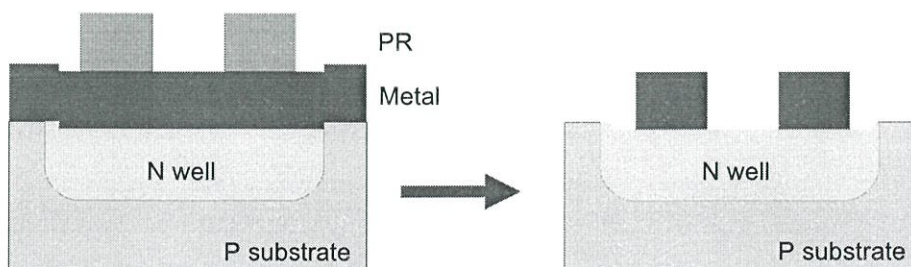
6. อบปรับสภาพที่อุณหภูมิ 1050 องศา 900 นาที และ Wet Oxidation 6500 Å



7. ลอกฟิล์มซิลิกอน ไนไตรต์ออกด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และลอกฟิล์มออกไซด์ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วยน้ำ DI

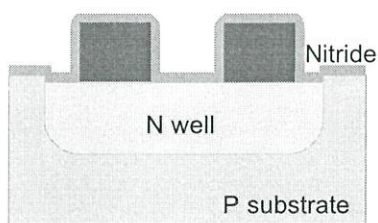


8. สร้างชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียมอัลลอยความหนา $0.7 \mu\text{m}$ และฟิล์มไททาเนียมไนไตรต์ความหนา $0.08 \mu\text{m}$ ด้วยเทคนิค ดิซีสปีดเตอริง
9. สร้างชั้นลายขั้วโลหะแบบอินเตอร์ดิจิตัล ด้วยกระบวนการถ่ายย่อแบบและกระบวนการกัด

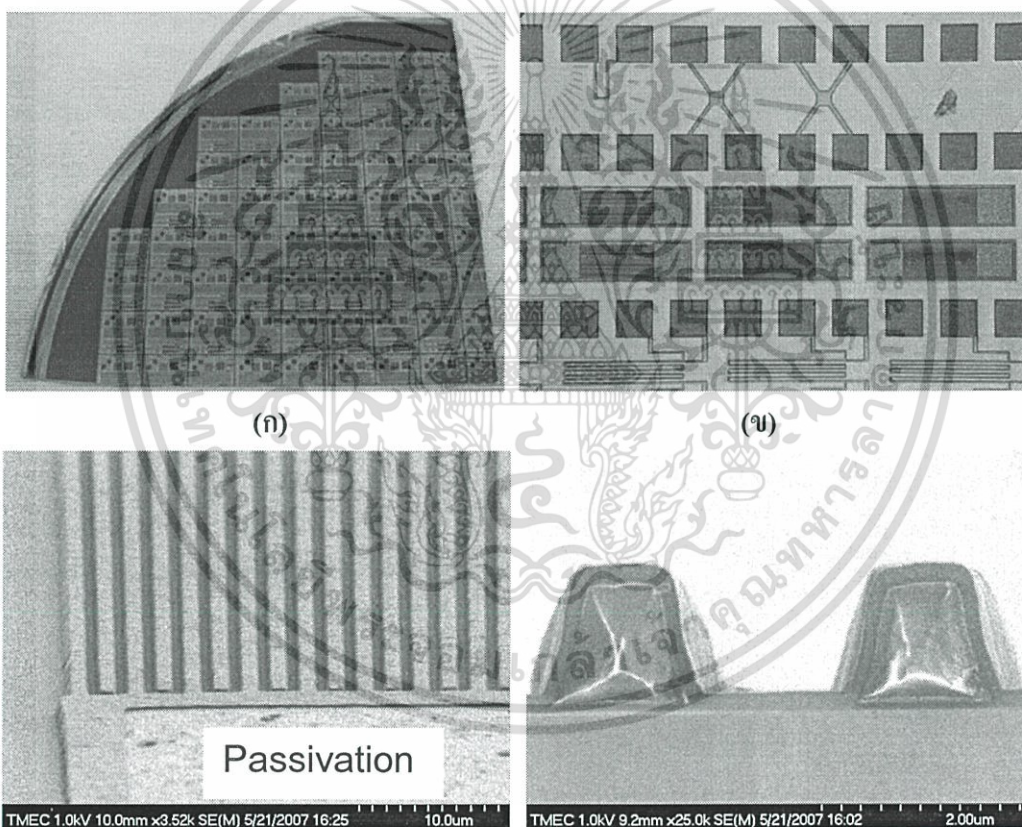


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. สร้างชั้นฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์เพื่อสร้างเป็นชั้นป้องกันความชื้น, การสะท้อน โดยเปิดขั้วโลหะ (PAD) เพื่อวัดผลทางไฟฟ้า



11. ซินเตอร์ริงเป็นกระบวนการที่ทำให้การสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 15 นาที



- (ก) รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายโฟโตไดโอด MSM ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์
(ข) บนมแผ่นผลึก
(ค) ภาพหน้าอุปกรณ์ขยาย 50 เท่า
(ค) ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบเลือนกราด (FE-SEM) กำลังขยาย 3520 เท่าของโฟโตไดโอด MSM
(ง) ภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด MSM

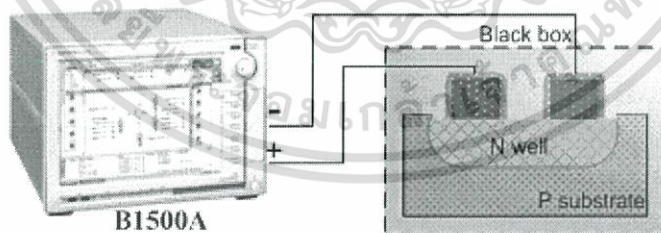
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์แล้ว เป็นการทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ โดยการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นด้วยเครื่อง Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองต่างๆ ของโฟโตไดโอด MSM โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิด MSM โดยวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาปริมาณสารเจือที่เหมาะสมในการสร้างเป็นโฟโตไดโอด โดยศึกษาจากสมบัติกระแส-แรงดัน และสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน เพื่อศึกษารอยสัมผัสช้อตกั๊ยะระหว่างโลหะอลูมิเนียมและซิลิกอน เช่น แรงดันภายใน (V_{bi}), ความสูงของกำแพงช้อตกั๊ยะ (ϕ_{bn}) ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ และศึกษาสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดชนิด MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและย้อนกลับ ส่วนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด

3.3.3.1 การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

นำอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM บนปอ์เอิน ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ทั้งในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบและได้รับแสงตกกระทบ จากแหล่งกำเนิดแสงหลอดฮาโลเจน เพื่อหาค่ากระแสอิ่มตัว กระแสแสงของโฟโตไดโอด ซึ่งทำการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.8 เครื่องมือวัดประกอบด้วยหัวเข็มวัดชิ้นงาน (Probe Station) ต่อกับ Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer ซึ่งทำหน้าที่วัดกระแสและแรงดัน, ความจุไฟฟ้า โดยควบคุมการทำงานและบันทึกผลด้วยโปรแกรม Easy Expert



รูปที่ 3.8 แผนภาพอุปกรณ์วัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง

3.3.3.2 การวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดัน

การวัดความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด MSM ทำการวัดโดยใช้เครื่องมือดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

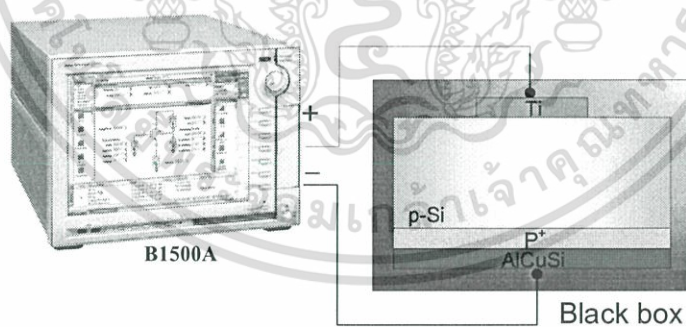
ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง จากการสร้างอุปกรณ์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วย 3 ส่วนคือส่วนที่ 1 เป็นการศึกษารอยสัมผัสจากโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ เพื่อทำการเลือกรอยสัมผัสในการนำไปสร้างร่วมกับวงจรรวมซิมอส ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาปริมาณสารเจือของบ่อเอ็นและอุณหภูมิสำหรับซินเตอร์ริงที่เหมาะสมสำหรับรอยสัมผัส โดยศึกษาจากแรงดันภายใน ความสูงกำแพงช็อคกี๊ กระแสรั่วไหล จากสมบัติกระแส-แรงดัน และส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาการสร้างโฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิตัลร่วมกับกระบวนการสร้างวงจรรวมซิมอส และทดสอบคุณสมบัติของโฟโตไดโอด

4.1 ผลการทดสอบรอยสัมผัส

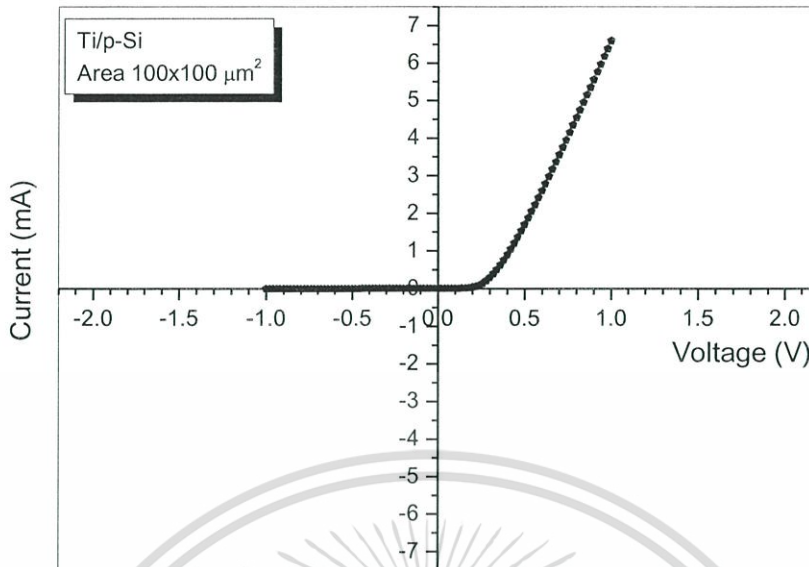
4.1.1 ผลการทดสอบรอยสัมผัส Ti/p-si

ทำการวัดสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส Ti/p-si ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ผลทางไฟฟ้าดังรูปที่ 4.1

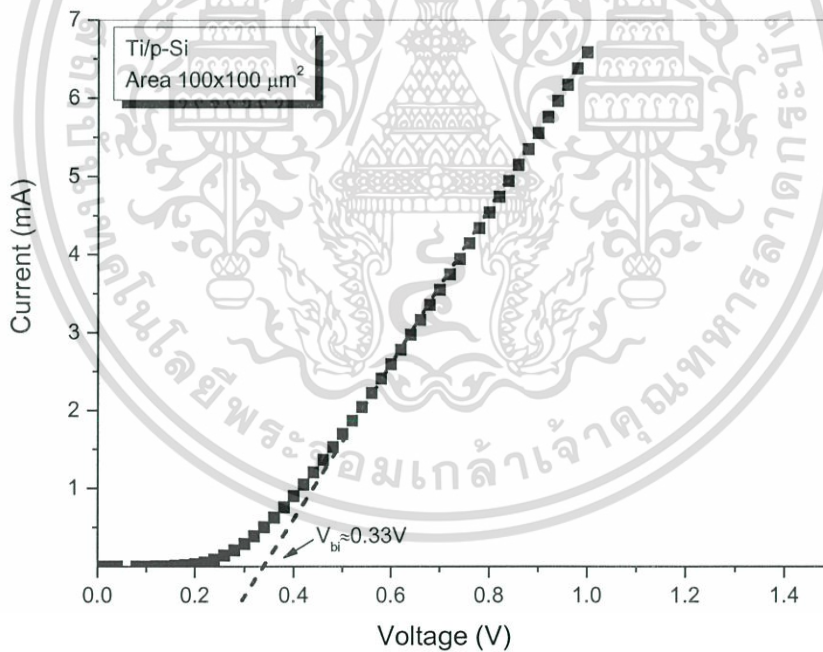


รูปที่ 4.1 การวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัส Ti/p-si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 สมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส Ti/p-si



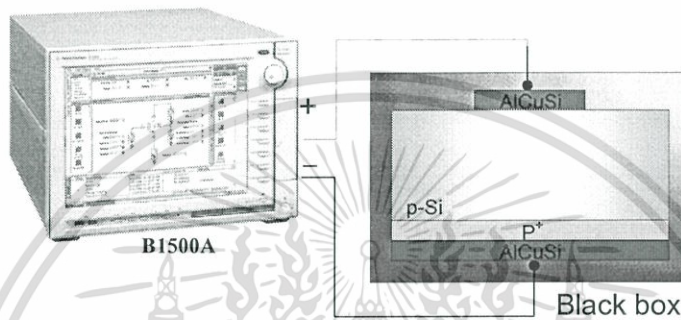
รูปที่ 4.3 การหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส Ti/p-si

รอยสัมผัส Ti/p-si มีสมบัติกระแส-แรงดันดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่ารอยสัมผัส Ti/p-si เป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่ง และรูปที่ 4.3 ค่าแรงดันภายในที่ได้จากกราฟกระแส-แรงดันมีค่าประมาณ 0.33 V รอยสัมผัส Ti/p-si ให้คุณสมบัติแบบชนิดกึ่งเนื่องจากค่า $\phi_m < \phi_s$ โดยระดับเฟอร์มิของสารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

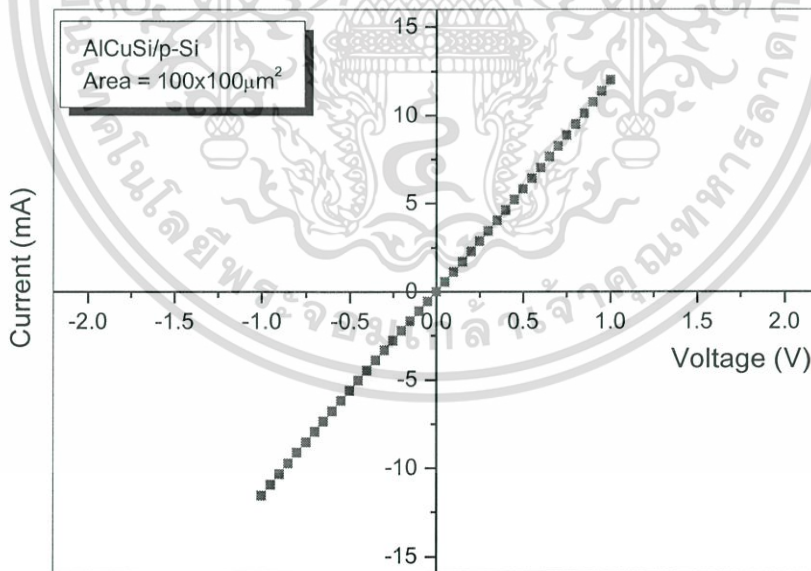
กึ่งตัวนำชนิดพี E_{FS} จะอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ (E_{FM}) ดังนั้นเมื่อนำสารทั้งสองสัมผัสกัน จะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะ และเกิดค่าแรงศักย์ (qV_{bi}) ของโหนดที่บริเวณรอยสัมผัส [17]

4.1.2 ผลการทดสอบรอยสัมผัส AlCuSi/p-si

ทำการวัดสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/p-si ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ผลทางไฟฟ้าดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัส AlCuSi/p-si

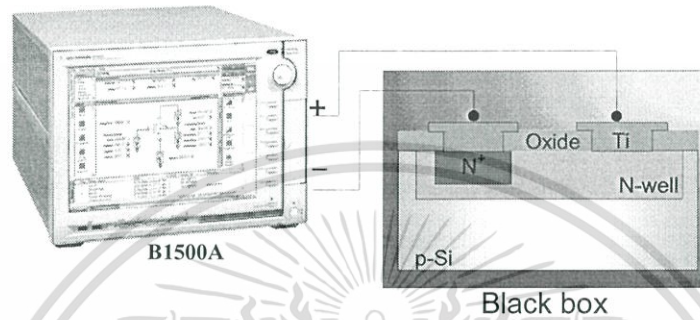


รูปที่ 4.5 สมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/p-si

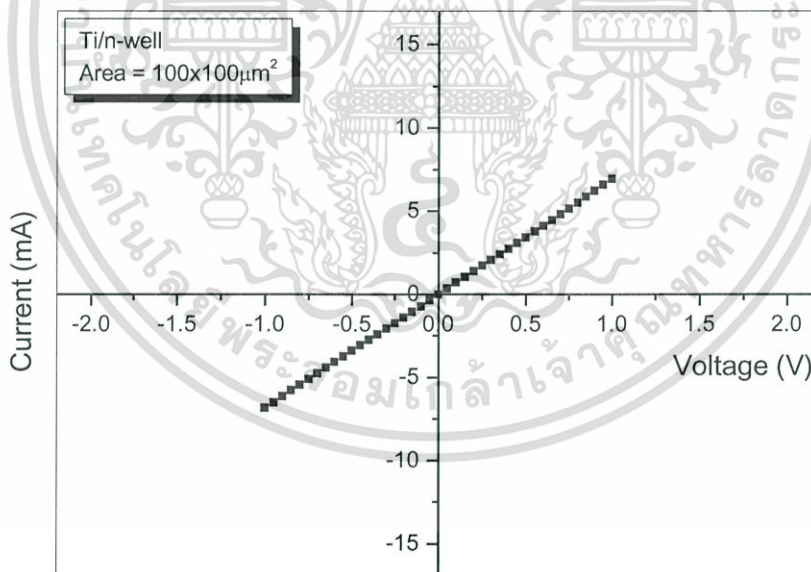
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมสัมผัสกับแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ผลการทดลองพบว่ารอยสัมผัสนี้มีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.5 มีค่าความต้านทานประมาณ 77.5 โอห์ม

4.1.3 ผลการทดสอบรอยสัมผัสโครงสร้าง Ti/n-well



รูปที่ 4.6 การวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัส Ti/n-well

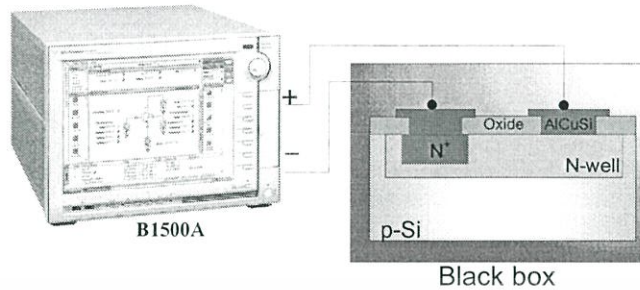


รูปที่ 4.7 สมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสโครงสร้าง Ti/n-well

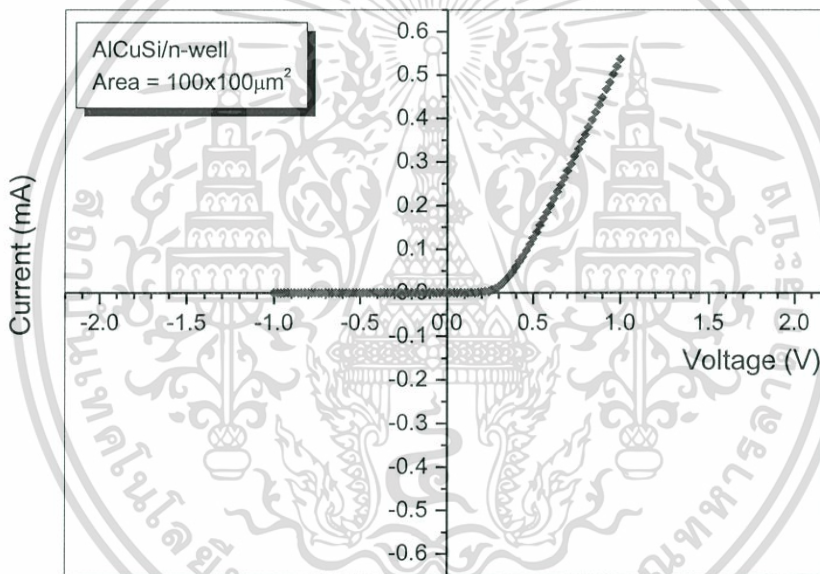
ผลการวัดสมบัติกระแส-แรงดันรอยสัมผัส Ti/n-well แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่ารอยสัมผัส Ti/n-well มีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยมีความต้านทานประมาณ 133 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการทดสอบรอยสัมผัส AlCuSi/n-well

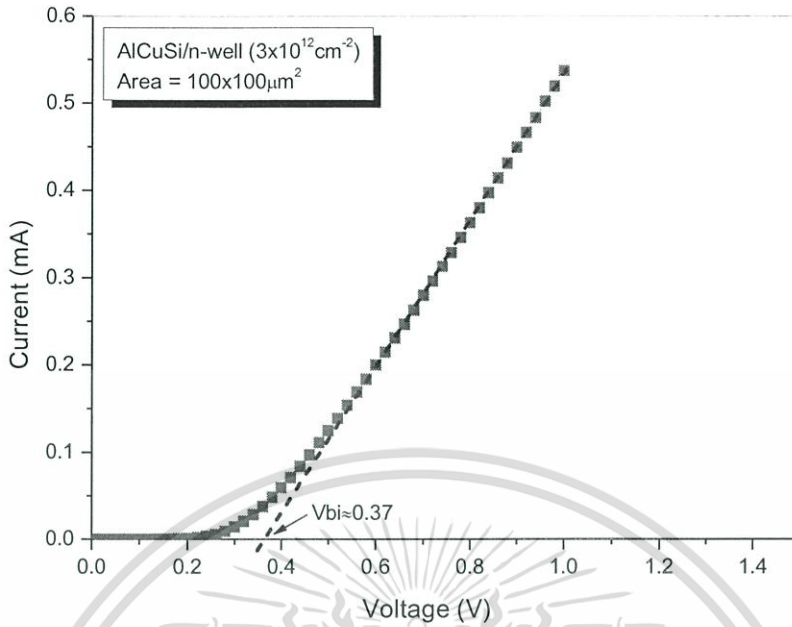


รูปที่ 4.8 การวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well



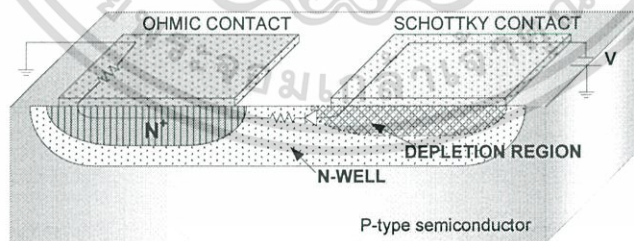
รูปที่ 4.9 สมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well

รอยสัมผัส AlCuSi/n-well ให้คุณสมบัติกระแส-แรงดันดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่ารอยสัมผัส AlCuSi/n-well เป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ จากรูปที่ 4.10 ค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well มีค่าประมาณ 0.37 V



รูปที่ 4.10 การหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well

จากการออกแบบรอยสัมผัส AlCuSi/n-well ในแนวลานาร์ ลักษณะของวงจรมูลของรอยสัมผัส แสดงดังรูปที่ 4.11 โดย R_{ohm} คือความต้านทานที่รอยสัมผัสโอห์มมีค่าน้อยมาก R_{chan} คือความต้านทานระหว่างสองขั้วโลหะสามารถลดลงได้หากระยะห่างระหว่างโลหะน้อยมาก ส่วนรอยสัมผัสชนิดกึ่งมองเป็นเหมือนไดโอดตัวหนึ่ง ที่มีค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อ (C_j) ขนานกับความต้านทานที่รอยต่อ (R_j)



(ก) แผนภาพโครงสร้างทดสอบรอยสัมผัส AlCuSi/n-well



(ข) วงจรมูลของโครงสร้างทดสอบรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

รูปที่ 4.11 แบบจำลองแผนภาพและวงจรมูลภายในโครงสร้างทดสอบรอยสัมผัส AlCuSi/n-well [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบรอยสัมผัสต่างๆ ดังหัวข้อ 4.1.1 ถึง 4.1.4 จึงสามารถสรุปได้ว่ารอยสัมผัสที่ให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเป็นแบบซีดก๊อคือ รอยสัมผัส AlCuSi/n-well และ Ti/p-si จากการศึกษากระบวนการสร้างซีมอสที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์พบว่า แผ่นสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นชนิดพี และมีการสร้างชั้นโลหะจำนวน 2 ชั้นคือชั้นโลหะ Ti/TiN/AlCuSi/TiN และชั้นโลหะ AlCuSi/TiN (TiN มักถูกใช้เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนของแสงในกระบวนการถ่ายย่อแบบ) แต่ทั้งนี้เนื่องจากโลหะไททาเนียมที่ถูกใช้ในชั้นโลหะที่ 1 มีความบางมาก (30nm) ซึ่งจะถูกใช้เป็นเพียงชั้นป้องกันการสไปค์ของอลูมิเนียมแพร่ลงไปยังชั้นซิลิกอนซึ่งไม่เหมาะสมนำไปสร้างเป็นขั้วโลหะของอุปกรณ์ได้ ทั้งนี้หากต้องการสร้างโดยใช้โลหะไททาเนียมเป็นขั้วสำหรับอุปกรณ์ตรวจรับแสงก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มกระบวนการซึ่งอาจทำให้ต้นทุนในการสร้างสูง อีกทั้งการสร้างบน p-Substrate อุปกรณ์ตรวจรับแสงอาจถูกต่อร่วมกับวงจรอื่นๆ อีกด้วย และจากการศึกษาคุณสมบัติของรอยสัมผัส Ti/p-si นั้นพบว่าให้ก็สมบัติรอยสัมผัสซีดก๊อที่ดี และหากต้องการสร้างอุปกรณ์โฟโตไดโอดโดยไม่สร้างร่วมกับซีมอสก็สามารถใช้โลหะไททาเนียมได้เช่นกัน ซึ่งสามารถพัฒนาให้รอยสัมผัสมีค่ากำแพงซีดก๊อสูงได้อีกแต่จำเป็นต้องใช้กระบวนการอื่นๆ ประกอบด้วย เช่น กระบวนการทางความร้อนแบบใช้เวลาดสั้น (Rapid Thermal Anneal) [19] โดย อาจทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโลหะอลูมิเนียมอัลลอยมีความเหมาะสมมากกว่าโลหะไททาเนียม ซึ่งจะทำให้การเลือกใช้รอยสัมผัสของบ่อเอ็น (n-well) สัมผัสกับโลหะอลูมิเนียมอัลลอย (AlCuSi) มาทำการทดสอบเงื่อนไขในการสร้างเป็นอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM ร่วมกับกระบวนการสร้างซีมอสต่อไป

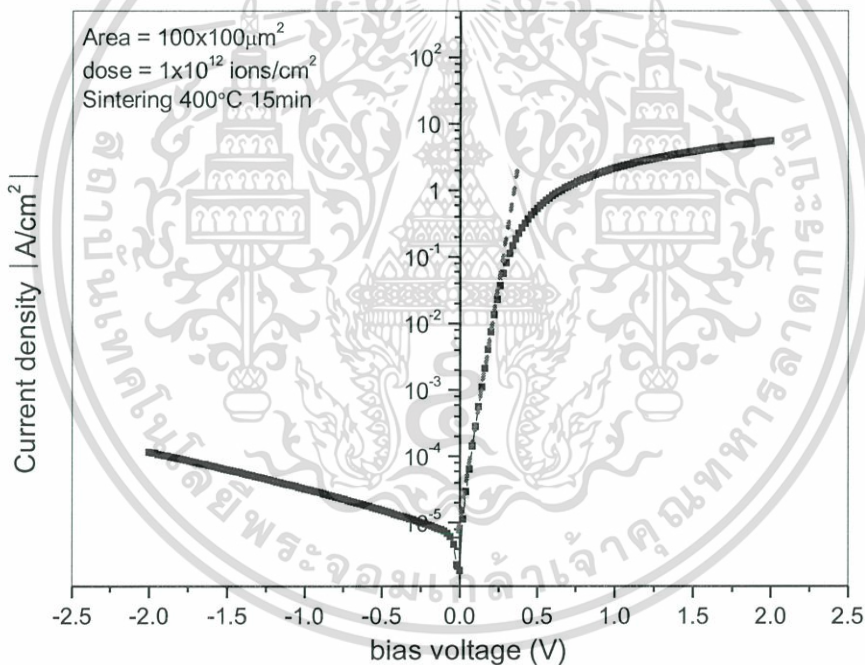
4.2 ผลกระทบจากปริมาณสารเจือปนบ่อเอ็น และอุณหภูมิซินเตอร์ริงของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well

จากการทดลองที่ 4.1 พบว่ารอยสัมผัส AlCuSi/n-well ให้คุณสมบัติรอยสัมผัสแบบซีดก๊อและเหมาะสมสำหรับสร้างร่วมกับวงจรรวมซีมอส แต่ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างอุปกรณ์ร่วมกับวงจรรวมซีมอสนั้นจำเป็นต้องใช้เงื่อนไข n-well ของซีมอสเท่านั้น ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการทดสอบปริมาณสารเจือค่าต่างๆ ของ n-well สัมผัสกับโลหะอลูมิเนียมอัลลอย และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซินเตอร์ริง เพื่อศึกษารอยสัมผัส เนื่องจากทั้งปริมาณสารเจือ และอุณหภูมิซินเตอร์ริงสามารถทำให้รอยสัมผัส AlCuSi/n-well เป็นรอยสัมผัสซีดก๊อหรือโอห์มมิกได้ อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือค่าต่าง ๆ และอุณหภูมิซินเตอร์ริงอาจมีผลให้อุปกรณ์รับแสงมีประสิทธิภาพดีขึ้น กรณีที่ไม่ต้องการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงรวมกับกระบวนการซีมอส

4.2.1 ผลการทดลองปริมาณสารเจือและอุณหภูมิซินเตอร์ริงรอยสัมผัส AlCuSi/n-well

หลังจากสร้างชิ้นงานจากการทดลองในหัวข้อที่ 3.1.4 สำหรับเงื่อนไขปริมาณสารเจือใน n-well ค่าต่างๆ นำชิ้นงานผ่านการซินเตอร์ริง โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 3 ส่วน ทำการซินเตอร์ริงชิ้นงานที่เงื่อนไข 300, 400 และ 500 °C จากนั้นวัดลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบรอยสัมผัส กรณีได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ โดยทำการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 4.8 เพื่อหาความสูงกำแพงช็อคกี และค่าแรงดันภายในสำหรับเงื่อนไขปริมาณสารเจือใน n-well ค่าต่างๆ

จากผลการวัดกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส สามารถหาค่าของความสูงกำแพงช็อคกีได้ โดยนำผลกระแส-แรงดัน แสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การหาความหนาแน่นกระแสอิมิตซ์ย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well ที่ ปริมาณสารเจือ 1×10^{12} ions/cm² อุณหภูมิซินเตอร์ริง 400 °C

โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้างสมการ

$$J = \frac{I}{A} = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ $V_A = 0$ เป็นผลให้ J มีค่าเท่ากับ J_0 โดยที่ J_0 คือความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนกลับมีค่าเท่ากับ

$$J_0 = \frac{I_0}{A} = RT^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

และจากการคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิเล็กตรอนกลับ (J_0) จากสมการที่ (4.2) สามารถคำนวณหาค่าแรงช็อคติ๊กซ์ของรอยสัมผัสได้ดังสมการที่ (4.3) [20 - 21]

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{RT^2}{J_0}\right) \quad (4.3)$$

โดย

ϕ_{bn} คือ ความสูงของกำแพงช็อคติ๊กซ์

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน (Richardson constant)

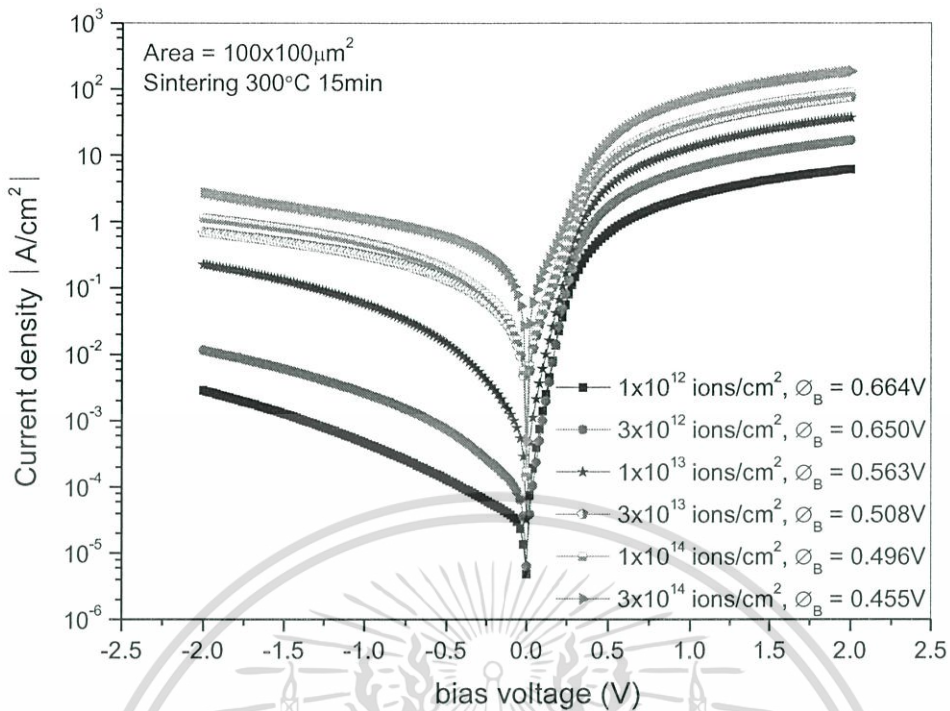
q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

k คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์

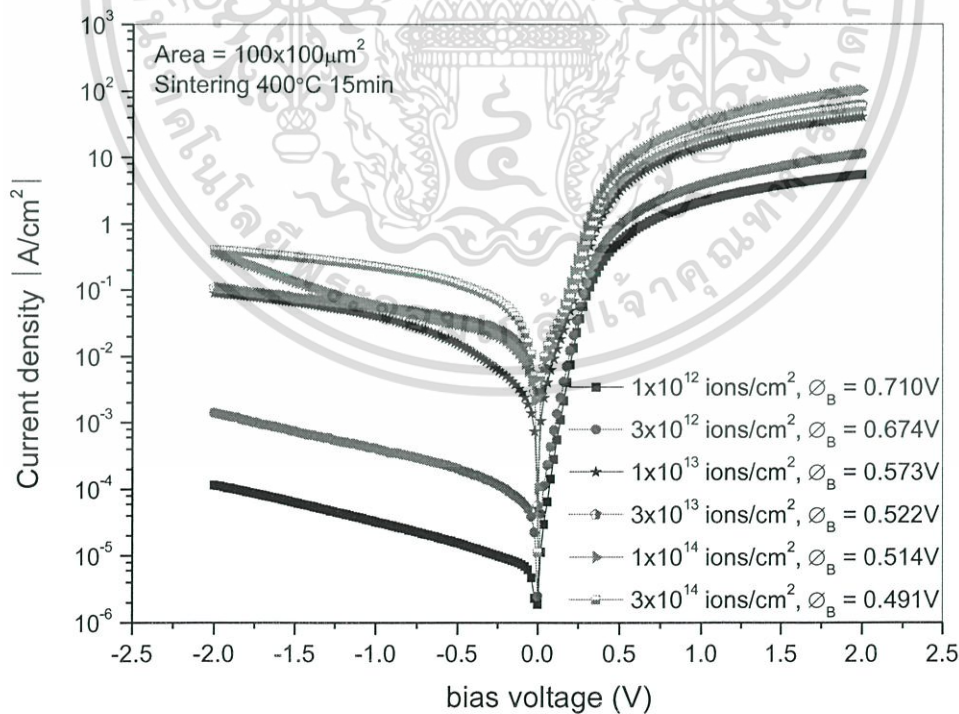
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.12 เป็นตัวอย่างแสดงการหาความสูงกำแพงช็อคติ๊กซ์ที่ปริมาณสารเจือปนไน 1×10^{12} ions/cm² โดยแกนตั้งเป็นค่าความหนาแน่นกระแส และหาค่า J_0 ได้เท่ากับ 1×10^{-5} A/cm² และนำค่าที่อ่านได้ คำนวณหาความสูงกำแพงช็อคติ๊กซ์ในสมการที่ (4.3) ได้ค่าความสูงกำแพงช็อคติ๊กซ์เท่ากับ 0.71 V

รูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 เป็นผลความหนาแน่นกระแส-แรงดัน สำหรับเงื่อนไขปริมาณสารเจือปนใน n-well ที่เงื่อนไข 1×10^{12} , 3×10^{12} , 1×10^{13} , 3×10^{13} , 1×10^{14} และ 3×10^{14} ions/cm² โดยซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 °C

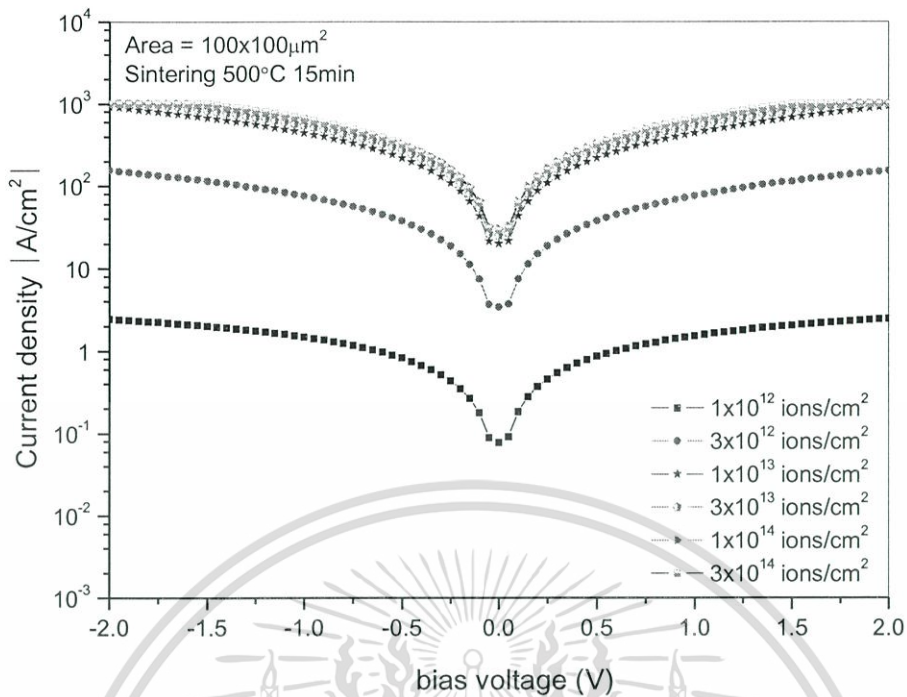


รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well สำหรับเงื่อนไขปริมาตรสารเจือค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 300°C



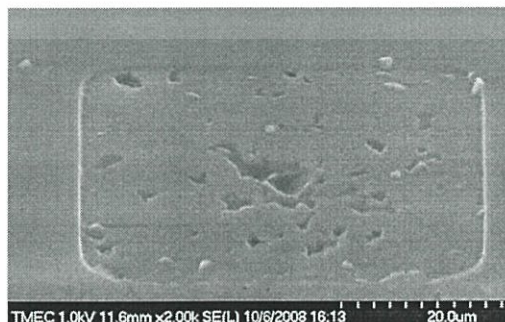
รูปที่ 4.14 ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well สำหรับเงื่อนไขปริมาตรสารเจือค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 400°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well สำหรับเงื่อนไขปริมาณสารเจือค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500°C

พิจารณารูปความหนาแน่นกระแส-แรงดัน ของอุณหภูมิซินเตอร์ริงทั้ง 3 ค่า พบว่าอุณหภูมิซินเตอร์ริง 300-400°C ให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสที่กระแสสามารถไหลได้ในทิศทางเดียวซึ่งเป็นคุณสมบัติของรอยสัมผัสชนิด Schottky แต่อุณหภูมิ 500°C พบว่าความหนาแน่นของกระแสมีค่าสูงและมีค่าเท่ากันทั้งกรณีไบอัสตรงและไบอัสกลับ ซึ่งรอยสัมผัสมีลักษณะไม่เป็นไปตามคุณสมบัติของรอยสัมผัสชนิด Schottky โดยมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกคือยอมให้กระแสไหลผ่านได้ดีทั้ง 2 ทิศทาง จึงตั้งข้อสังเกตว่าอุณหภูมิเนี่ยมอาจแพร่ไปยังซิลิกอน และทำการทดสอบโดยทำการลอกฟิล์มอุณหภูมิเนี่ยมออกด้วยสารละลาย Aluminum etch เพื่อตรวจสอบพื้นผิวซิลิกอนของรอยสัมผัส

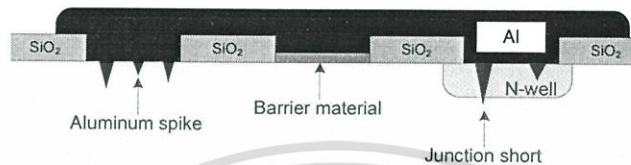


รูปที่ 4.16 ภาพจาก SEM ของรอยสัมผัสที่ปริมาณสารเจือ 1×10^{12} ions/cm² ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง

500°C

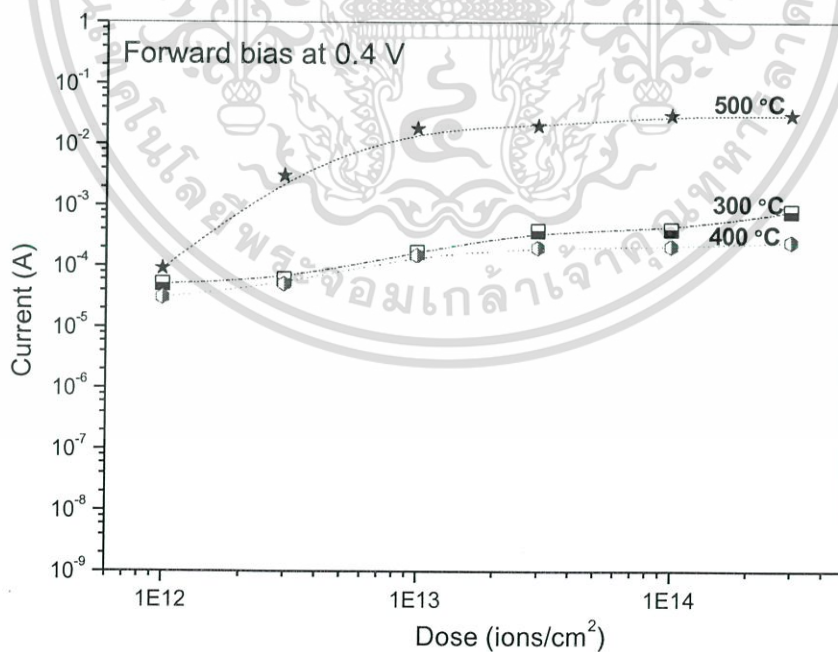
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตรวจสอบพื้นผิวของซิลิกอนแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าพื้นผิวของซิลิกอนมีลักษณะเป็นหลุมที่ผิวของซิลิกอน เนื่องมาจากการแพร่ของโลหะอลูมิเนียมไปยังซิลิกอนเกิดขึ้น (Aluminium spiking) มีผลให้เกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น (โดย n-well มีความลึกประมาณ $2\ \mu\text{m}$) ดังนั้นคุณสมบัติของรอยสัมผัสที่ได้จึงเป็นลักษณะรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก แบบจำลองการเกิดอลูมิเนียมแพร่ไปยังซิลิกอนแสดงดังรูปที่ 4.17



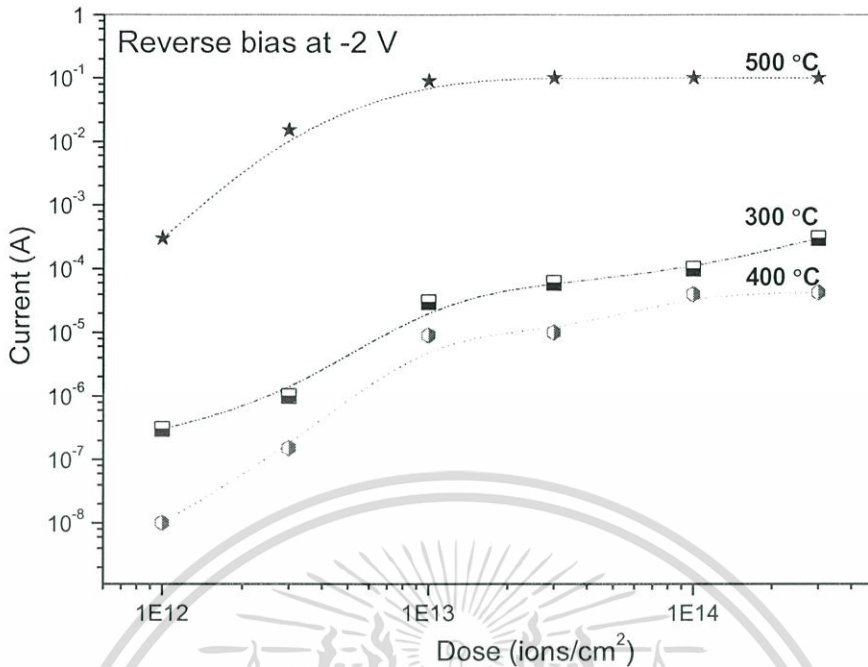
รูปที่ 4.17 การเกิดอลูมิเนียมแพร่ไปยังซิลิกอน (Aluminium Spiking) [22]

จากกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันสำหรับแต่ละปริมาณสารเจือที่อุณหภูมิซิลิคอนจริง 300 และ $400\ ^\circ\text{C}$ พบว่าปริมาณสารเจือที่เพิ่มมากขึ้น มีผลให้ความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.19 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของกระแสขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับต่อปริมาณสารเจือ



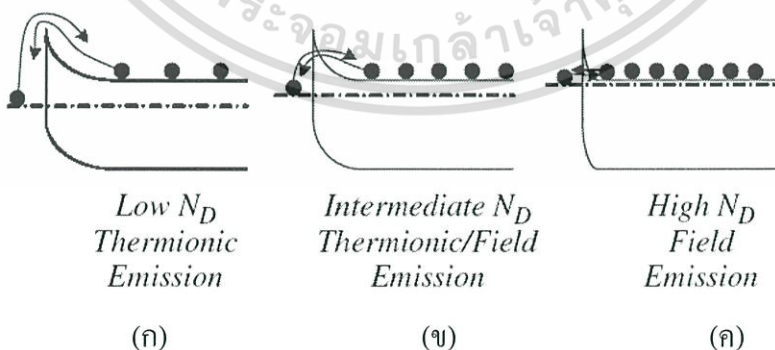
รูปที่ 4.18 กระแสของรอยสัมผัสขณะไบอัสตรงที่ปริมาณสารเจือค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กระแสของรอยสัมผัสขณะไบอัสกลับที่ปริมาณสารเจือค่าต่างๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ของกระแส-ปริมาณสารเจือดังรูปที่ 4.18 ถึงรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณสารเจือมีค่าสูงขึ้น โดยกระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัส อุณหภูมิ 300-500 °C จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ อันเนื่องมาจากกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะ ผ่านรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำสำหรับปริมาณสารเจือต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.20 โดย ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_D) มีค่ามากขึ้นตามปริมาณสารเจือ (Dose) [23] อธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.20 แถบพลังงานของรอยสัมผัสและการเคลื่อนที่ของพาหะที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

- (ก) กรณีความหนาแน่นอะตอมสารเจือต่ำ
- (ข) กรณีความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่าปานกลาง
- (ค) กรณีความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กรณีที่ปริมาณสารเจือค่าต่ำหรือความหนาแน่นสารเจือค่า แถบพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.20(ก) กระแสจะไหลในลักษณะ Thermionic Emissions หรือเรียกว่ากระบวนการปลดปล่อยความร้อน (อิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจะข้ามกำแพงศักย์ไปยังด้านโลหะได้ จะต้องมีความสูงกว่าอิเล็กตรอนในภาวะสมดุลด้านโลหะ) อิเล็กตรอนทั้งด้านโลหะและด้านสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสได้ [24]

2. กรณีปริมาณสารเจือค่าปานกลางหรือความหนาแน่นอะตอมสารเจือปานกลาง ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Thermionic field emissions โดยพาหะถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยอุณหภูมิจากบริเวณ Space Charge จะมีขนาดแคบพอที่จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ข้ามและทะลุผ่านกำแพงศักย์ไปได้ [25-26]

3. สารกึ่งตัวนำที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูงเมื่อสัมผัสกับโลหะ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยสัมผัสจะมีค่าลดลง เมื่อความหนาแน่นอะตอมของสารเจือด้านสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้บริเวณปลอดพาหะมีขนาดแคบมาก ทำให้เกิดปรากฏการณ์ทะลุอุโมงค์ (Tunneling) ของพาหะผ่านกำแพงศักย์ที่รอยสัมผัสของสารทั้งสอง ซึ่งกรณีนี้อิเล็กตรอนจากทั้งสองด้านสามารถเคลื่อนที่แบบทะลุผ่านกำแพงศักย์ไปมาได้สองทิศทาง แสดงดังรูปที่ 4.20(ค) ซึ่งมีผลให้คุณสมบัติรอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิก ไม่ว่าจะได้รับไบอัสแบบใดก็ตาม

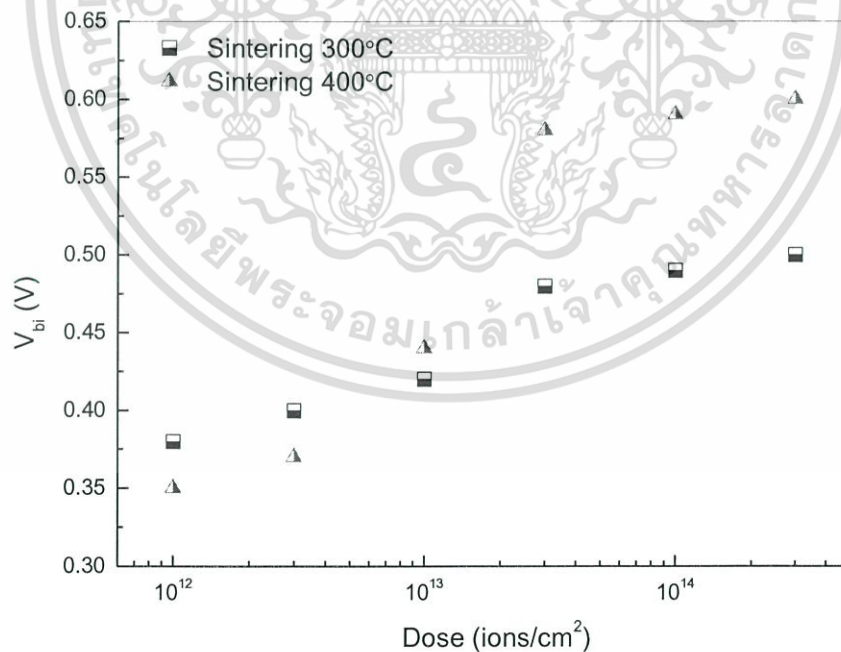
จากการทดลองปริมาณสารเจือและอุณหภูมิซินเตอร์ริงของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well สรุปได้ว่าอุณหภูมิซินเตอร์ริง 500°C เป็นอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมสำหรับรอยสัมผัส AlCuSi/n-well เนื่องจาก n-well มีความลึกเพียง $2\ \mu\text{m}$ (ความลึกขึ้นอยู่กับพลังงานในการยิงฝังประจุ) ดังนั้นซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้เกิดการแพร่ของโลหะไปยังซิลิกอนได้มากกว่าที่ซินเตอร์ริงอุณหภูมิต่ำกว่า มีผลทำให้เกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น โดยคุณสมบัติรอยสัมผัสที่ได้เป็นแบบโอห์มมิก อีกทั้งอุณหภูมิซินเตอร์ริง 500°C ไม่สามารถใช้ในการสร้างชิมอสได้เนื่องจากอุณหภูมิสูงใกล้จุดหลอมเหลวของอลูมิเนียม ดังนั้นจึงไม่นำอุณหภูมิ 500°C มาพิจารณาในการสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจรับแสงร่วมกับการสร้างชิมอส ส่วนอุณหภูมิ $300\text{-}400^{\circ}\text{C}$ พบว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัสทั้งไบอัสตรงและไบอัสกลับที่อุณหภูมิ 300°C มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 400°C แต่ต่างกันไม่มากนัก ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะพิจารณาเฉพาะอุณหภูมิ $300\text{-}400^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น

จากผลของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือใน n-well ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง $300\text{-}400^{\circ}\text{C}$ ค่าแรงดันภายในที่หาได้จากการกราฟกระแส-แรงดัน (วิธีการหาค่าแรงดันภายในได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.1) และค่าความสูงกำแพงศักย์ที่หาได้จากการกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดัน สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันภายในและความสูงกำแพงช็อคติย์

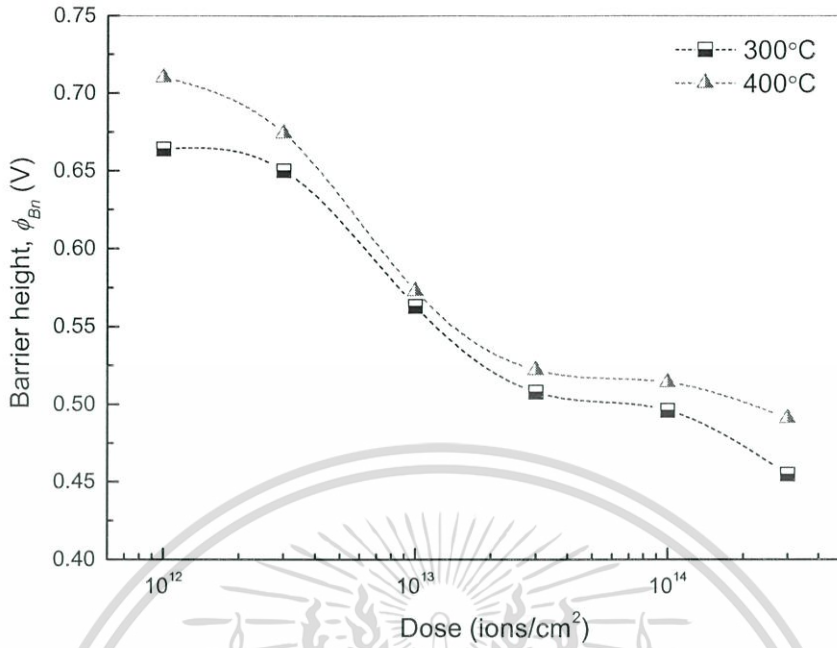
ปริมาณสารเจือ (ions / cm ⁻²)	300 °C		400 °C	
	V_{bi} (V)	ϕ_{Bn} (V)	V_{bi} (V)	ϕ_{Bn} (V)
1x10 ¹²	0.38	0.664	0.35	0.71
3x10 ¹²	0.40	0.65	0.37	0.674
1x10 ¹³	0.42	0.563	0.44	0.573
3x10 ¹³	0.48	0.508	0.58	0.522
1x10 ¹⁴	0.49	0.496	0.59	0.514
3x10 ¹⁴	0.50	0.455	0.6	0.491

ค่าแรงดันภายใน และความสูงกำแพงช็อคติย์ จากตารางที่ 4.1 นำมาแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันภายใน (V_{bi}) ต่อปริมาณสารเจือ (Dose) ดังรูปที่ 4.21 ส่วนรูปที่ 4.22 เป็นความสัมพันธ์ของความสูงกำแพงช็อคติย์ต่อปริมาณสารเจือค่าต่างๆ จากการหาค่าแรงดันภายในจากสมบัติกระแสแรงดันพบว่าเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้น (Dose) ค่าแรงดันภายในมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณสารเจือที่เพิ่มขึ้นกรณีอุณหภูมิซินเตอร์ริงสูงขึ้นไปมีผลให้ค่าแรงดันภายในสูงขึ้นด้วย

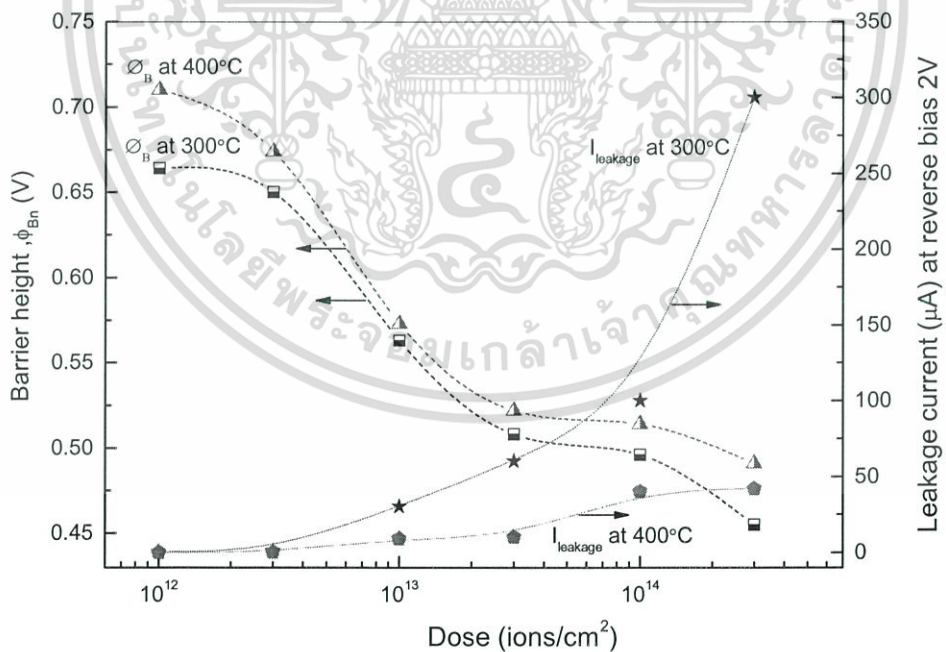


รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันภายในต่อปริมาณสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของความสูงกำแพงช็อคติย์ต่อปริมาณสารเจือ



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ของความสูงกำแพงช็อคติย์ กระแสรั่วไหลรอยสัมผัส ต่อปริมาณสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

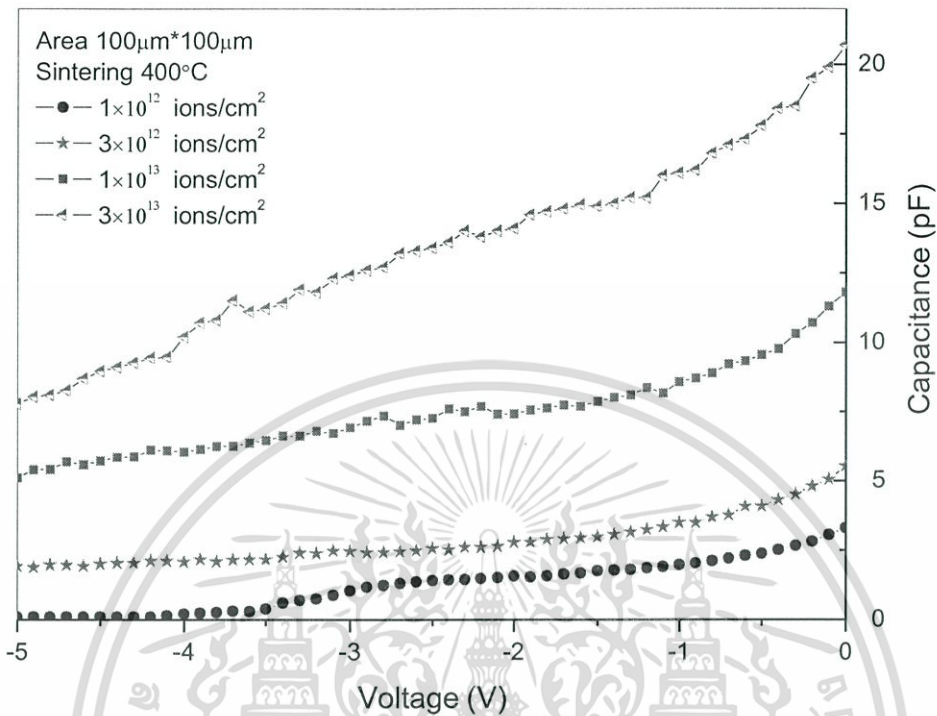
จากรูปที่ 4.22 พบว่าปริมาณสารเจือที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสูงกำแพงช็อคกีมีค่าลดลง กำแพงช็อคกีที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 400°C มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 300°C เนื่องจากอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่เหมาะสมช่วยลดสถานะที่ผิวของรอยสัมผัส [27] และทำให้รอยสัมผัสสมบูรณ์ขึ้น

จากผลความสูงกำแพงช็อคกีต่อปริมาณสารเจือในรูปที่ 4.22 เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของกระแสขณะได้รับไบอัสกลับที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือจากรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อปริมาณสารเจือสูงขึ้นทำให้กำแพงช็อคกีมีค่าลดลง และมีผลให้กระแสไหลผ่านรอยสัมผัสเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของความสูงกำแพงช็อคกี และกระแสรั่วไหลต่อปริมาณสารเจือที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง $300\text{-}400^{\circ}\text{C}$ และจากสมการที่ (4.1) ค่า I_0 คือค่ากระแสอิ่มตัว โดยกระแสอิ่มตัวนี้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์ริงสูงขึ้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ากระแสอิ่มตัวจะมีค่าลดลงเมื่อกำแพงช็อคกีมีค่าสูงขึ้น [28]

จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือ และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซินเตอร์ริง ผลการวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัสพิจารณาได้ว่ารอยสัมผัสที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 400°C เป็นอุณหภูมิเหมาะสมในการซินเตอร์ริงรอยสัมผัส AlCuSi/n-well เนื่องจากให้กระแสรั่วไหลผ่านรอยสัมผัสน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C อีกทั้งให้ค่าความสูงกำแพงช็อคกีมากกว่าด้วย หากกระบวนการสร้างซิมอสมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซินเตอร์ริงให้มีค่าน้อยกว่า 400°C ทั้งนี้พบว่ายังสามารถสร้างรอยสัมผัส AlCuSi/n-well ให้เป็นรอยสัมผัสช็อคกีได้

และจากการพิจารณาค่าของปริมาณสารเจือ พบว่าปริมาณสารเจือที่ 1×10^{14} และ 3×10^{14} ions/cm² มีค่ากระแสรั่วไหลผ่านรอยสัมผัสสูง และการที่กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสมีค่ามากส่งผลให้อัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมีค่าน้อย ทำให้อุปกรณ์โฟโตไดโอดที่จะทำการสร้างไม่สามารถทำงานได้ตามต้องการ อีกทั้งปริมาณสารเจือค่ามากไม่เหมาะสำหรับสร้างเป็น n-well สำหรับสร้างซิมอสได้ ดังนั้นจึงทำการเลือกเงื่อนไขสารเจือค่า 1×10^{12} , 3×10^{12} , 1×10^{13} และ 3×10^{13} ions/cm² มาพิจารณาสร้างเป็นโฟโตไดโอดต่อไป

4.2.2 ความจุไฟฟ้าต่อแรงดันของรอยสัมผัส AICuSi/n-well ที่เปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือ

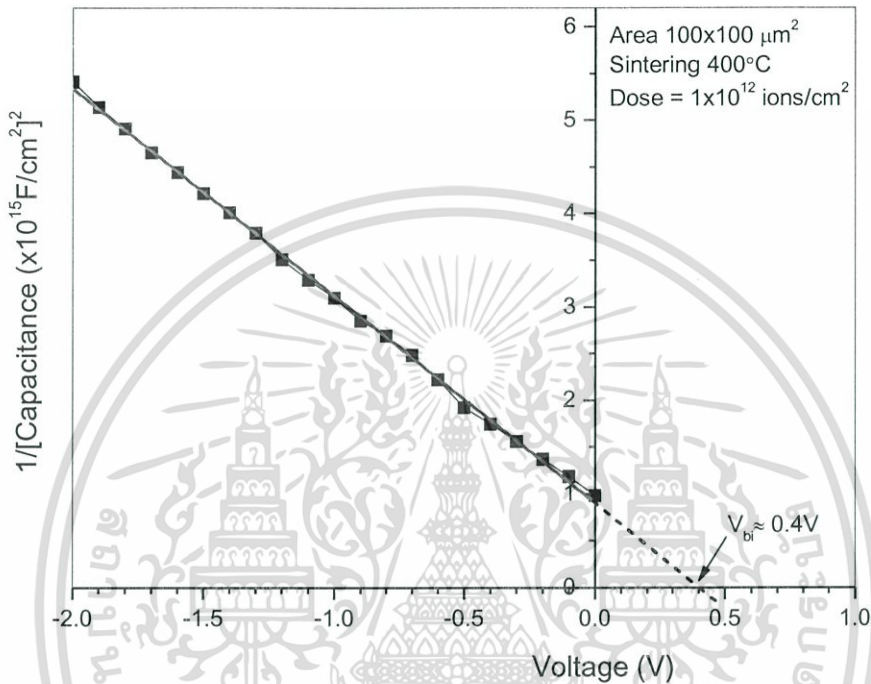


รูปที่ 4.24 ความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$ C 15 นาที

รูปที่ 4.24 ความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส จากผลการวัดพบว่า ปริมาณสารเจือที่ 1×10^{12} , 3×10^{12} , 1×10^{13} , และ 3×10^{13} ions/cm 2 มีค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันไบอัส -5 โวลต์ประมาณ 3, 5.9, 12 และ 21 pF ความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.8) เมื่อความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยความจุไฟฟ้าของรอยต่อเปลี่ยนแปลงผกผันกับรากที่สองของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ ซึ่งก็คือ ($C \propto \frac{1}{V^2}$) [29] จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดัน ไบอัสย้อนกลับมากขึ้น ความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงด้วย

4.2.3 การหาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือของรอยสัมผัส AICuSi/n-well จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือ

การหาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือของรอยสัมผัสสามารถหาได้จากการวัดความจุไฟฟ้า-แรงดันจากหัวข้อ 4.2.2



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันที่ได้จากการวัดความจุไฟฟ้า

ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ หาได้โดยนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{C^2}$ กับแรงดัน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.4) จะพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.4) สามารถหาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (atoms/cm^3) ได้ดังสมการที่ (4.5) [30]

$$\left(\frac{1}{C^2}\right) = 2 \left(\frac{V_{bi} - V}{2\epsilon_s N_D}\right) \quad (4.4)$$

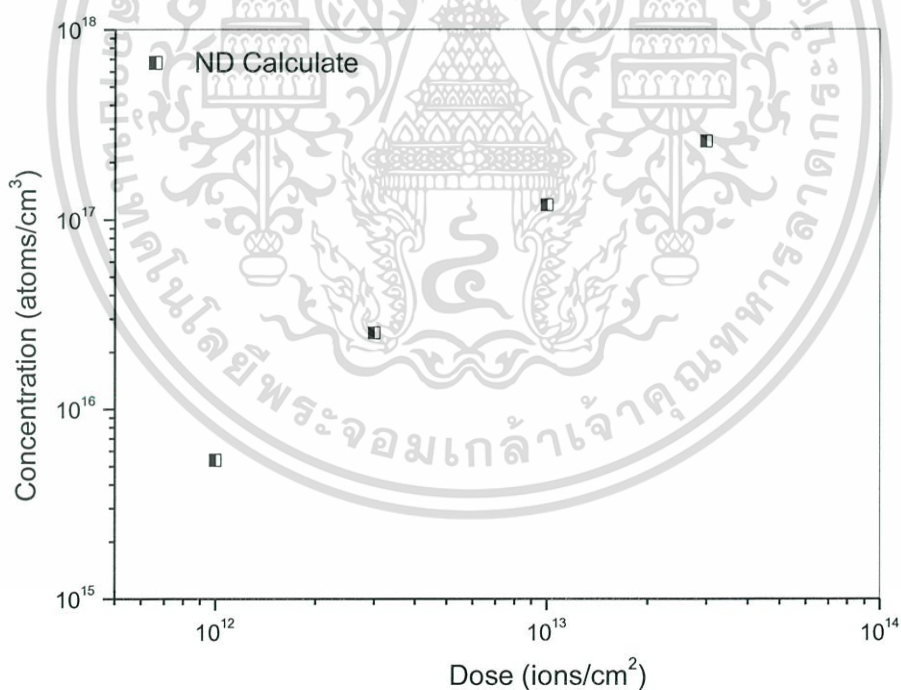
$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[\frac{-1}{d(1/C^2)/dv} \right] \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{C^2}$ กับแรงดัน สำหรับปริมาณสารเจือค่า 1×10^{12} , 3×10^{12} , 1×10^{13} , และ 3×10^{13} ions/cm² หาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือได้ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_D) ต่อปริมาณสารเจือ (Dose) พบว่าปริมาณสารเจือที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ปริมาณสารเจือค่าต่างๆ

ปริมาณสารเจือ (ions / cm ²)	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (atoms / cm ³)
1×10^{12}	5.39×10^{15}
3×10^{12}	2.53×10^{16}
1×10^{13}	1.2×10^{17}
3×10^{13}	2.59×10^{17}

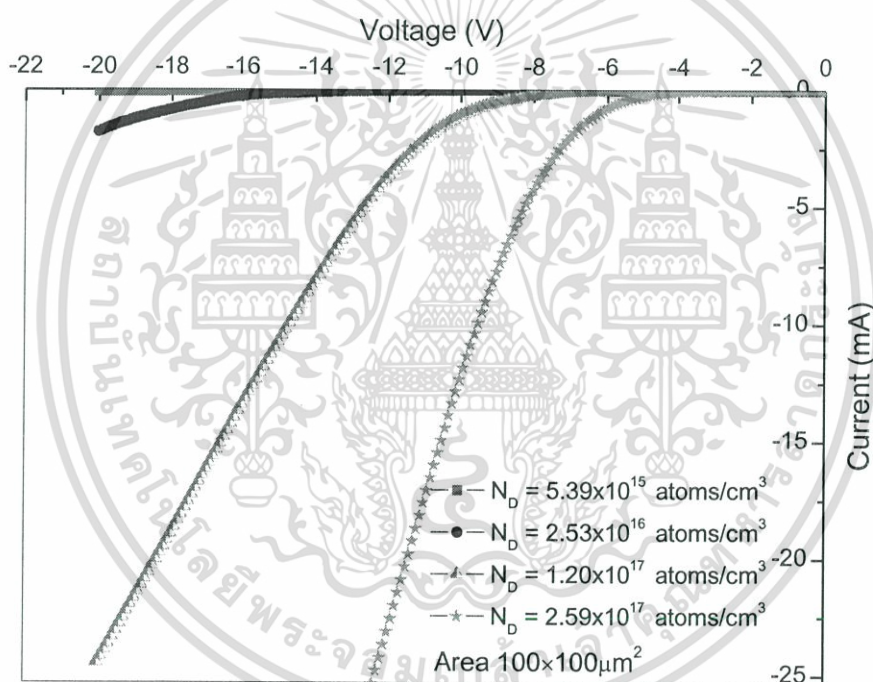


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_D) ต่อปริมาณสารเจือ (Dose)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 แรงดันพังทลายของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well ที่เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

นำเงื่อนไขของรอยสัมผัส AlCuSi/n-well ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่า 5.39×10^{15} , 2.53×10^{16} , 1.2×10^{17} และ 2.59×10^{17} atoms/cm³ (1×10^{12} , 3×10^{12} , 1×10^{13} และ 3×10^{13} ions/cm²) ทาค่าแรงดันพังทลายของรอยสัมผัส และผลการวัดพบว่ารอยสัมผัส AlCuSi/n-well ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่ามากที่สุดคือ 2.59×10^{17} atoms/cm³ (3×10^{13} ions/cm²) มีค่าแรงดันพังทลายต่ำสุดคือ -6 V ส่วนความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่าน้อยสุดที่ 5.39×10^{15} atoms/cm³ (1×10^{12} ions/cm²) มีค่าแรงดันพังทลายที่มากกว่า -20 V โดยความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่าต่ำๆ จะให้คุณสมบัติการพังทลายที่แรงดันสูง [31]



รูปที่ 4.27 แรงดันพังทลายของรอยสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

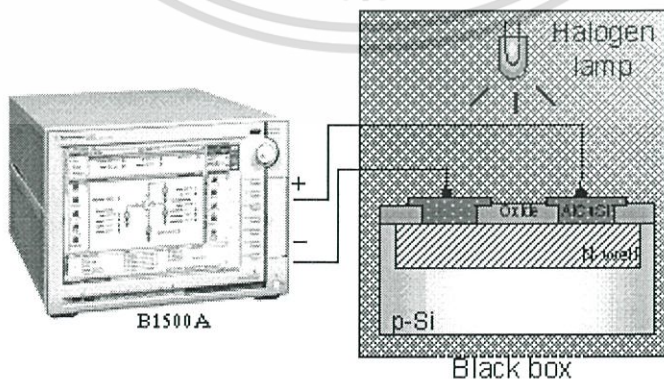
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 การทดสอบโฟโตไดโอด MSM ที่เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

จากหัวข้อที่ผ่านมานั้นพบว่าที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 400 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสร้างรอยสัมผัส AlCuSi/n-well และจากการเลือกเงื่อนไขสารเจือที่ 5.39×10^{15} , 2.53×10^{16} , 1.2×10^{17} และ 2.59×10^{17} atoms/cm³ (1×10^{12} , 3×10^{12} , 1×10^{13} และ 3×10^{13} ions/cm²) ที่ตั้งข้อสังเกตว่าจะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์โฟโตไดโอดได้ จากการทดสอบรอยสัมผัสสำหรับเงื่อนไขต่างๆ ที่กล่าวมาในหัวข้อที่ผ่านมานั้นเป็นเงื่อนไขของการทดสอบรอยสัมผัสชนิดกึ่งข้างเดียว ซึ่งวัตถุประสงค์หลักในหัวข้อวิจัยนี้เป็นการสร้างอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM ที่ต้องการรอยสัมผัสชนิดกึ่ง 2 รอยสัมผัส ดังนั้นจึงนำเงื่อนไขที่ได้เลือกจากหัวข้อที่ผ่านมา ทดสอบสร้างเป็นอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM ที่มีขั้วอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว โดยเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ 9.7×10^{15} , 3×10^{16} , 1×10^{17} และ 3×10^{17} atoms/cm³ โดยขั้นตอนในการสร้างนั้นคล้ายกับขั้นตอนการสร้างโครงสร้างทดสอบรอยสัมผัส AlCuSi/n-well แต่แตกต่างกันที่ไม่ต้องยิงฝั่ประจุอาเซนิกเข้มข้นเพื่อทำให้เป็นขั้วโอห์มมิก แสดงดังรูปที่ 4.28



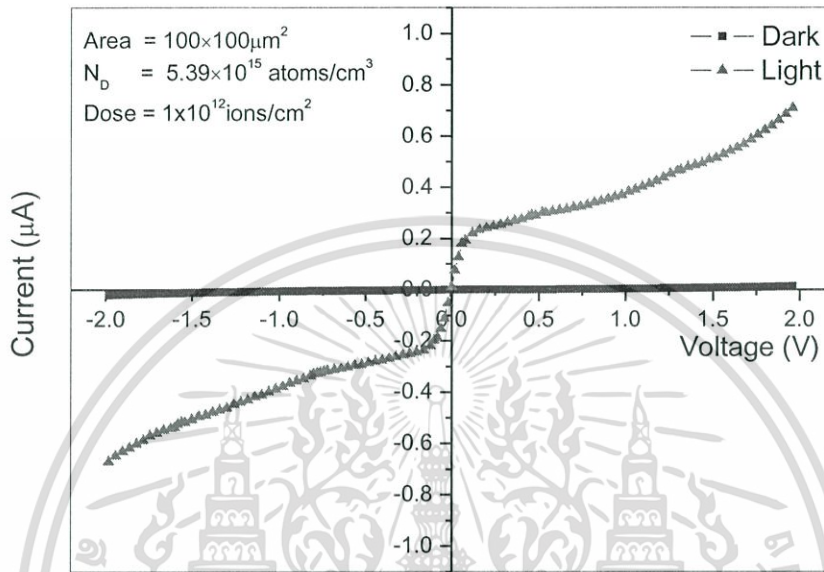
รูปที่ 4.28 โครงสร้างทดสอบโฟโตไดโอด MSM



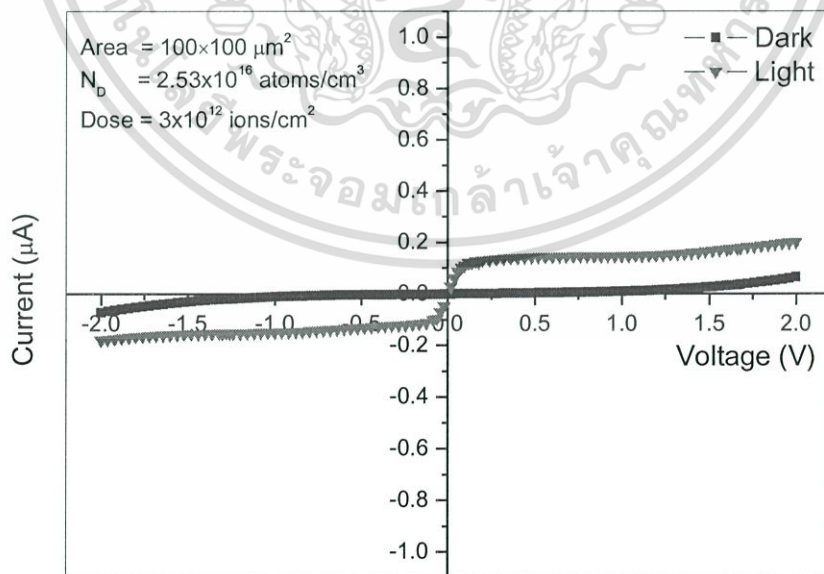
รูปที่ 4.29 การทดสอบโฟโตไดโอด MSM ที่มีขั้วอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากสร้างอุปกรณ์แล้ว นำอุปกรณ์วัดสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และที่แสงฮาโลเจนตกกระทบที่ 13,000 Lux และวัดสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์โฟโตไดโอด MSM ที่มีขั้วอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว โดยทำการต่ออุปกรณ์การวัดดังรูปที่ 4.29

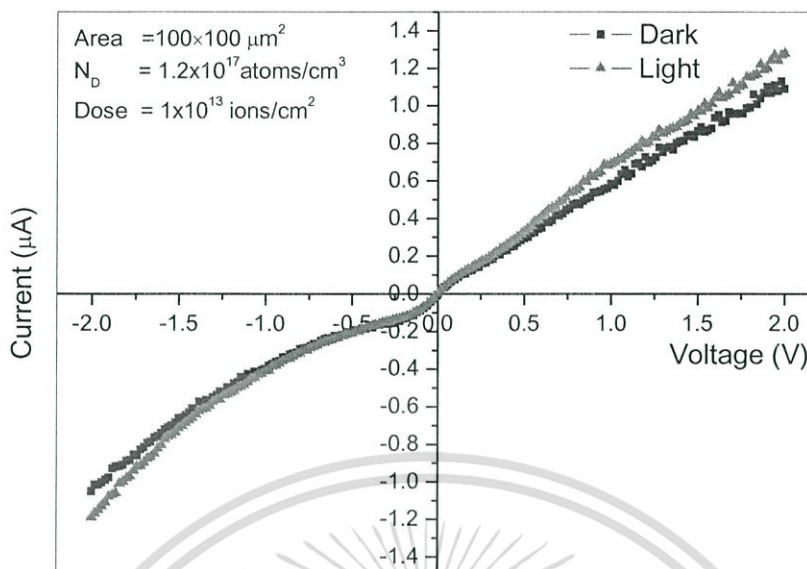


รูปที่ 4.30 กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ n-well ค่า $5.39 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^3$

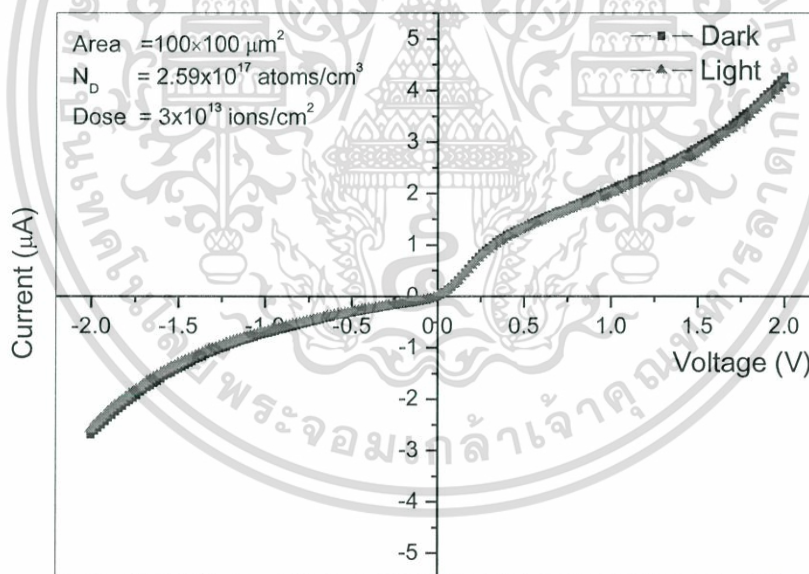


รูปที่ 4.31 กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ n-well ค่า $2.53 \times 10^{16} \text{ atoms/cm}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



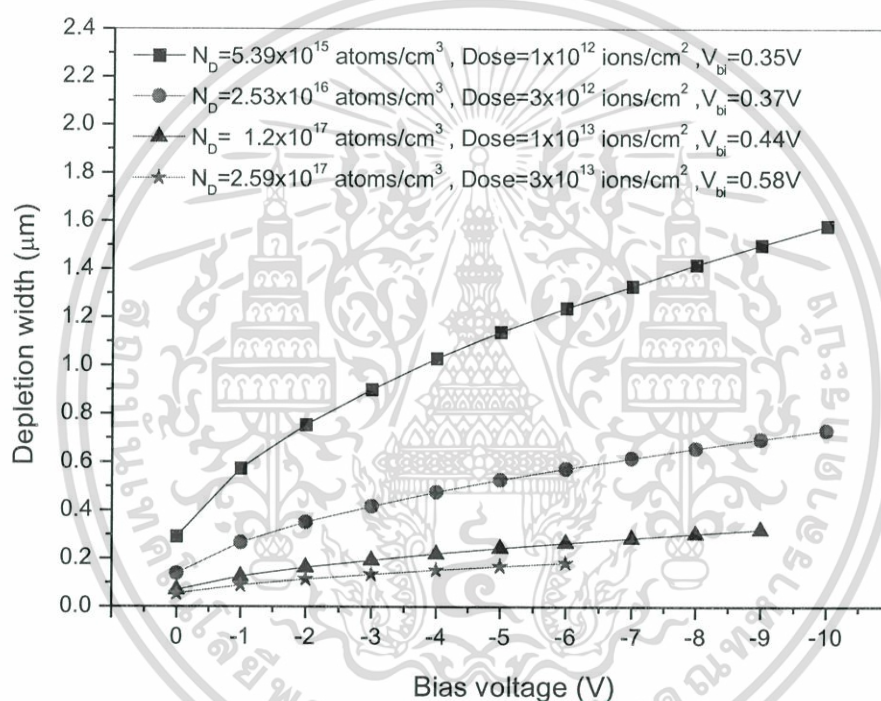
รูปที่ 4.32 กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ n-well ค่า $1.2 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$



รูปที่ 4.33 กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ n-well ค่า $2.59 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$

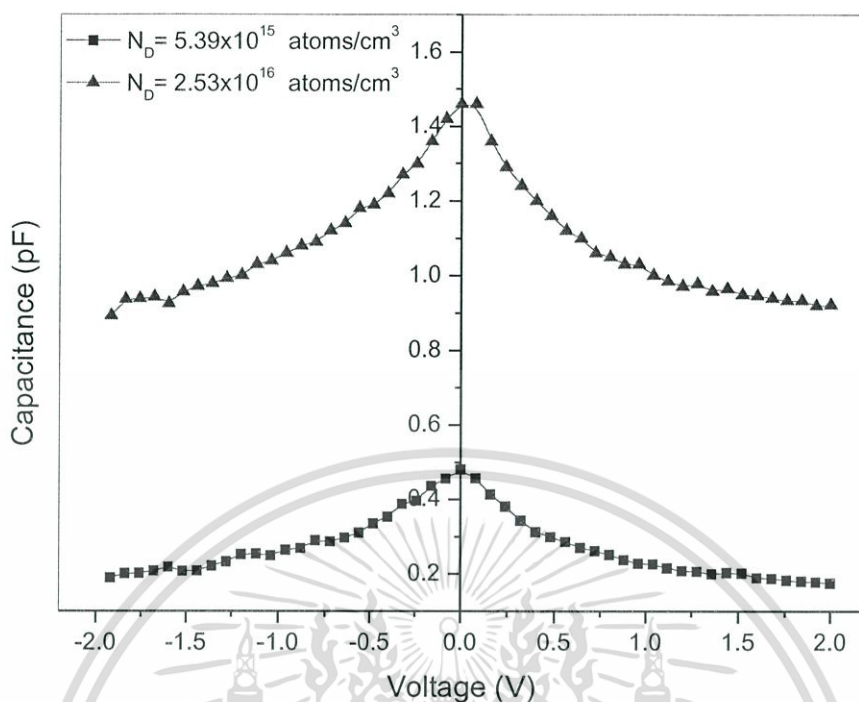
จากการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันพบว่าเงื่อนไข n-well ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ 5.39×10^{15} , 2.53×10^{16} atoms/cm^3 ดังรูปที่ 4.30 ถึง 4.33 กระแสมีค่ามีความแตกต่างกับกระแสแสงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนความหนาแน่นอะตอมสารเจือ 1.2×10^{17} และ $2.59 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ ผลของกระแสมืดและกระแสแสงแทบไม่แตกต่างกัน พิจารณาได้จากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นอะตอมสารเจือจางรูปที่ 4.34 พบว่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือจางมากที่สุดมีผลให้บริเวณปลอดพาหะมีขนาดแคบลง ดังนั้นบริเวณที่ทำให้เกิดแสงก็มีค่าน้อยลง กระแสแสงที่ได้จึงมีค่าน้อยลงด้วย ส่วนความหนาแน่นอะตอมสารเจือจางน้อยมีผลให้บริเวณปลอดพาหะมีค่ากว้างขึ้น ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือจางน้อยสุด จะมีความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมากที่สุด ทำให้กระแสที่เกิดจากแสงเนื่องจากคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในบริเวณปลอดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย กระแสแสงมีค่าน้อยเป็นผลมาจากโครงสร้างนี้มีระยะห่างระหว่างขั้ว $50\ \mu\text{m}$ มีผลให้กระแสแสงที่ได้มีค่าน้อยเนื่องจากระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง [32-33] อีกทั้งมีชั้นออกไซด์ปกคลุมอยู่บนบริเวณพื้นที่รับแสงด้วย



รูปที่ 4.34 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

สมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโพโตไดโอด MSM ที่มีขั้วอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 4.35 จากโครงสร้าง MSM เป็นโครงสร้างแบบสมมาตรดังนั้นเมื่อมีการให้ไบอัสตรงและไบอัสกลับจะมีลักษณะที่เหมือนกัน เงื่อนไขความจุไฟฟ้าที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือใน n-well ค่า 5.39×10^{15} และ 2.53×10^{16} atoms/cm³ พบว่าที่ความหนาแน่นสารเจือที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดย n-well ค่า 5.39×10^{15} , 2.53×10^{16} atoms/cm³ มีค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันไบอัส -2 V มีค่าเท่ากับ 0.9 และ 0.2 pF และเมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง



รูปที่ 4.35 ความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

จากการทดลองโฟโตไดโอด MSM ที่มีขั้วอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวสามารถสรุปได้ว่าที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือใน n-well ค่า 5.39×10^{15} และ 2.53×10^{16} atoms/cm³ สามารถสร้างเป็นอุปกรณ์โฟโตไดโอดแต่อาจต้องมีการปรับปรุงเงื่อนไขต่างๆ ที่ทำให้เกิดกระแสจากแสงได้มากขึ้นเช่น เพิ่มขั้วอิเล็กโทรดให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นจากขั้วที่ได้รับแรงดันไบอัสกลับ และทำการออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วแคบลง เป็นต้น

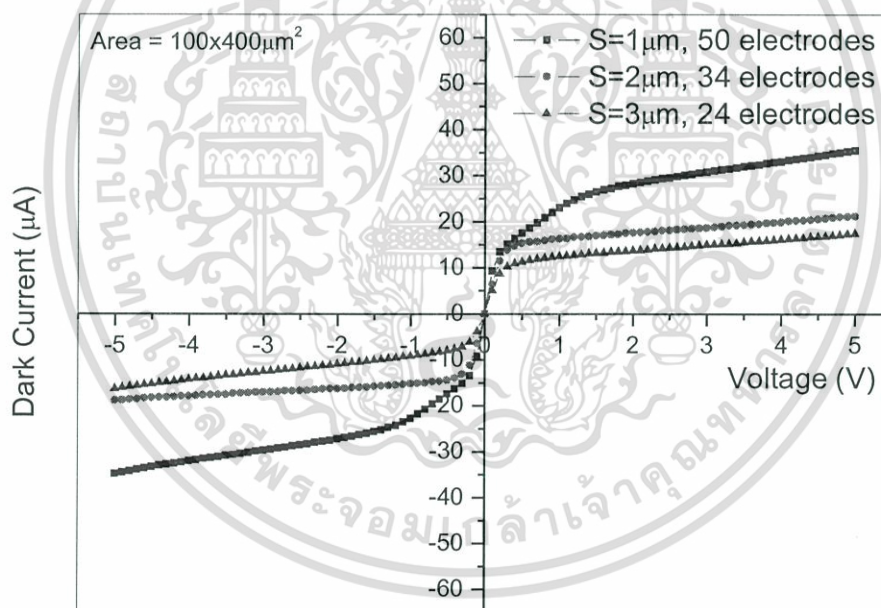
จากการทดลองในหัวข้อ 4.2 จึงพิจารณาได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับสร้างรอยสัมผัสแบบชนิดกึ่งที่ที่ดีที่สุดคือ n-well ที่มีปริมาณสารเจือ 1×10^{12} , 3×10^{12} ions/cm² อุณหภูมิซินเตอร์ริง 400°C แต่ทั้งนี้ในกระบวนการสร้างซิมอสจะใช้เงื่อนไขของใช้อุณหภูมิซินเตอร์ริงที่ 400°C และเงื่อนไขสารเจือในการสร้าง n-well ที่ 3×10^{12} ions/cm²

4.3 ผลการวัดคุณสมบัติของโฟโตไดโอด MSM ที่สร้างร่วมกับซีมอส

หลังจากสร้างโฟโตไดโอด MSM ที่มีโครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตัลร่วมกับกระบวนการสร้างวงจรรวมซีมอสแล้ว ทำการวัดผลคุณสมบัติกระแส-แรงดัน และความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอด

4.3.1 ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

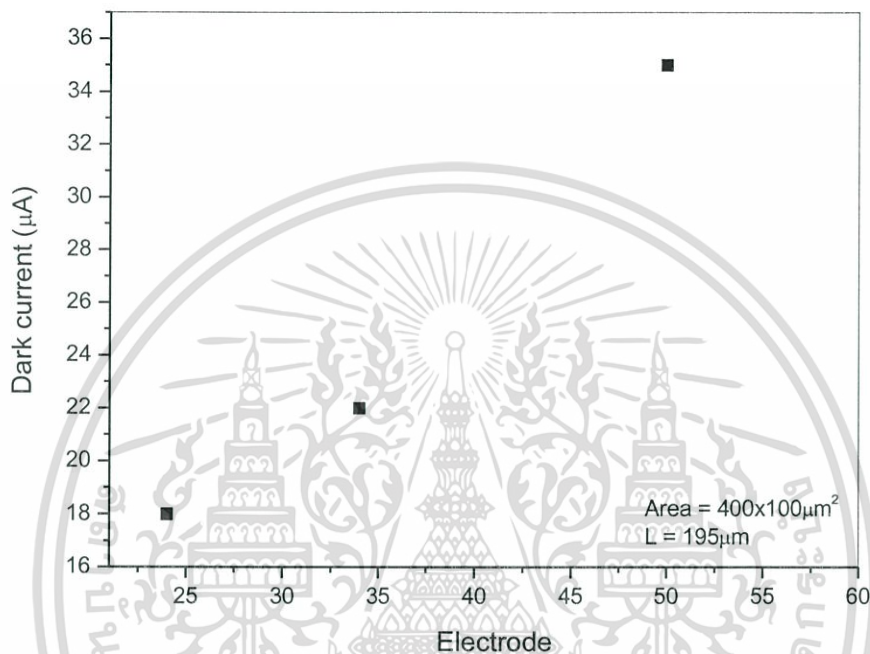
จากผลการทดลองรูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิตัลขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ที่แรงดันไบอัส 5 โวลต์ โฟโตไดโอด MSM ที่ระยะห่างขั้ว 1, 2 และ 3 ไมครอนมีกระแสมืด 35, 22, และ 18 μA ตามลำดับ



รูปที่ 4.36 ลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ 1, 2 และ 3 ไมครอนขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

โดยกระแสมืดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่าง 1 ไมครอนให้กระแสมืดสูงกว่าที่ระยะห่าง 2 และ 3 ไมครอน เนื่องจากแต่ละระยะห่างมีจำนวนขั้วอิเล็กโทรดต่างกันคือที่ระยะห่าง 1, 2 และ 3 ไมครอนมีจำนวนขั้วอิเล็กโทรด 50, 34 และ 24 ขั้วตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการที่กระแสมืดเพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดส่งผลทำให้เกิดพื้นที่รอยแยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมผัสช็อคก็เพิ่มขึ้น จากสมการที่ (2.6) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ว่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงผันกับขนาดพื้นที่รอยสัมผัสด้วย ดังนั้นพื้นที่สัมผัสจำนวนมากส่งผลให้กระแสรั่วไหลมากขึ้นตามไปด้วย พิจารณาจากการรวมค่ากระแสมืดที่จำนวนอิเล็กโทรด 34 และ 24 อัน พบว่าให้กระแสมืดสูงกว่าที่จำนวนขั้วอิเล็กโทรด 50 อัน รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสมืดกับจำนวนขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์กระแสมืดกับจำนวนขั้วอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอด MSM

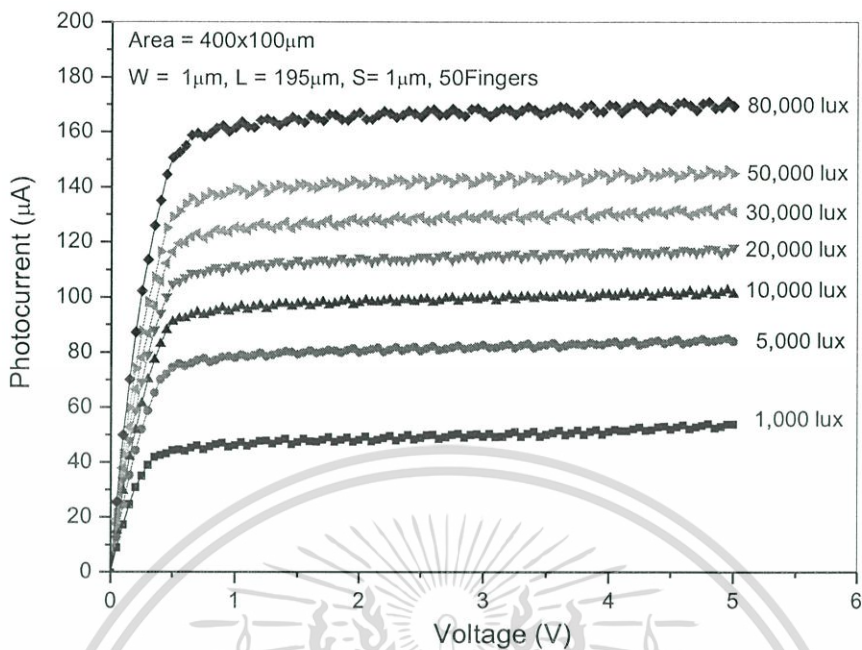
4.3.2 ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ

นำโฟโตไดโอด MSM ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันแบบกระแสตรง ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากหลอด Halogen ที่มีความเข้มต่างๆ ช่วง 1,000 Lux-80,000 Lux

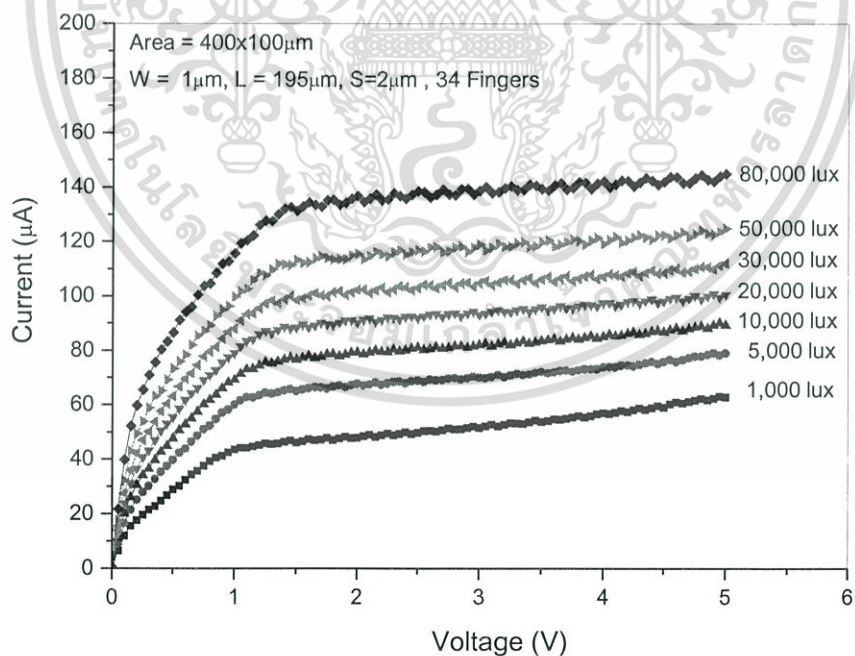
สำหรับกระแสแสงหาได้จากกระแสที่ได้จากการวัด (I_{Mea}) ลบด้วยกระแสมืด (I_{Dark}) ดังสมการที่ (4.7) จะได้กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ที่ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1-3 ไมครอน แสดงในรูปที่ 4.38 ถึง 4.40

$$I_P = I_{Mea} - I_{dark} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

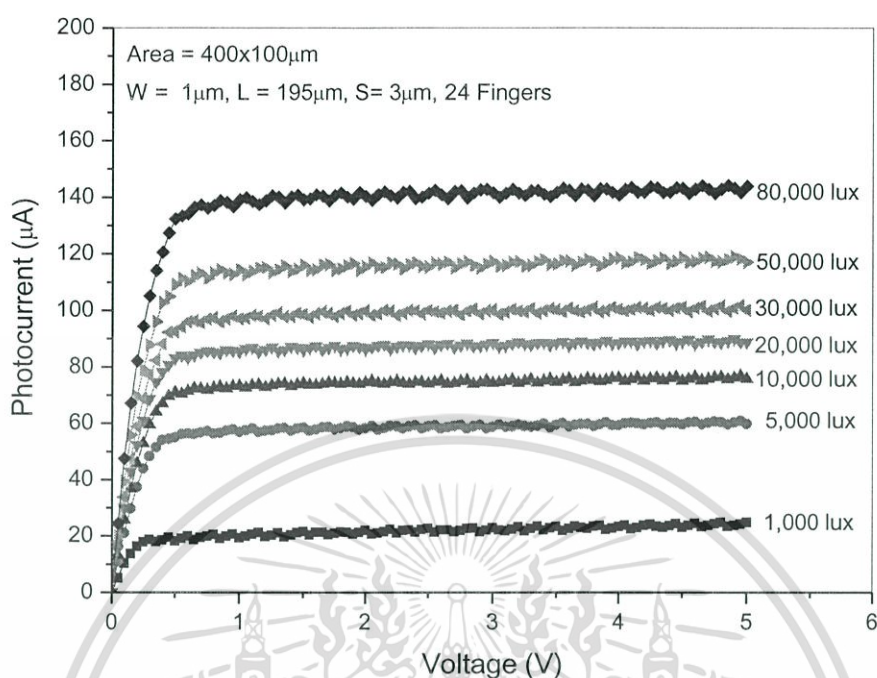


รูปที่ 4.38 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ $S=1$ ไมครอนที่ให้ความเข้มแสงค่าต่างๆ



รูปที่ 4.39 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ $S=2$ ไมครอนที่ให้ความเข้มแสงค่าต่างๆ

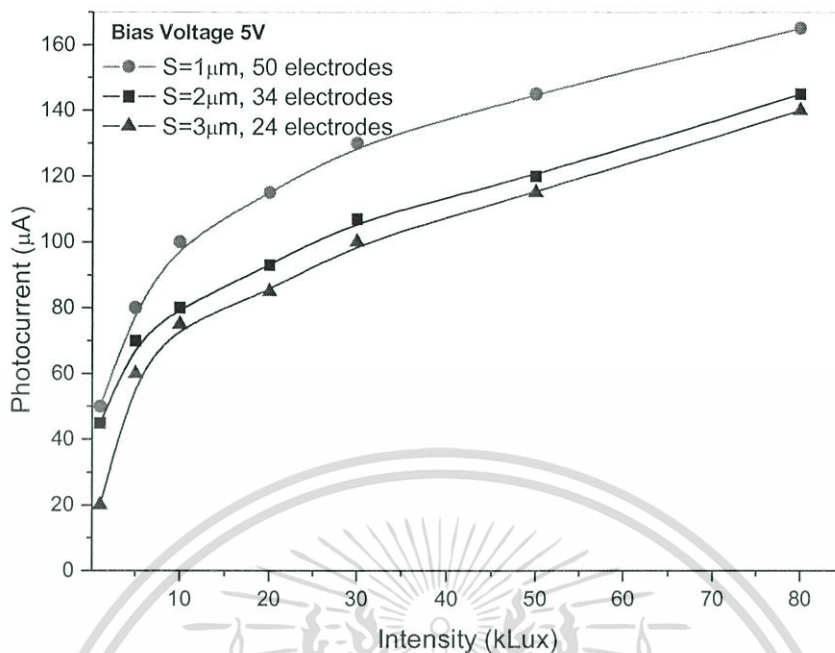
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



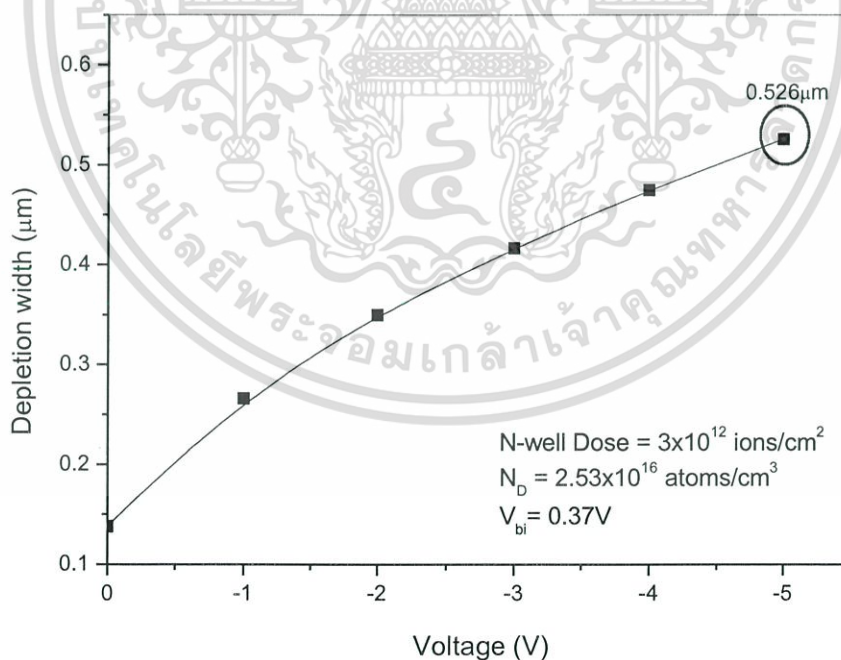
รูปที่ 4.40 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่ S=3 ไมครอนที่ให้ความเข้มแสงค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.38 ถึง 4.40 เป็นลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1, 2 และ 3 ไมครอนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่งความเข้มแสงตกกระทบที่ 1,000 Lux ให้กระแสแสงน้อยที่สุด เมื่อเพิ่มความเข้มแสงที่ตกกระทบลงบนอุปกรณ์ 5,000 Lux 10,000 Lux, 20,000 Lux, 30,000 Lux, 50,000 Lux และ 80,000 Lux ทำให้โฟโตไดโอดมีกระแสแสงเพิ่มขึ้น การที่กระแสแสงของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสง เป็นผลจากปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบลงบนโฟโตไดโอดมีมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณพาหะที่ทำให้เกิดกระแสมีสูงขึ้น กระแสแสงที่ได้จึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบดังรูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงของกระแสแสงพิจารณา 3 กรณีด้วยกันคือ กรณีแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดันไบอัส โดยสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัส ทำให้พาหะที่เกิดจากแสงคือคู่อิเล็กตรอน-โฮล เคลื่อนที่ไปยังขั้วก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกัน กรณีที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสความเข้มแสงที่ตกกระทบ โดยพาหะจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบส่งผลให้เกิดกระแสเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนของพาหะ กรณีที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่าง และจำนวนอิเล็กโทรด โครงสร้างที่มีจำนวนอิเล็กโทรดมากส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ของกระแสแสงกับความเข้มแสงของโฟโตไดโอด MSM



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสและความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ปริมาณสารเจือ 3×10^{12} ions/cm² (2.53×10^{16} atoms/cm³) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.10) และพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างขึ้น โดยบริเวณปลอดพาหะของโฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตที่มีค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเท่ากับ $0.526 \mu\text{m}$ ที่แรงดันไบอัสกลับ 5V สาเหตุที่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแคบเนื่องจากความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่ามาก จึงทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวได้น้อย พิจารณากระแสแสงที่ระยะ 2 และ 3 ไมครอนพบว่า มีค่ากระแสแสงที่ใกล้เคียงกัน การเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดอาจทำให้เพิ่มพื้นที่รับแสงแต่เนื่องจากพื้นที่ที่เพิ่มเป็นส่วนที่ไม่ทำให้เกิดกระแสแสง โดยกระแสแสงส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณปลอดพาหะ

จากรูปที่ 4.42 เป็นความสัมพันธ์ของบริเวณปลอดประจุพาหะกับแรงดันไบอัส แรงดันไบอัสมากขึ้น ส่งผลให้บริเวณปลอดพาหะกว้างขึ้น จากการคำนวณบริเวณปลอดพาหะพบว่าต้องใช้แรงดันไบอัสถึง 20 V จึงจะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้าง 1 ไมครอน ดังนั้นโฟโตไดโอด MSM ที่ระยะห่างขั้ว 1 ไมครอน บริเวณปลอดพาหะจึงไม่สามารถขยายกว้างคลุมพื้นที่รับแสงได้ หากบริเวณปลอดพาหะสามารถคลุมพื้นที่รับแสงทั้งหมด จะทำให้กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ สามารถเคลื่อนที่เข้าหาขั้วได้อย่างรวดเร็วด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดยโฮลจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทดและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด พาหะที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลทำให้เกิดเป็นกระแสแสงเกิดขึ้น [34-37]

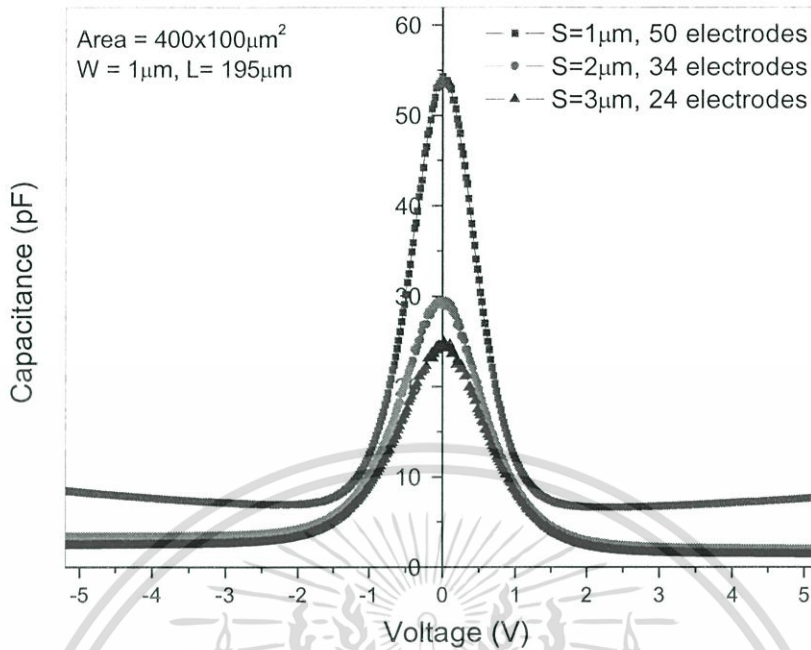
จากค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือ 2.53×10^{16} atoms/cm³ (3×10^{12} ions/cm²) ทำให้บริเวณปลอดพาหะแคบ ถึงแม้ว่าจะทำการออกแบบให้ระยะห่างขั้วมีค่าน้อยแล้วก็ตาม ดังนั้นหากต้องการเพิ่มบริเวณปลอดพาหะให้กว้างก็จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือเป็นหลักด้วย

4.3.3 ผลการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอด MSM พิจารณาได้ว่าประกอบไปด้วยความจุไฟฟ้า 2 ส่วนคือความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสแอโนดและแคโทด จากที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2.7 โดยความจุไฟฟ้ามีลักษณะสมมาตรกันเนื่องจากเป็นรอยสัมผัสชนิดขั้วที่ต่อแบบหันหลังชนกัน ความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไบอัสทำให้บริเวณเขตปลอดพาหะกว้างมากขึ้นดังสมการที่ (4.7)

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s A}{W} \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 ความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด MSM ที่ระยะห่าง 1, 2 และ 3 ไมครอน

จากผลการวัดความจุไฟฟ้าดังรูปที่ 4.43 พบว่าความจุไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1 ถึง 3 ไมครอน ค่าความจุไฟฟ้าจะลดลงอย่างต่อเนื่องและเปลี่ยนแปลงแบบผกผันกับแรงดันไบอัส อีกทั้งค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่สัมผัสมากขึ้นด้วย โดยจำนวนอิเล็กโทรดที่ระยะห่าง 1 ไมครอนมีจำนวนขั้วอิเล็กโทรดมากที่สุดทำให้ความจุไฟฟ้ามีมากกว่าที่ระยะห่างขั้ว 2 และ 3 ไมครอน ผลการวัดพบว่าความจุไฟฟ้าขณะให้แรงดันไบอัส 5 โวลต์ ที่ระยะห่างขั้ว 1, 2 และ 3 ไมครอนมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 9, 4 และ 3 พิโคฟารัด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างโฟโตไดโอด MSM ร่วมกับกระบวนการสร้างซิมอส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างโลหะที่ใช้ในกระบวนการซิมอส กับสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ พบว่ารอยสัมผัสของ AlCuSi/n-well เหมาะสำหรับการสร้างเป็นโฟโตไดโอด เนื่องจากให้คุณสมบัติรอยสัมผัสแบบช็อคกี และมีความเหมาะสมในการสร้างบวมจรวมซิมอส
2. อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500°C ทำให้รอยสัมผัส AlCuSi/n-well มีคุณสมบัติแบบโอห์มมิก เนื่องจากเกิดการแพร่ของโลหะอลูมิเนียมไปยังซิลิกอน (Aluminium Spiking) ทำให้เกิดการลัดวงจรเกิดขึ้นกระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัสมีค่าสูง
3. เจือไนโตรเจนปริมาณสารเจือจากการยิงฟองประจุ (Dose) ที่เจือไนโตรเจน 1×10^{12} และ 3×10^{12} ions/cm² ซินเตอร์ริง 400°C 15 นาที เหมาะสำหรับการสร้างเป็น n-well ที่ให้เจือไนโตรเจนรอยสัมผัสแบบช็อคกี
4. การสร้างโฟโตไดโอด MSM ร่วมกับการสร้างซิมอส บนพื้นที่ n-well ที่เท่ากัน พบว่าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว (S) เท่ากับ 1 ไมครอน จะมีกระแสมีด และกระแสแสงสูงสุด เนื่องจาก
 - จำนวนขั้วโลหะที่มากขึ้นส่งผลให้กระแสมีดเพิ่มขึ้น
 - จำนวนขั้วโลหะที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้น การเกิดกระแสแสงจึงเพิ่มขึ้นด้วย
5. บริเวณปลอดพาหะของโฟโตไดโอด MSM ที่สร้างบวมจรวมซิมอสมีค่า 0.526 μm ที่แรงดันไบอัสกลับ 5V โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอะตอมสารเจือ กรณีความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่าเพิ่มขึ้นบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าแคบลงด้วย
6. การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโฟโตไดโอด MSM ที่สร้างบวมจรวมซิมอสสามารถทำได้โดย
 - ลดค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่ n-well ของโฟโตไดโอด MSM ให้มีค่าน้อยลง เพื่อเพิ่มบริเวณปลอดพาหะ เช่นที่ Dose ของ n-well เท่ากับ 1×10^{12}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ions/cm² จะทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างถึง 1 ไมครอนที่แรงดันไบอัสกลับ 5V

- ออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) มีค่าน้อยกว่า 1 ไมครอน เพื่อให้บริเวณปลอดพาหะสามารถคลุมถึงพื้นที่รับแสงได้ทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] คูสิต เครื่องงาม., สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน, เล่ม 1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2542.
- [2] Lyer J., "Photodetectors demystified", IEEE Potentials, Dec. 1993. pp.5-10.
- [3] Varian. Ion Implantation Process Handbook, Rev.5., Varian ion implant systems, Gloucester, 1996.
- [4] Rhoderick E.H. and Williams R.H., Metal-Semiconductor Contacts, 2nd Ed, Oxford University Press, New York, 1998.
- [5] สมเกียรติ ศุภเดช., เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545.
- [6] Zeghbroeck V. "Metal-Semicond. Junctions." [Online]. Available : http://ecee.colorado.edu/~bart/book/chapter3/ch3_2.htm. 2007.
- [7] Singh J. "METAL-SEMICONDUCTOR JUNCTIONS." [Online]. Available : <http://www.eecs.umich.edu/~singh/bk7ch07.pdf>. 1994.
- [8] Berger P. R., "MSM Photodiodes", IEEE Potentials. Vol. 15, No.2, April/May 1996. pp.25-29.
- [9] สมเกียรติ ศุภเดช., เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.
- [10] Rüdgers F., Kim J., Hacke M., Mesters S., Buchal Ch., Mantl S., "Vertical MSM photodiodes in silicon based on epitaxial Si/CoSi₂/Si" Thin Solid Films, vol. 294, issue 1-2, pp. 351-353.
- [11] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ., "ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมา" วิทยานิพนธ์คุชฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [12] นพพล พงษ์พันธ์จันทร์. "การศึกษากระบวนการเจือสารด้วยเทคนิคการยิงฝิ่งประจุ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2547.
- [13] Michale Quirk, Julian Serda. Semiconductor Manufacturign Technology. New Jersey :Prentice-Hall. 2001

[14] STANLEY WOLF PH.D. 1990. SILICON PROCESSING FOR THE VLSI ERA. การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Volume. 2 California : Lattice Press.

- [15] JOHN P. UYEMURA. 1988. FUNDAMENTALS OF MOS DIGITAL INTEGRATED CIRCUITS. United States of America : Addison-Wesley Publishing Company.
- [16] Sami Franssila. Introduction to Micro fabrication. The Atrium. Southern Gate, Chichester, West Sussex. England. John Wiley & Sons Ltd. 2004.
- [17] ผศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ. แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [18] <http://parts.jpl.nasa.gov/mmic/3-II.PDF>
- [19] Ohta R.L., Viana C.E., Morimoto N.I., Borges B.V., "Fabrication of Ti-Si-Ti Metal-Semiconductor-metal Photodetectors Using Low Temperature Rapid Thermal Annealing.", Journal Integrated Circuits and Systems. Vol. 2, 2007. pp.85-88.
- [20] สราวุธ วิสวแสงสุข, สมชาติ พนาเกษม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, โยอิชิ ยาซุมุระ และ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง., "การศึกษาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสแบบขอตติ์ที่ผ่านการซินเตอร์ริง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 23, พฤศจิกายน 2543, หน้า 721-724.
- [21] ธเนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สราวุธ วิสวแสงสุข., "ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด $Al/n-Si/Al$ แบบพลาสมา", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน 2547, หน้า 14-19.
- [22] สิทธิชัย โกโคยอุดม., อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับวงจรรวมยุคใหม่, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, กรุงเทพฯ, 2551.
- [23] Schroder D.K., SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE CHARACTERIZATION, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2006.
- [24] Sze S.M., Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed., Wiley & Sons, Inc., New York, 1981.
- [25] Padovani F.A., Stratton R., "Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers.", Solid-State Electron. Vol.9, July 1966. pp. 695-707.
- [26] Crowell C.R., Rideout V.L., "Normalized Thermionic-Field (TF) Emission in Metal-Semiconductor (Schottky) Barriers.", Solid-State Electron. Vol.12, Feb. 1969. pp. 89-105.
- [27] John P. McKelvey. SOLID STATE AND SEMICONDUCTOR PHYSICS. FLORIDA. Robert E. KRIEGER PUBLISHING COMPANY. 1982.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] ชเนศ โชะเหม. “ออกแบบและสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมาอาร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [29] GEROLD W. NEUDECK. The PN Junction Diode. Second edition. ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY.1989.
- [30] JS Yuan, Juin J Liou. Semiconductor Device Physics and Simulation. New York. Division of Plenum Publishing Corporation. 1998.
- [31] Donald A. Neamen. Semiconductor physics and devices. Third edition. New York. McGraw-Hill.2003.
- [32] มานิตา ค้วงแสง. “การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิเจิต.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [33] ชเนศ โชะเหม, มานิตา ค้วงแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมาอาร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2548, หน้า 13-18.
- [34] รัตนาวรรณ สันบุญตัน. 2551. “การศึกษาการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิด โลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ เหนือบริเวณบ่อเอ็น.” หน้า 165-173. ใน การประชุม วิชาการแม่ฟ้าหลวง ครั้งที่ 10. เชียงราย : มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
- [35] Rattanawan Sanboontan. 2009. “DC Sputtering Titanium Nitride Anti Reflect Coating for Patterning of Interdigitated MSM PDs.” 263. in Smartmat-'08 & IWOFM-2. Chiang Mai : Faculty of Science, Chiang Mai University.
- [36] WORATHEP NOIPREECHA. “Design and Fabrication of Short Electrode Gap Structure of Al/n-Si/Al Photodiode”. MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING. 2009.
- [37] ศัญญา คุณขาว. “Photocurrent on Space-Charge-Region in planar Metal-Semiconductor-Metal Structures with Full depleted region”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30). ตุลาคม 2550. หน้า 94-97

ภาคผนวก ก

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ก.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ค่าคงที่ของพลังค์	h	6.626×10^{-34}	J-sec
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	c	3×10^8	m/sec
ค่าคงที่รีชาร์ดสัน	R	110	$\text{Acm}^{-3}\text{K}^{-2}$
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.602×10^{-19}	C
ค่าคงที่โบสตันน์	k	1.38×10^{-23}	J/K
เปอร์มิติวิตีในสุญญากาศ	ϵ_0	8.854×10^{-14}	F/cm
เปอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ (Si)	ϵ_s	$11.8 \epsilon_0$	F/cm
สภาพคล่องของอิเล็กตรอน (Si)	μ_n	1350	$\text{cm}^2/\text{V-sec}$
ความหนาแน่นอินทรินซิก (Si)	n_i	1.5×10^{10}	cm^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นางสาวรัตนาวรรณ สันบุญตัน
- วัน เดือน ปีเกิด 14 กุมภาพันธ์ 2525
- ที่อยู่ 67/1 หมู่ 10 ตำบลปงแสนทอง อำเภอเมือง
จังหวัดลำปาง 52100
- ประวัติการศึกษา พ.ศ.2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) กระบวนการผลิตวงจรรวม, เซนเซอร์
2.) กระบวนการถ่ายย่อแบบลายวงจร (Photolithography)
- ประสบการณ์ทำงาน ผู้ช่วยนักวิจัย 2 ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
- ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิตยสารนี้
- [1] Rattanawan Sanboontan. 2009. “DC Sputtering Titanium Nitride Anti Reflect Coating for Patterning of Interdigitated MSM PDs.” 263. in *Smartmat-’08 & IWOFM-2*. Chiang Mai : Faculty of Science, Chiang Mai University.
- [2] รัตนาวรรณ สันบุญตัน. 2551. “การศึกษาการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิด โลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ เหนือบริเวณบ่อเอ็น.” หน้า 165-173. ใน การประชุมวิชาการแม่ฟ้าหลวง ครั้งที่ 10. เชียงราย : มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง