

การศึกษาผลของฟลोटติงฟิลด์ริงต่อค่าแรงดันพังทลายของไดโอดกำลัง

THE STUDY OF FLOATING FIELD RING EFFECT TO
POWER DIODES BREAKDOWN VOLTAGE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ําโรงเรียนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2008-EN-M-043-007

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลของโพลตึงฟิวลิ่งต่อค่าแรงดันพังทลายของไดโอดกำลัง

**THE STUDY OF FLOATING FIELD RING EFFECT TO
POWER DIODES BREAKDOWN VOLTAGE**



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**95063**
วัน,เดือน,ปี.....**2.0.พ.ค. 2552**

1207467x

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-043-007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE STUDY OF FLOATING FIELD RING EFFECT TO
POWER DIODES BREAKDOWN VOLTAGE**

MONTREE SAENLAMOO

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

2009

KMITL-2009-EN-M-043-007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลของฟลอตติงฟิลด์ริงต่อค่าแรงดันพังทลายสำหรับไดโอดกำลัง
Thesis Title The Study of Floating Field Ring Effect to Power Diodes Breakdown Voltage
นักศึกษานายมนตรี แสนละมุล
รหัสประจำตัว 49061354
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-043-007

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	สุภเดช	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิโย	
รศ.ดร.วิสุทธิ	จูติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของโพลติ่งพีวล์ริงต่อค่าแรงดันพังทลายของไดโอดกำลัง
นักศึกษา	นายมนตรี แสนละมูล
รหัสนักศึกษา	49061354
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการสร้างไดโอดกำลังชนิดรอยต่อ P⁺-N-N⁺ โครงสร้างในแนวตั้ง เพื่อศึกษาผลของโพลติ่งพีวล์ริง (FFR) ต่อค่าแรงดันพังทลายของไดโอด ทำการสร้างโดยใช้เทคโนโลยีการสร้างซิมอส (CMOS) ณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ลักษณะเด่นของวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้คือ สร้างไดโอดกำลังในผลึกสารกึ่งตัวชนิดซิลิคอน โครงสร้าง P⁺-N-N⁺ และสร้าง FFR ต่อมรอบรอยต่อหลัก เพื่อเพิ่มแรงดันพังทลายของไดโอด โดยออกแบบให้ FFR มีจำนวน 2, 4, 6 และ 8 อัน ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR มีค่า 5, 10 และ 15 μm การเพิ่มจำนวนโลหะบน FFR โดยมีจำนวน 2, 4 และ 6 อัน และรูปทรงการสร้างไดโอด โดยทำการสร้างทรงกลมและสี่เหลี่ยม โดยทำการสร้างไดโอดในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น สภาพต้านทาน $120 \Omega\cdot\text{cm}$ ระนาบ (111) ขนาดแผ่นเท่ากับ 150 mm มีความหนาแผ่นเท่ากับ 625 μm จากการทดลองพบว่าเมื่อจำนวนของ FFR มากขึ้นทำให้แรงดันพังทลายมากขึ้น การเพิ่มจำนวนโลหะบน FFR ทำให้กระแสรั่วลดลง การสร้างทรงกลมทำให้แรงดันพังทลายมากกว่าทรงสี่เหลี่ยม และสามารถสร้างไดโอดที่มีแรงดันพังทลาย 956 V ที่กระแสรั่ว 20 nA โดยมีโครงสร้างไดโอดแบบทรงกลมขนาดพื้นที่แอคทีฟ 3.143 mm^2 โดยที่ FFR มีขนาดเท่ากับ 10 μm จำนวน FFR เท่ากับ 8 อัน และระยะห่างเท่ากับ 15 μm ที่ความลึกในการเจือสาร 4 μm มีค่าศักย์ภายใน (V_{bi}) เท่ากับ 0.6 V ซึ่งการสร้างนี้ได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ ดังนั้นการสร้างไดโอดสามารถควบคุมการพังทลายของไดโอดจากการสร้าง FFR ได้ และเนื่องจากเทคโนโลยีที่สร้างทำให้สามารถนำเอาไดโอดมาสร้างเป็นวงจรรวมได้ โดยง่ายในอนาคตต่อไป

Thesis Title	The Study of Floating Field Ring Effect to Power Diodes Breakdown Voltage.
Student	Mr. Montree Saenlamool
Student ID.	49061354
Degree	Master of Engineering
Program	MicroElectronics Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis presents the fabrication of vertical structure P⁺-N-N⁺ power diodes. The diode was fabricated on Silicon by using CMOS technology developed at Thai Microelectronic Center (TMEC). The distinguish feature of the proposed method is to fabricate the device on silicon. Furthermore the floating field ring (FFR) structure was incorporated in order to increased breakdown voltage during reverse bias. The parameters of interest are the number of FFR designed to be 2, 4, 6 and 8, the spacing between the main junction and FFR designed to be 5, 10 and 15 μm , and the number of metal on FFR designed to be 2, 4 and 6. The circular and square shapes of active devices were fabricated. These parameters were used to analyze the leakage current and breakdown voltage of diodes. The diode device was fabricated on N-type (111) silicon wafer 150 mm dimension, 625 μm thickness and resistivity 120 $\Omega\cdot\text{cm}$. The experiments showed that the effect of the number of FFR toward breakdown voltage. The Breakdown Voltage is increased by increasing number of FFR. Moreover, increasing the number of metal on FFR reduced the leakage current. The circular shape diodes had higher breakdown voltage than the square shape ones. As a result, we could make circular shapes 3.143 mm^2 of active devices, breakdown voltage of 956 V, leakage current of 20 nA, with 10 μm of FFR width, and the number of FFR to be 8 and spacing of 15 μm . At junction depth of 4 μm , the device has a build in voltage of 0.6 V. For these experiments and designs, the devices achieved the targeted specification, and hence, FFR design can be used to control the breakdown voltage. The fabrication technology of power diode can be integrated with integrated circuit in the future.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง ในการวางแผนแนวทางการดำเนินงานวิจัยและช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้ในทุกๆ ด้าน เป็นผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ ทั้งยังคอยให้กำลังใจและแนวทางการดำเนินชีวิต ในช่วงเวลาที่อยู่ในรั้วสถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังแห่งนี้ ซึ่งขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ. ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการ การสอบวิทยานิพนธ์ ในการชี้แนะจุดบกพร่องและให้คำแนะนำจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. อัมพร โพธิ์ไข ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์และนายชาญเดช หุรอนันต์ หัวหน้างานวิจัยและพัฒนาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ในการให้คำปรึกษาและคำแนะนำเครื่องมือและกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนเครื่องจักรในกระบวนการผลิตและเครื่องมือวัดในการวิเคราะห์ชิ้นงาน รวมทั้งพนักงานทุกท่านที่ช่วยในการสร้างงานวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

มนตรี แสนละมุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	4
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1 การแพร่สารเจือ (Diffusion).....	6
2.1.1 การยิงฝังประจุ (Ion Implantation).....	8
2.2 รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction).....	12
2.2.1 กระแสรอยต่อพี-เอ็น ในอุดมคติ (Ideal P-N Junction Current).....	18
2.2.2 กระแสการเกิด-การรวมตัวใหม่ (Generation-Recombination Current).....	20
2.2.3 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะกระแสสูง (High Current Injection in P-N Junction).....	23
2.3 การพังทลายของรอยต่อ.....	26
2.3.1 การพังทลายของรอยต่อแบบอะวาลันซ์ (Avalanche Breakdown).....	26
2.4 ส่วนต่างๆ ที่ทำให้เกิดการพังทลาย (Edge Terminations).....	31
2.4.1 ส่วนรอยต่อในแนวระนาบ (Planar Junction Terminations).....	32
2.4.2 รอยต่อทรงกระบอก (Cylindrical Junction).....	33
2.4.3 รอยต่อทรงกลม (Spherical Junction).....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 โพลทติ้งฟิวลิ่ง (Floating Field Ring: FFR).....	40
2.5.1 โพลทติ้งฟิวลิ่ง (FFR) จำนวนหลายๆ อัน (Multiple Floating Field Ring Termination)	47
2.5.2 ฟิวลิ่งเพลต (Field Plates).....	49
บทที่ 3 กระบวนการสร้างไดโอด.....	52
3.1 การสร้างมาสก์ (Mask Fabrication).....	52
3.1.1 การออกแบบโครงสร้างเพื่อสร้างมาสก์โดยโปรแกรม L-edit (Layout design by L-edit Program Design).....	52
3.1.2 ขั้นตอนการสร้างมาสก์ (Mask Fabrication).....	55
3.2 การสร้างไดโอดกำลัง (Diode Fabrication).....	56
3.2.1 ขั้นตอนการสร้างไดโอดกำลัง (Diode Fabrication Steps).....	56
3.3 การเจือสารในกระบวนการสร้างไดโอดกำลัง.....	61
3.3.1 ความต้านทานเชิงแผ่นและความลึกในการเจือสาร.....	61
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	65
4.1 การนำกระแสและความจุไฟฟ้าของไดโอด.....	65
4.1.1 การนำกระแสของไดโอดเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward Bias).....	65
4.1.2 ค่าความจุไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้า.....	67
4.2 จำนวนโพลทติ้งฟิวลิ่ง (FFR).....	68
4.2.1 การทดลองจำนวน FFR ต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย.....	69
4.2.2 ผลการทดลองจำนวน FFR ต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย.....	71
4.3 การเพิ่มโลหะบน FFR.....	75
4.3.1 การทดลองเพิ่มขึ้นโลหะบน FFR.....	75
4.3.2 ผลการทดลองเพิ่มขึ้นโลหะบน FFR.....	76
4.4 ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR.....	80
4.4.1 การทดลองหาระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR ต่อค่าแรงดันพังทลาย.....	81
4.4.2 ผลการทดลองหาระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 รูปทรงการสร้าง.....	83
4.5.1 การทดลองเปรียบเทียบรูปทรงสี่เหลี่ยมกับทรงกลมต่อค่าแรงดันพังทลาย.....	83
4.5.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบรูปทรงสี่เหลี่ยมกับทรงกลมต่อค่าแรงดันพังทลาย.....	84
4.6 การสร้างไดโอดทรงกลมที่มี FFR 8 อัน ที่ระยะห่าง 12, 15 และ 18 μm	84
4.6.1 การทดลองเปรียบเทียบระยะห่างของ FFR ที่ 12, 15 และ 18 μm บนไดโอด ทรงกลมและมี FFR 8 อัน.....	85
4.6.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบระยะห่างของ FFR ที่ 12, 15 และ 18 μm บน ไดโอดทรงกลมและมี FFR 8 อัน.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	93
ภาคผนวก ข. เครื่องจักรและเครื่องมือวัดในการสร้างไดโอด.....	95
ภาคผนวก ค. การวัดค่าคุณสมบัติของไดโอด.....	104
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการวัดค่า R_s โดยนำข้อมูลมาทำการสรุปจากข้อมูลทั้งหมด 49 ค่า บนระนาบ <111> และ <100>.....	61
4.1 ค่ากระแสรั่วและจำนวน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40 V.....	71
4.2 ค่าแรงดันพังทลายและจำนวน FFR เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	73
4.3 ค่ากระแสรั่วและจำนวนโลหะบน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40 โวลต์.....	77
4.4 ค่าแรงดันพังทลายและจำนวนโลหะบน FFR เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	79



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) การเกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระในการเจือสารฟอสฟอรัสในผลึกซิลิกอน (ข) การเกิดโฮลในการเจือสาร โบรอนในผลึกซิลิกอน.....	6
2.2 เปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของปริมาณสารเจือในกระบวนการแพร่ (Diffusion) และการยิงฝังประจุไอออน (Ion Implantation) โดยในที่นี้ C คือความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ และ X คือความลึกจากผิวหน้าผลึกซิลิกอน.....	7
2.3 องค์ประกอบหลักของ Medium Current Ion Implanter	9
2.4 (ก) โครงสร้างอย่างง่ายของรอยต่อพี-เอ็น (ข) สัญลักษณ์ของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น.....	13
2.5 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล โดยที่อิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้.....	13
2.6 ไดอะแกรมแสดงแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นเมื่อได้รับไบอัสตรง.....	14
2.7 รอยต่อพี-เอ็น เมื่อได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้าหรือแรงดันไบอัสตรง แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำโดย V_d และสนามไฟฟ้าประจุค้าง.....	17
2.8 ไดอะแกรมแสดงแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นเมื่อได้รับไบอัสตรง.....	17
2.9 ไดอะแกรมของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้การไบอัสย้อนกลับ.....	18
2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	19
2.11 ภาพจำลองตำแหน่งการเกิดของกระแสบริเวณรอยต่อและบริเวณปลดพาหะ.....	22
2.12 ความหนาแน่นของพาหะส่วนมากและพาหะส่วนน้อยที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ $p^+ - n$ ในกรณี (ก) การฉีดระดับต่ำ (ข) การฉีดระดับสูงๆ หรือ Kirk Effect.....	24
2.13 (ก) ตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับรอยต่อของไดโอดในกรณีกระแสสูงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม IR_S (ข) ผลของการฉีดระดับสูงในกราฟ $I - V$ และ (ค) กราฟ $\Delta V - I$ ซึ่งแสดงค่าความต้านทานอนุกรม R_S	25
2.14 การเกิดกระแสอิมิต์ย้อนกลับจากพาหะส่วนน้อย เมื่อ $-V_A \ll V_B$	27
2.15 รูปจำลองการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	27
2.16 รูปจำลองการเกิดไอออนในเซชันแบบต่อเนื่อง.....	28
2.17 ค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นแบบชั้นบันได $p^+ - n$ และ $n^+ - p$ ของเยอรมันเนียม (Ge) ซิลิกอน (Si) แกลเลียมอาเซนไนด์ (GaAs) และแกลเลียมฟอสเฟต (GaP) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือในด้านที่มีความหนาแน่นสารเจือต่ำ โดยการพังทลายแบบอะวาแลนซ์ ที่อุณหภูมิ $T=300K$	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 ลักษณะ โครงสร้างของไดโอด ซึ่งมีมุมหรือส่วนโค้ง ส่งผลให้เกิดผลของ Curvature Effect ทำให้แรงดันพังทลายมีค่าต่ำกว่าปกติ.....	31
2.19 แสดงความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสำหรับ (ก) รอยตื้น (Shallow Junction) (ข) รอยตื้นลึกจากการแพร่ในแนวระนาบ.....	32
2.20 ภาพตัดขวางของรอยต่อทรงกระบอก.....	33
2.21 การเปรียบเทียบการประมาณแบบไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic Approximation) และการกระจายตัวสนามไฟฟ้าที่แท้จริงสำหรับรอยต่อทรงกระบอก.....	35
2.22 ค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อทรงกลม (Spherical Junction) และรอยต่อทรงกระบอก (Cylindrical Junction).....	37
2.23 การเปรียบเทียบระหว่างการประมาณ (Approximation) และการเกิดขึ้นจริงอย่างถูกต้อง (Actual) ของการกระจายตัวสนามไฟฟ้าสำหรับรอยต่อทรงกลม.....	39
2.24 ภาพด้านบนของบริเวณการแพร่ที่ใช้ในการสร้างรอยต่อและโพลตึงพีวลิ่ง.....	41
2.25 ภาพตัดขวางของแต่ละส่วน โดยมีโพลตึงพีวลิ่งเพียงอันเดียว.....	41
2.26 ผลของตำแหน่งโพลตึงพีวลิ่งที่มีผลต่อค่าแรงดันพังทลาย.....	40
2.27 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันพังทลายของค่าที่เหมาะสมสำหรับโพลตึงพีวลิ่งหนึ่งอัน ออกแบบสำหรับรอยต่อทรงกระบอก.....	44
2.28 ระยะเวลาที่เหมาะสมของโพลตึงพีวลิ่งสำหรับการออกแบบโพลตึงพีวลิ่งหนึ่งอัน.....	45
2.29 การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของบริเวณปลอดภัยที่ขอบรอยต่อในแนวระนาบ โดยที่ (a) แสดงผลของประจุบวกที่ผิว (b) แสดงผลของประจุเป็นศูนย์ที่ผิว และ (c) แสดงผลของประจุลบที่ผิว.....	46
2.30 การเปลี่ยนแปลงการแผ่กว้างบริเวณปลอดภัยกับความกว้างของโพลตึงพีวลิ่ง โดยที่ (a) การกระจายตัวของบริเวณปลอดภัยเมื่อโพลตึงพีวลิ่งมีขนาดใหญ่ และ (b) เมื่อโพลตึงพีวลิ่งมีขนาดเล็ก.....	47
2.31 การออกแบบจำนวนโพลตึงพีวลิ่งจำนวนหลายอันและการค่อยๆ ลาดลดลงของความกว้างและระยะห่างโพลตึงพีวลิ่ง.....	48
2.32 ส่วนของพีวลิ่งที่มีระยะห่างและความกว้างแต่ละโพลตึงพีวลิ่งเท่ากัน.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.33 ผลของการป้อนแรงดันไบอัสที่พีวล์เพลตทำให้การกระจายตัวบริเวณปลดพาหะเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งรอยต่อในแนวระนาบ.....	49
2.34 รอยต่อในแนวระนาบโดยมีชั้นพีวล์เพลต.....	50
2.35 การออกแบบตำแหน่งการวางพีวล์เพลตกับโพลตึงพีวล์ริง.....	51
3.1 (ก) ชั้น Alignment mark โดยการออกแบบด้วยโปรแกรม L-edit (ข) ภาพถ่ายจากกล้องไมโครสโคป (Microscope) ซึ่งแบ่งเอาบางส่วนของการออกแบบเท่านั้น.....	53
3.2 การออกแบบด้วยโปรแกรม L-edit.....	54
3.3 ภาพกระจกมาสก์ทั้ง 5 ชั้น.....	55
3.4 ขั้นตอนการสร้างและวิเคราะห์มาสก์.....	56
3.5 ภาพจำลองการสร้างลวดลายชั้นที่ 1 ด้วยกระบวนการ Lithography.....	57
3.6 ภาพจำลองการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หลังการกัด Alignment mark.....	57
3.7 ภาพจำลองการยิงฟุ้งประจุฟอสฟอรัสด้านหลังแผ่นซิลิคอน.....	58
3.8 ภาพจำลองการยิงฟุ้งประจุโบรอนด้านหน้าแผ่นซิลิคอน.....	58
3.9 ภาพจำลองหลังการแอนนีสและสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	59
3.10 ภาพจำลองหลังการสร้างลวดลายชั้นที่ 3 และกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	59
3.11 ภาพจำลองหลังการสร้างโลหะและการสร้างลวดลายชั้นที่ 4.....	59
3.12 ภาพจำลองหลังการกัดโลหะและการสร้างชั้นกันความชื้น.....	60
3.13 ภาพจำลองหลังการสร้างไดโอดเสร็จสมบูรณ์พร้อมทั้งเส้นการตัดแบ่งอุปกรณ์.....	60
3.14 ชั้นไดโอดหลังการตัดแบ่งและไดโอดหลังการเคลือบอีพอกซีเรซินสีดำ.....	61
3.15 ภาพผลการวัดค่าความลึกโดยใช้เทคนิค SRP และค่าความเข้มข้นสารเจือจากการคำนวณด้วยโปรแกรมของเครื่องเอง.....	62
3.16 ภาพการวัดค่าความลึกโดยใช้เทคนิค FE-SEM	63
3.17 ภาพตัดขวางไดโอดโดยมีโพลตึงพีวล์ริงจำนวน 8 อัน	63
4.1 ผลการวัดค่ากระแสต่อแรงดันโดยป้อนค่าจาก -15 ถึง 2 โวลต์.....	65
4.2 การวัดค่ากระแสไดโอด เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงโดยเครื่อง KDK KOKUYO ELECTRIC CO., LTD รุ่น TCT-7D Transistor Curve Tracer.....	66
4.3 ผลการวัดค่าความหนาแน่นกระแสต่อแรงดันขณะได้รับไบอัสตรง.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลการวัดค่าความจุ (C) ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Vre) ของไดโอด.....	67
4.5 ผลการวัดส่วนกลับค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง ($1/C_j^2$) ต่อค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ -2 ถึง 2 V.....	68
4.6 ผลการคำนวณหาค่าบริเวณปลดพาหะ (Depletion region) ต่อแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Vre) ที่ 0 ถึง 15 V.....	68
4.7 ระบบการวัดกระแสต่อแรงดันประกอบไปด้วยเครื่องมือวัด High Voltage, กล้องบังแสง, คอมพิวเตอร์และโปรแกรมควบคุมการทำงานและเก็บข้อมูลการวัดค่า.....	69
4.8 ภาพจำลองตำแหน่งการวาง FFR และจำนวน FFR ที่สร้างขึ้น โดย ก) วาง FFR จำนวน 1 อัน ข) วาง FFR จำนวน 2 อัน ค) วาง FFR จำนวน 4 อัน ง) วาง FFR จำนวน 6 อัน จ) วาง FFR จำนวน 8 อัน ฉ) ไม่มี FFR และ (ข) ภาพจำลองด้านบนของการสร้างไดโอด.....	70
4.9 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) โดยป้อนค่า 0 ถึง 40 โวลต์ โดยมีจำนวน FFR เท่ากับ 1, 2, 4, 6 และ 8 อัน.....	71
4.10 กราฟผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อจำนวน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40 โวลต์.....	72
4.11 ภาพตัดขวางระยะห่างระหว่าง FFR หลังการ anneal ด้านบนคือ layout design และด้านล่างคือภาพถ่ายด้วย FE-SEM.....	72
4.12 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) ที่จำนวน FFR เท่ากับ 1, 2, 4, 6, 8 อัน และ ไม่มี FFR.....	73
4.13 กราฟค่าแรงดันพังทลาย (VB) ต่อจำนวน FFR ที่ 1, 2, 4, 6 และ 8 อัน.....	74
4.14 กราฟกระแสไปข้างหน้า (IF) ต่อแรงดันไบอัสตรง (VF) ที่จำนวน FFR เท่ากับ 0, 1, 2, 4, 6 และ 8 อัน ที่แรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.6 V.....	75
4.15 ตำแหน่งการวางโลหะบน FFR ซึ่งจำนวน FFR เท่ากับ 6 อัน โดยที่ (ก) ไม่มีโลหะ (ข) มีโลหะบน FFR 2 อัน (ค) มีโลหะบน FFR 4 อัน และ (ง) มีโลหะบน FFR 6 อัน.....	76
4.16 ภาพจำลองตำแหน่งการวางโลหะบนโพลติ่งพีวลิ่งและส่วนประกอบต่างๆ ในโครงสร้างไดโอด.....	76
4.17 ผลการวัดค่ากระแสรั่วที่แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า 0 ถึง 40 โวลต์ โดยมีจำนวนโลหะบน FFR เท่ากับ 2, 4, 6 และไม่มีโลหะบน FFR.....	77
4.18 กราฟแสดงผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อจำนวนโลหะบน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40 โวลต์.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) ที่จำนวนโลหะบน FFR เท่ากับ 2, 4, 6 อัน และ ไม่มี.....	78
4.20 กราฟผลการวัดค่าแรงดันพังทลาย (VB) ต่อจำนวนโลหะบน FFR.....	79
4.21 ตำแหน่งการเกิดกระแสรั่วต่างๆ และทิศทางการกระจายตัวของกระแสรั่วเมื่อมี (ก)ไม่มี FFR และ (ข) มีโลหะอยู่บน FFR [21].....	80
4.22 ภาพจำลองโครงสร้างและตำแหน่งการวาง FFR ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนระยะห่าง (Spacing) มีค่า 5, 10 และ 15 μm	81
4.23 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) ที่ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR มีค่าเท่ากับ 5, 10, 15 μm และ ไม่มี FFR	82
4.24 ผลการวัดค่าแรงดันพังทลาย (VB) ต่อค่าระยะห่างระหว่าง FFR กับรอยต่อหลักที่ได้ ออกแบบไว้โดยมีระยะห่างเท่ากับ 5, 10 และ 15 μm	82
4.25 ภาพจำลองการทดลอง (ก) ภาพจำลองตัดขวางไดโอด (ข) ภาพด้านบนทรงสี่เหลี่ยม (ค) ภาพด้านบนทรงกลม.....	83
4.26 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) ในการสร้างไดโอด รูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลม.....	84
4.27 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) ในการสร้างไดโอด รูปทรงทรงกลมที่ระยะห่าง FFR มีค่าเท่ากับ 12, 15 และ 18 μm	85
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลาย (VB) กับระยะห่าง FFR.....	86
4.29 กราฟกระแสไปข้างหน้า (IF) ต่อแรงดันไบอัสตรง (VF) ที่ไม่มี FFR และมี FFR จำนวน 8 อัน ที่ระยะห่าง 15 μm โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.6 V.....	87
4.30 ภาพตัดขวางระยะห่างระหว่าง FFR ในการออกแบบมาส์กที่ระยะห่าง 15 μm ด้านบนคือ ระยะห่าง layout design และด้านล่างคือภาพถ่ายด้วย FE-SEM.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น วงจรควบคุมมอเตอร์ วงจรจุดตัดเครื่องยนต์ และวงจรเรียงกระแส เป็นต้น อุปกรณ์ไดโอดกำลังถือได้ว่าเป็นหนึ่งในส่วนประกอบของวงจรกำลังสูงต่างๆ ปัจจุบันมีราคาซื้อขายสูงและมีความต้องการเป็นอย่างมาก ดังนั้นไดโอดกำลังจึงน่าสนใจในการนำมาสร้าง โดยที่ในการสร้างไดโอดกำลังจำเป็นต้องควบคุมปริมาณกระแสและแรงดันพังทลายที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้วงจรเสียหาย เช่น ป้องกันวงจรดิจิตอล PWM (Pulse Width Modulation) สำหรับควบคุมมอเตอร์ (DC motors) โดยมีค่าแรงดันพังทลายที่ประมาณ 600 V ที่กระแสไม่เกิน 100 μ A [1] วงจรอินเวอร์เตอร์และคอนเวอร์เตอร์ในการควบคุมการหมุนของล้อรถ hybrid car ที่ต้องใช้ไดโอดที่สามารถทนแรงดันพังทลายที่ 850 V [2] เป็นต้น ในการสร้างวงจรกำลังต้องมีคุณสมบัติกระแสและแรงดันพังทลายที่เหมาะสมกับวงจรนั้นๆ อุปกรณ์ไดโอดกำลังที่นำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายจะมีค่าแรงดันพังทลายในช่วง 220 ถึง 850 V เมื่อใช้กับแหล่งจ่ายไฟ 220 V ในประเทศไทย

ในการสร้างไดโอดกำลัง ปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้ไดโอดพังทลายคือความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณมุมของรอยต่อทำให้มีปริมาณกระแสหรือพาหะนำไฟฟ้าจำนวนมากในบริเวณนี้ ส่งผลให้เกิดการพังทลายของรอยต่อ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ผลของความโค้ง (Curvature Effect)” ปัญหาดังกล่าวทำให้ไดโอดเกิดการพังทลายเร็วกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นจึงคิดหาแนวทางที่สามารถลดผลของความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าว โดยการสร้างโพลติ่งฟิวรีจ (FFR) เนื่องจาก FFR สามารถช่วยลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อได้ โดยจะแบ่งความหนาแน่นสนามไฟฟ้าออกไปตาม FFR แต่ละอันที่เพิ่มเข้าไป

การสร้างอุปกรณ์ไดโอดกำลังในผลิตภัณฑ์กึ่งตัวนำซิลิคอนโดยใช้เทคโนโลยีการสร้างซิมอส (CMOS) เป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจาก

1. โครงสร้างของอุปกรณ์ไดโอดกำลังนี้สร้างบนเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำซิลิคอนซึ่งเป็นที่น่าสนใจ เพราะตัวอุปกรณ์สามารถสร้างให้มีขนาดเล็กจึงผลิตได้จำนวนมากทำให้ได้ราคาต่ออุปกรณ์มีราคาถูก และยังสามารถสร้างร่วมกับวงจรรวมได้
2. การสร้าง FFR ทำให้ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อหลักลดลง ส่งผลให้อุปกรณ์มีแรงดันพังทลายมากขึ้น การสร้าง FFR จำนวนหลายๆ อัน ทำให้มีแรงดันพังทลายของอุปกรณ์มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จำนวนของ FFR มีผลต่อค่าแรงดันพังทลายและกระแสรั่ว โดยเพิ่มแรงดันพังทลาย แต่ก็เพิ่มปริมาณกระแสรั่วเช่นกัน การเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วสามารถทำให้ลดลงได้โดยการสร้างโลหะบน FFR
4. ระยะห่างระหว่าง FFR กับรอยต่อพี-เอ็นหลัก มีผลต่อค่าแรงดันพังทลาย ระยะที่เหมาะสมทำให้ได้แรงดันพังทลายมีค่ามากที่สุด
5. รูปทรงการสร้างไดโอดมีผลต่อค่าแรงดันพังทลายไดโอด โดยที่รูปทรงกลมจะมีค่าแรงดันพังทลายมากกว่ารูปสี่เหลี่ยม
6. การสร้างไดโอดนี้ ใช้เทคโนโลยีการยิงฝังประจุในการเจือสาร ทำให้สามารถควบคุมปริมาณสารเจือได้อย่างแม่นยำและสามารถสร้างพร้อมกับการสร้างวงจรรวมได้
7. อุปกรณ์นี้สามารถผลิตได้ในประเทศไทย ดังนั้นสามารถลดการนำเข้าอุปกรณ์ไดโอดกำลังจากต่างประเทศที่มีราคาต่อชิ้นแพง และเกิดการพัฒนาทางด้านวงจรรีเลย์ทรอนิกส์กำลังในประเทศมากยิ่งขึ้น เนื่องจากราคาของอุปกรณ์ถูกลง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อสร้างอุปกรณ์ไดโอดกำลังชนิดรอยต่อ P^+N-N^+ ในแนวตั้ง (Vertical Structure) โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างชิปอส บนผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน โดยการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่มีโครงสร้างของ FFR ให้มีค่าทนแรงดันพังทลายมากกว่า 850 V โดยทำการศึกษาผลของ FFR ต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลายได้แก่ จำนวนของ FFR, ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักและ FFR, การเพิ่มโลหะบนโพลิตดิงฟิวส์ริง และการสร้างไดโอดรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลม

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

สมมุติฐานการศึกษาไดโอดโครงสร้างแบบมี FFR แบ่งออกเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. จำนวน FFR ที่เพิ่มมากขึ้นสามารถเพิ่มแรงดันพังทลายของไดโอดได้โดยที่กระแสรั่วไม่มากกว่าที่กำหนด
2. ระยะห่างของ FFR กับรอยต่อหลักมีผลต่อค่าแรงดันพังทลายของไดโอด ดังนั้นต้องออกแบบให้มีระยะห่างที่เหมาะสม
3. การสร้างโลหะบน FFR สามารถลดปริมาณกระแสรั่วได้และส่งผลให้แรงดันพังทลายเพิ่มมากขึ้น
4. ผลของมุมในการสร้างไดโอดมีผลต่อค่าแรงดันพังทลาย โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การสร้างอุปกรณ์กำลังโดยใช้โครงสร้างรอยต่อแบบดัดในแนวระนาบ ผลของความโค้งที่รอยต่อทำให้ไดโอดเกิดการพังทลายที่แรงดันไบอัสน้อยๆ ทำให้ไดโอดมีแรงดันพังทลายต่ำกว่าความสามารถที่ทนได้ของฐานรองสารเจือความเข้มข้นต่ำ การพังทลายดังกล่าวเกิดขึ้นจากความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อทรงกระบอก (Cylindrical Junction) การลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณนี้สามารถทำได้โดยการสร้าง FFR โดยส่วนของ FFR แต่ละอันจะเกี่ยวข้องกับการลดลงของศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ ทำให้ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าลดลง ตัวอย่างกรณีไม่มีโพลติ่งพีวล์ริง ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนจะตกคร่อมรอยต่อหลัก (Main Junction) เพียงอย่างเดียว ทำให้บริเวณมูมรอยต่อมีความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสูง ส่งผลให้เกิดการพังทลายของรอยต่อบริเวณมูมดังกล่าว เมื่อวาง FFR ในรัศมีความกว้างของบริเวณปลอดภัยที่เกิดมาจากรอยต่อหลัก ทำให้สนามไฟฟ้าเกิดการเลี้ยวเบนในแนวราบไปยัง FFR ตัวต่างๆ ที่ได้วางลงไป ทำให้บริเวณมูมของรอยต่อมีความหนาแน่นสนามไฟฟ้าน้อยลง ส่งผลให้แรงดันพังทลายบริเวณรอยต่อเพิ่มมากขึ้น

ปกติแล้วความลึกของ FFR สามารถที่จะสร้างให้ลึกกว่าหรือตื้นกว่าความลึกรอยต่อหลัก อย่างไรก็ตามการสร้าง FFR จะนิยมสร้างพร้อมกับรอยต่อหลัก โดยการแพร่ลิ้มรอรอยต่อหลักในวิทยานิพนธ์นี้ ทำการสร้าง FFR พร้อมกับการสร้างรอยต่อหลักโดยไม่เพิ่มกระบวนการสร้างแต่อย่างใด เพราะรักษาระยะห่างที่แน่นอนระหว่างรอยต่อหลักและ FFR ผลของศักย์ไฟฟ้าบริเวณ FFR จะเกี่ยวข้องกับแรงดันไบอัสที่รอยต่อหลัก กรณีที่ระยะห่างของ FFR กับรอยต่อหลักมีค่า W_d และความกว้างบริเวณปลอดภัยมีค่า W_p ศักย์ไฟฟ้าที่ FFR คือ

$$V_{FFR} = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \left(W_d W_s - \frac{W_s^2}{2} \right)$$

เมื่อรวมสมการด้านบนกับสมการความกว้างบริเวณปลอดภัย $W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_a}{qN_A}}$ เมื่อได้รับการป้อนแรงดันไบอัส V_a ได้

$$V_{FFR} = \sqrt{\frac{2qN_A}{\epsilon_s} W_s^2 V_a} + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} W_s^2$$

จากสมการพบว่าศักย์ไฟฟ้าของ FFR แปรผันแบบสแควร์รูทกับแรงดันไบอัสที่รอยต่อหลักและกำลังสองของระยะห่างของ FFR กับรอยต่อหลัก (W_s)

จากสมการพบว่า การสร้าง FFR เพียงหนึ่งอันสามารถลดผลความโค้งบริเวณมุมของรอยต่อ ทำให้สามารถลดความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าของรอยต่อ และสามารถทำให้ไดโอดทนแรงดันพังทลายได้มากขึ้น การเพิ่มแรงดันพังทลายของรอยต่อให้มากขึ้นสามารถทำได้โดยใช้ FFR จำนวนหลายๆ ตัว การเพิ่มจำนวน FFR จากหนึ่งอันสามารถเพิ่มเป็นหลายอันได้โดยง่าย เพียงแค่เพิ่มจำนวน FFR ล้อมรอบรอยต่อหลักเป็นจำนวนหลายๆ อัน และทำการเชื่อมต่อพร้อมกับการสร้างรอยต่อหลัก การทำเช่นนี้พบว่าไม่ต้องเพิ่มขึ้นขั้นตอนการสร้างแต่อย่างใด ผลของ FFR ที่มีค่าต่อแรงดันพังทลายได้แก่ 1. ระยะห่างของ FFR 2. ความกว้างหรือขนาดของ FFR 3. ความลึกของ FFR 4. ความเข้มข้นสารเจือของ FFR และ 5. จำนวนของ FFR

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาระยะห่างและจำนวนของ FFR ต่อค่าแรงดันพังทลายของไดโอดโดยกำหนดให้ ความกว้าง ความลึก และความเข้มข้นสารเจือ มีค่าคงที่ โดยมีค่าประมาณ 10 μm , 4 μm และ $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ จำนวน FFR ที่สร้างขึ้นถูกใช้ในการลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อหลัก เพราะความหนาแน่นสนามไฟฟ้านี้จะลดลงโดยกระจายค่าไปตาม FFR ที่อยู่ห่างจากรอยต่อหลักออกไปเรื่อยๆ ทำให้ลดผลของการเกิด Impact ionized อันเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสรั่ว ซึ่งส่งผลให้เกิดการพังทลายของไดโอดต่อไป

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

การสร้างไดโอดโครงสร้างแบบมี FFR เมื่อเปรียบเทียบกับหลักการในแบบพื้นฐานแล้ว ในส่วนการสร้างไดโอดแบบมี FFR จะมีค่าแรงดันพังทลายที่มากกว่าและอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่ว น้อยกว่าที่แรงดันไบอัสค่าเดียวกัน (กรณีที่ยังไม่ถึงแรงดันพังทลาย) เนื่องจากการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อหลักไปยัง FFR แต่ละอัน ความหนาแน่นสนามไฟฟ้านี้เป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกระแสรั่ว ดังนั้นการสร้างไดโอดแบบมี FFR จะสามารถเพิ่มและควบคุมการพังทลายของอุปกรณ์ไดโอดได้ดีกว่า

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยคือ ศึกษาการสร้างไดโอดกำลังโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตซีมอสในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น สภาพต้านทาน $120 \Omega \cdot \text{cm}$ ระบาย (111) ขนาดแผ่นเท่ากับ 150 mm มีความหนาแผ่นเท่ากับ 625 μm เป็นฐานรอง สร้างไดโอดโครงสร้างแบบมี FFR ให้มีค่าทนแรงดันพังทลายมากกว่า 850 V โดยจะทำการศึกษาผลของจำนวนและระยะห่างของ FFR ต่อค่าแรงดันพังทลาย โดยทำการศึกษาเงื่อนไขของ FFR ต่อการสร้างไดโอดกำลังดังนี้

1. จำนวน FFR ต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย
2. ระยะห่างระหว่าง FFR กับรอยต่อหลักต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเพิ่มโลหะบน FFR ต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย
 4. รูปทรงการสร้างระหว่างทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลมต่อค่าแรงดันพังทลาย
- การศึกษาเงื่อนไขดังกล่าวเพื่อให้สามารถสร้างไดโอดกำลังที่สามารถทนแรงดันพังทลายมากกว่า 850 V

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาจะแบ่งออกเป็นตอนๆ ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีการสร้างไดโอดและผลของ FFR ต่อแรงดันพังทลาย
2. ศึกษาขั้นตอนการสร้างไดโอดและเครื่องมือในการสร้าง
3. ศึกษาการออกแบบลวดลายวงจร โดยโปรแกรม L-edit
4. ออกแบบลวดลายและขั้นตอนการสร้างไดโอด
5. สร้างกระแสมาส์กและทำกระบวนการผลิตไดโอด
6. วัดผลอุปกรณ์และวิเคราะห์ผลการสร้าง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย การสื่อสารโดยวิธียิงฟิงประจุ การพังทลายที่ตำแหน่งต่างๆ และ FFR

บทที่ 3 กระบวนการสร้างมาส์ก กระบวนการสร้างไดโอด และการสื่อสารในกระบวนการสร้างไดโอดกำลัง

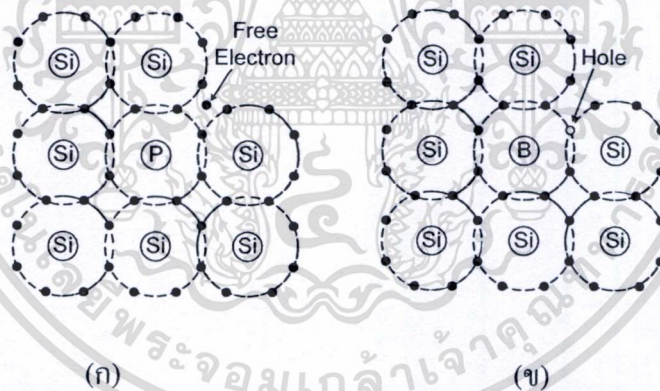
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง โดยทำการทดลองแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ดังนี้ การนำกระแสและความจุไฟฟ้าของไดโอด จำนวน FFR, การเพิ่มโลหะบน FFR, ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR, รูปทรงการสร้าง และ ผลการสร้างไดโอดทรงกลมที่มี FFR 8 อัน ที่มีค่าแรงดันพังทลาย 956 V และมีกระแสรั่วเพียง 20 nA

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำส่วนมากจะมีรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีอย่างน้อยหนึ่งรอยต่อ รอยต่อที่เกิดขึ้นเรียกว่า “รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction)” จะให้คุณสมบัติที่ต้องการสำหรับการเรกติไฟร์, การขยายสัญญาณ, การสวิตช์ และฟังก์ชันการทำงานของวงจรต่าง ๆ การสร้างรอยต่อจำเป็นต้องใช้การเจือสารเพื่อกำหนดชนิดของสารกึ่งตัวนำและปริมาณความเข้มข้นสารเจือ การแพร่สารเจือในสารกึ่งตัวนำจัดทำขึ้นเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของสารนั้นให้ดีขึ้น เช่นการเพิ่มอิเล็กตรอน (Electron) โดยการเจือสารฟอสฟอรัส (Phosphorus: P) หรือธาตุหมู่ที่ 5 และการเพิ่มโฮล (Hole) โดยการเจือสารโบรอน (Boron: B) หรือธาตุหมู่ที่ 3 ในสารกึ่งตัวนำซิลิคอน (Silicon: Si) ซึ่งเป็นธาตุหมู่ที่ 4 ทั้งนี้โฮลและอิเล็กตรอนเป็นพาหะนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.1

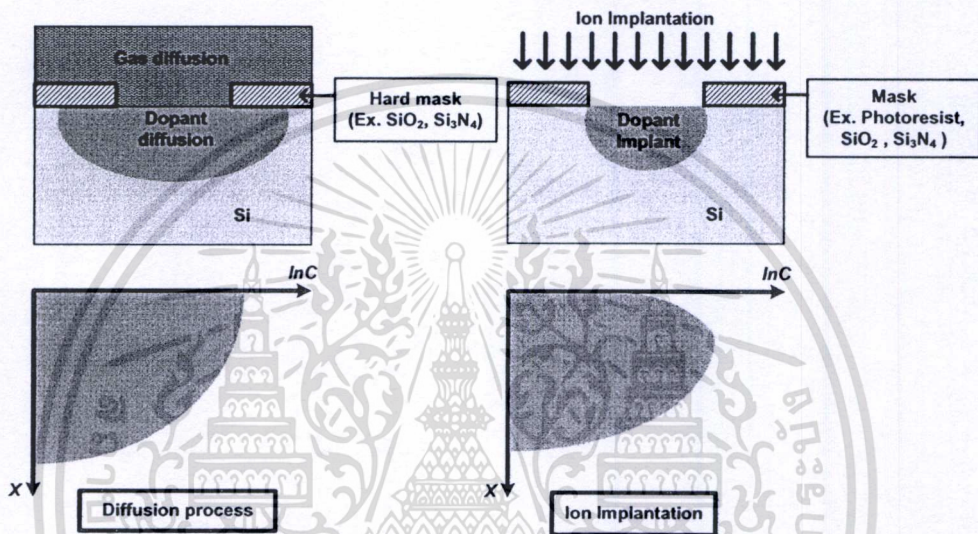


รูปที่ 2.1 (ก) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระในการเจือสารฟอสฟอรัสในผลึกซิลิคอน (ข) การเกิดโฮลในการเจือสารโบรอนในผลึกซิลิคอน

เทคโนโลยีการแพร่สารเจือในปัจจุบันมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการแพร่ (Diffusion) และ วิธีการยิงฝังประจุ (Implantation) วิธีการแพร่สารเจือทำโดยอาศัยการแพร่จากสารที่มีความเข้มข้นมากไปสู่สารที่มีความเข้มข้นน้อยภายใต้อุณหภูมิสูงในบรรยากาศไนโตรเจน หรือก๊าซเฉื่อย วิธีการยิงฝังประจุทำโดยการสร้างประจุไอออนของสารเจือแล้วทำการยิงฝังประจุด้วยพลังงานทางไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องทำภายใต้อุณหภูมิสูง ในปัจจุบันวิธีการยิงฝังประจุได้รับความนิยมอย่างมากใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสร้างวงจรรวม (Integration Circuit: IC) เพราะวิธีการยิงฝังประจุสามารถควบคุมการแพร่ด้านข้าง (Lateral Diffusion), ควบคุมปริมาณสารเจือ (Dose Control), ควบคุมความลึก (Junction Depth Control), ควบคุมการปนเปื้อนบริเวณพื้นผิวและการเลือกใช้หน้ากากป้องกัน (Mask) ได้มากกว่าวิธีการแพร่ เช่นการเลือกใช้หน้ากากป้องกันน้ำยาไวแสง (Photo resist) เพื่อเป็นหน้ากากป้องกันในการยิงฝังประจุ เป็นต้น ลักษณะการกระจายตัวของปริมาณสารเจือทั้งสองวิธีแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของปริมาณสารเจือในกระบวนการแพร่ (Diffusion) และการยิงฝังประจุไอออน (Ion Implantation) โดยที่ C คือความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ และ X คือความลึกจากผิวหน้าผลึกซิลิคอน

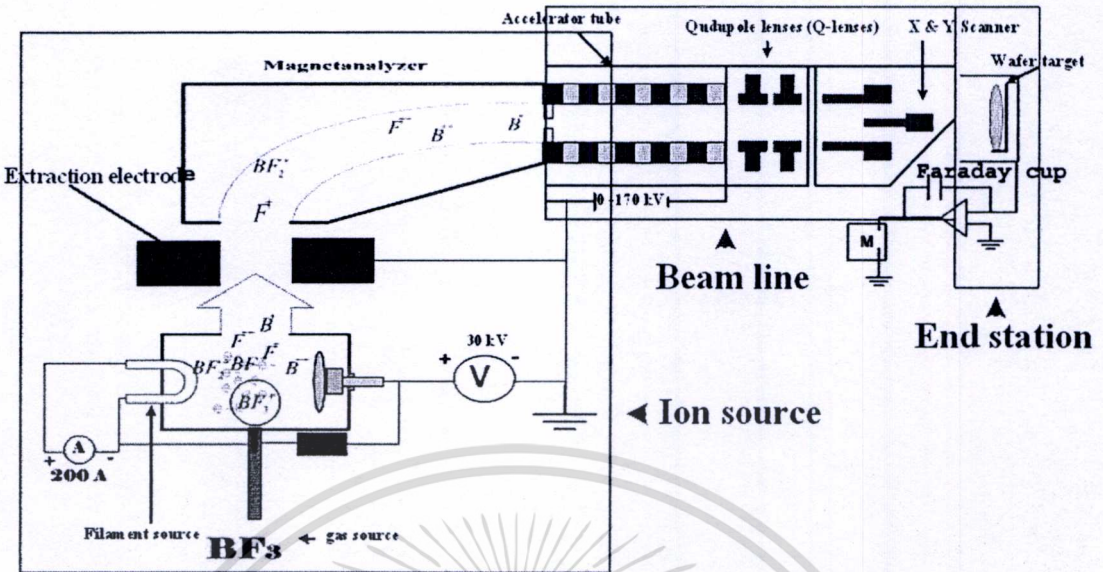
จากรูปที่ 2.2 พบว่าการกระจายตัวของสารเจือด้วยวิธีการแพร่จะกระจายตัวทุกทิศทุกทาง ซึ่งทำให้การแพร่ด้านข้างมีบริเวณเทียบเท่ากับการแพร่ด้านลึก เมื่อการแพร่ด้านข้างมีบริเวณกว้างส่งผลให้การสร้างอุปกรณ์มีขนาดใหญ่ตาม สำหรับการเจือสารด้วยวิธียิงฝังประจุพบว่าการกระจายตัวของสารเจือด้านข้างเกิดขึ้นเพียงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของความลึก ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างได้จะมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบที่พื้นที่เท่ากัน จำนวนของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยวิธียิงฝังประจุจะมีมากกว่าวิธีการแพร่ เมื่อเปรียบเทียบการทำงานในวงจรรวมก็จะมีความเร็วในการทำงานที่เร็วกว่า ส่งผลให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เช่นการสร้าง CPU ของคอมพิวเตอร์ เมื่อจำนวนทรานซิสเตอร์เพิ่มมากขึ้นความเร็วในการประเมิผลการทำงานจะเร็วขึ้นที่ขนาด CPU เท่าเดิม นั่นหมายความว่าขนาดของทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็กลง ทำให้ที่อุปกรณ์ขนาดเท่ากันมีจำนวน

ทรานซิสเตอร์มากขึ้น การเพิ่มของจำนวนทรานซิสเตอร์ในการสร้าง CPU ของคอมพิวเตอร์เป็นไปตามกฎของมัวร์ (Moore's Law)

2.1.1 การยิงฝังประจุ (Ion Implantation)

วิธีการยิงฝังประจุทำโดยการสร้างประจุไอออนของสารเจือแล้วทำการยิงฝังประจุด้วยพลังงานทางไฟฟ้า การยิงฝังประจุไอออนสารเจือจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์หรือเครื่องจักรกลในการให้กำเนิดไอออนและเร่งพลังงานในการฝังตัวของไอออนสารเจือต่างๆ เครื่องจักรที่ใช้คือ “เครื่องยิงฝังประจุ (Ion Implanter)” เครื่องยิงฝังประจุสามารถแบ่งตามการใช้งานได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) เครื่องยิงฝังประจุกระแสสูง (High Current Ion Implanter) 2) เครื่องยิงฝังประจุกระแสขนาดกลาง (Medium Current Ion Implanter) หรือรุ่นมาตรฐาน (Standard Ion Implanter) และ 3) เครื่องยิงฝังประจุพลังงานสูง (High Energy Ion Implanter) ซึ่งแต่ละรุ่นจะเหมาะสมกับงานเฉพาะด้าน เช่น เครื่องยิงฝังประจุกระแสสูง เหมาะสำหรับการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ต้องการสภาพการนำไฟฟ้าสูง ดังเช่นการสร้างโพลีเกต (Poly-gate) ของทรานซิสเตอร์ซีมอส (Complementary Metal Oxide Semiconductor: CMOS) ที่ต้องการความเข้มข้นของปริมาณสารเจือสูงในระดับ 10×10^{20} atoms/cm³ แต่ความลึกในการยิงจะตื้น เป็นต้น เครื่องยิงฝังประจุกระแสขนาดกลางเหมาะสำหรับการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ต้องการความเข้มข้นระดับกลางและความลึกระดับต่ำกว่าไมครอน เช่นการสร้าง N⁺s/d (N⁺ Source / Drain) ที่ต้องการความลึกไม่เกิน 0.44 ไมครอน ในการสร้าง CMOS ขนาดเกต 0.8 ไมครอน [3], [4] เป็นต้น และเครื่องยิงฝังประจุพลังงานสูง เหมาะสำหรับการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ต้องการความลึกในการเจือสารมาก แต่ความเข้มข้นสารเจือน้อย เช่นการสร้าง N-well ในการสร้าง CMOS ขนาดเกต 0.8 ไมครอน ซึ่งต้องการความลึกประมาณ 1.8 ไมครอน [5] เป็นต้น

ในกระบวนการเจือสารด้วยเครื่องยิงฝังประจุ ประจุที่ใช้เป็นประจุบวก เกิดจากการแยกสลายก๊าซให้เป็นพลาสมาในบริเวณ Ion Source จากนั้นประจุบวก จะถูกแยกออกมาด้วยศักย์ไฟฟ้า โดย Extraction Electrode ผ่านเข้าสู่ Analyzer Magnet เพื่อคัดแยกเฉพาะประจุที่มีมวลโมเลกุลที่ต้องการ (Atomic Mass Unit : AMU) เช่น B = 11, P = 31, Ar = 40, As = 75 และ BF₂ = 49 เป็นต้น เข้าสู่ Acceleration Tube เพื่อเพิ่มพลังงานในการเคลื่อนที่ของประจุบวก ผ่านระบบเลนส์ (Quadrupole lens) และ X-Y Scanner ในบริเวณส่วน Beam Line ไปโฟกัสและยิงกวาดลงบนแผ่นผลึกซิลิคอนบริเวณ Target ในส่วน End Station การเคลื่อนที่ของไอออนในเครื่องยิงฝังประจุเกิดขึ้นในระบบสุญญากาศทั้งหมด องค์ประกอบหลักๆของ Medium Current Ion Implanter แสดงดังรูปที่ 2.3 [6]



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบหลักของ Medium Current Ion Implanter

พลังงานในการยิงถูกควบคุมจาก 2 ส่วน คือ Extraction Electrode และ Acceleration Tube เช่น เครื่องยิงฝังประจุกระแสน้ำขนาดกลาง พลังงานของประจุสามารถกำหนดได้ด้วยความต่างศักย์ ไฟฟ้าของ Acceleration Tube ซึ่งสามารถแปรค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 170 กิโลโวลต์ ซึ่งเมื่อรวมกับศักย์ไฟฟ้าของ Extraction Electrode ซึ่งสามารถแปรค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ ในการแยกประจุภายในส่วน Ion Source ดังนั้นค่าพลังงานของประจุสามารถควบคุมได้ในช่วง 0 ถึง 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (0-200 keV) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการสร้างไดโอดโดยใช้เทคโนโลยีการเชื่อมแบบการยิงฝังประจุ เพราะต้องการปริมาณสารเจือที่แน่นอน และสามารถประยุกต์สร้างไดโอดเป็นแบบวงจรรวมได้โดยง่ายในอนาคต

กระบวนการยิงฝังประจุสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ (x) ของอะตอมสารเจือในผลึกของแข็งและพลังงาน (E) โดยพิจารณาได้จากอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทาง ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.1 [7]

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z_1^2 q^4 N Z_2}{m_e v^2} \left[\ln \frac{1.123 M_1 m_e v^3}{\omega Z_1 q^2 (M_1 + m_e)} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (2.1)$$

โดยที่ Z_1 = ตัวเลขประจุ, Z_2 = ตัวเลขอะตอม, v = ความเร็วไอออนในการเคลื่อนที่, N = ความหนาแน่นอะตอม, M_1 = น้ำหนักอะตอม, m_e = มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (Electron rest mass),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

q = ประจุอิเล็กตรอน (Electron charge), $\ln \mathcal{W} = \sum f_i \ln \omega_i$; f_i = Strength of the oscillator.
 ω_i = Frequency of the i^{th} electron, $\beta = \frac{v}{c_0}$; c_0 = ความเร็วของแสงในสุญญากาศ (Velocity of light).

จากสมการที่ 2.1 พบว่าไอออนที่ใช้ในการยิงฝังประจุถ้ามีมวล (M_i) ต่างกัน จะทำให้ระยะการเคลื่อนที่มีค่าต่างกัน ระยะการเคลื่อนที่ของไอออนสารเจือจะอาศัยพลังงานจลน์จากพลังงานในการยิง และลดพลังงานลงเรื่อยๆ จนเป็นศูนย์เมื่อเข้าสู่ภายในวัสดุฐานรอง เนื่องจากไอออนเกิดการชนกับอะตอมฐานรอง ทำให้ระยะการเคลื่อนที่ของไอออนหรืออะตอมสารเจือ (R) ขึ้นอยู่กับอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทาง ดังสมการที่ 2.2

$$R = \frac{1}{N} \int_E^0 \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad (2.2)$$

โดยที่ R คือ ระยะเฉลี่ยที่ไอออนเข้าไปในเนื้อซิลิกอน (m), E คือ พลังงานในการยิงประจุ (eV), $S_n(E)$ คือ Nuclear Stopping เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการชนกับอะตอมต่อระยะทาง (eV/m), $S_e(E)$ คือ Electronic Stopping เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการ Interaction กับอิเล็กตรอนต่อระยะทาง (eV/m), N คือ เลขอะตอม

การเจือสารโดยวิธียิงฝังประจุจำเป็นต้องทำการแอนนัล (Anneal) เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนสารเจือกับอะตอมฐานรองแบบสมบูรณ (Activation) เมื่อพันธะระหว่างสารเจือและฐานรองเกิดการจับคู่จะทำให้พาหะนำไฟฟ้า ซึ่งความร้อนดังกล่าวทำให้สารเจือเกิดการแพร่ (Diffusion) ซึ่งค่าความลึกในการแพร่ (X_j) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3 [8]

$$X_j = \left\{ 4Dt \ln \frac{Q_0}{C_{sub} \sqrt{\pi Dt}} \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

โดยที่ X_j คือ ความลึกในการแพร่ (m), D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่, t คือ เวลา (sec), Q_0 คือ ปริมาณสารเจือ หรือ โดส (Dose) (ions/cm²), C_{sub} คือ ความเข้มข้นของปริมาณสารเจือในฐานรอง (atoms/cm³)

ดังนั้นหลังการยิงฝังประจุและแอนนีลจะมีค่าความลึกรวมในการเจือสารคือ $X_{j_{total}} = R + X_j$ การเจือสารเพื่อลดหรือเพิ่มความต้านทานของฐานรอง จำเป็นต้องทราบค่าสภาพต้านทาน (Resistivity: ρ) ในการเจือสาร โดยที่ค่าสภาพต้านทานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.4 [9]

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.4)$$

โดยที่ q คือประจุอิเล็กตรอนมีค่า 1.6×10^{-19} C, μ_n คือสภาพคล่องของอิเล็กตรอน ($\text{cm}^2/\text{V-sec}$), μ_p คือสภาพคล่องของโฮล ($\text{cm}^2/\text{V-sec}$), n คือความเข้มข้นของปริมาณอิเล็กตรอน (atoms/cm^3), p คือความเข้มข้นของปริมาณโฮล (atoms/cm^3)

ค่าความต้านทานเชิงแผ่น (R_s) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (\Omega/\text{sq}) \quad (2.5)$$

โดยที่ t คือความหนาของวัสดุ หรือประมาณได้ว่าเป็นความลึกในการเจือสาร (cm)

สำหรับการวัดโดยเทคนิค Four Point Probe โดยทั่วไปที่มีค่าระยะห่างระหว่างหัวเข็ม (Probe Spacing: s) มากกว่าความหนาเป็นจำนวนมากๆ ($s \gg t$) สามารถคำนวณดังสมการที่ 2.6

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} (X_j) = 4.532 \frac{V}{I} (X_j) \quad (2.6)$$

โดยที่ ρ คือ R_s ที่มีค่า t น้อยกว่า s มากๆ (Ω/sq), X_j คือความลึกในการเจือสาร (cm), V คือความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt), I คือกระแสไฟฟ้า (Ampere)

ดังนั้นพบว่าความต้านทานเชิงแผ่นที่ต้องการจะเกี่ยวข้องกับความลึกในการเจือสาร ดังสมการที่ 2.5 ความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ (Dopant Concentration (C_p): atoms/cm^3) สามารถหาได้จากโดสที่ทำการยิงฝังประจุ ดังสมการที่ 2.7 [9]

$$C_p = \frac{\text{dose}(\text{ions}/\text{cm}^2)}{\sqrt{2\pi\Delta R p}} = \frac{0.4}{\Delta R p} * \text{dose}(\text{ions}/\text{cm}^2) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ C_p คือความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ (atom/cm³), ΔRp คือ One Standard Deviation; “Straggle”

เมื่อสารเจือเกิดการ Activate ที่สมบูรณ์ จะพบว่า $C_p = n$ หรือ $C_p = p$ ในสมการที่ 2.4 ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพด้านทานของวัสดุนั้น ดังนั้นการควบคุมความด้านทานของสารกึ่งตัวนำ สามารถควบคุมได้ด้วยปริมาณสารเจือในการยิงฝังประจุ

ขั้นตอนการเจือสารโดยวิธียิงฝังประจุประกอบไปด้วย 3 กระบวนการ คือ 1) กระบวนการยิงฝังประจุ 2) กระบวนการแอนนีส และ 3) กระบวนการวิเคราะห์

กระบวนการยิงฝังประจุ สามารถเลือกชนิดของไอออนสารเจือ เพื่อกำหนดชนิด (Type) ของสารกึ่งตัวนำหลังการเจือสารนั้นๆ การกำหนดปริมาณสารเจือ เพื่อควบคุมความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ การกำหนดพลังงานในยิงฝังประจุ เพื่อควบคุมความลึกในการเจือสาร และการกำหนดมุม (Tilt) ในการยิงฝังประจุ เพื่อลดปรากฏการณ์ Channeling Effect [10] และ Channeling Tail ในชั้นโพลีเกต (Polycrystalline Si Gates) [11]

กระบวนการแอนนีส หลังจากทำการกระบวนการยิงฝังประจุเสร็จแล้ว บริเวณที่ถูกยิงฝังประจุ จะมีการเปลี่ยนรูปร่างจากโครงสร้างผลึกไปเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งอะตอมสารเจือจะอยู่ภายนอกแลตทิซ (Lattice) ของอะตอมที่ทำการเจือ เป็นเหตุให้การนำไฟฟ้าลดลง ดังนั้นเราต้องทำการแอนนีส โดยให้อุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียส ขึ้นไป [12] ภายใต้บรรยากาศในโตรเจน เพื่อซ่อมแซมโครงสร้างที่เสียหายให้คืนกลับมาเป็นผลึกอีกครั้ง และกระตุ้นให้เกิดพาหะตัวนำไฟฟ้าจากการจับกันระหว่างพันธะอะตอม

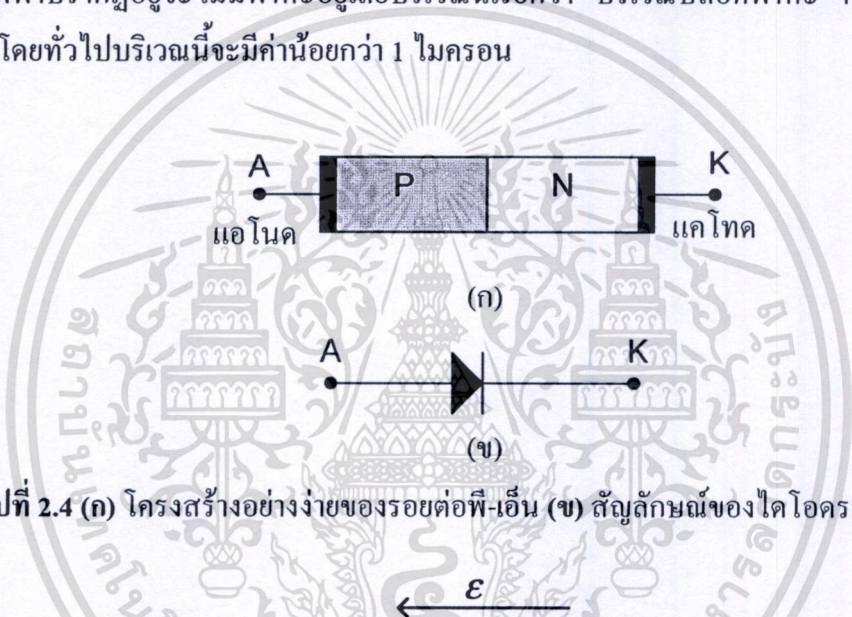
2.2 รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction)

รูปที่ 2.4 แสดงภาพโครงสร้างอย่างง่ายของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งบริเวณด้านหนึ่งถูกได้ไปด้วยอะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor Impurity Atoms) เพื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเรียกว่า “แอโนด” (Anode) หรือขั้วบวก และบริเวณข้างเคียงถูกได้ไปด้วยอะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor Impurity Atoms) เพื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นถูกเรียกว่า “แคโทด” (Cathode) หรือขั้วลบ

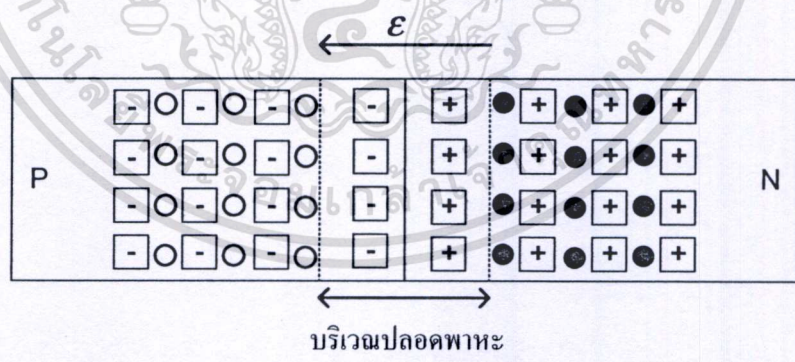
หลังการสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นจะเกิดรอยต่อพี-เอ็น บริเวณรอยต่อจะเกิดการแพร่ของพาหะ โดยที่อิเล็กตรอนพาหะข้างมาก (Majority Carrier Electrons) ในบริเวณเอ็น จะเริ่มแพร่เข้าไปในส่วนพีและโฮลพาหะข้างมาก (Majority Carrier Holes) ในส่วนพีจะเริ่มแพร่เข้าไปในส่วนเอ็น การแพร่ผ่านนี้ทำให้ไอออนของอะตอมผู้ให้ และไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้แสดงประจุไฟฟ้าออกมา โดยไอออนบวกของอะตอมผู้ให้แสดงประจุไฟฟ้าบวกและไอออนลบของอะตอมผู้รับแสดงประจุไฟฟ้าลบ ดังนั้นจึงทำให้เริ่มมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณภายในรอยต่อและเรียกว่า “สนามไฟฟ้าภายใน” (built in electric field) แสดงดังรูปที่ 2.5 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพี และต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็น ไม่ให้ข้ามไปยังด้านตรงข้าม อย่งไรก็ดี ในช่วงแรกๆ เนื่องจากแรงจากการแพร่มากกว่าแรงจากสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการแพร่ของพาหะได้ จากนั้นเมื่อแรงจากสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่ามากพอที่จะยับยั้งการแพร่ของพาหะ ทำให้กระแสรวมมีค่าเท่ากับศูนย์ เราเรียกภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” หรือ “equilibrium” บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่จะไม่มีพาหะอยู่เลยบริเวณนี้เรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” หรือ “depletion region” โดยทั่วไปบริเวณนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 ไมครอน



รูปที่ 2.4 (ก) โครงสร้างอย่างง่ายของรอยต่อพี-เอ็น (ข) สัญลักษณ์ของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 2.5 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล โดยที่อิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้

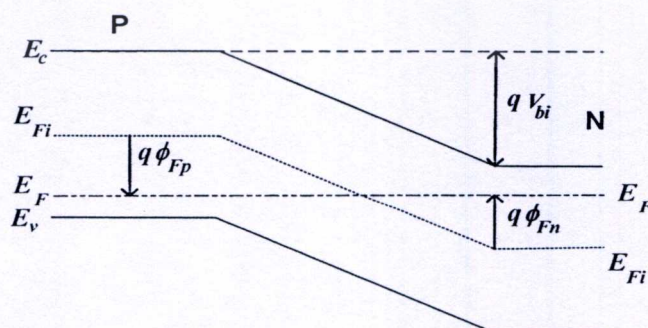
สัญลักษณ์ต่างๆ มีความหมายดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ⊕ หรือ N_D^+ คือ สัญลักษณ์ของอะตอมผู้ให้ที่กลายเป็นไอออนบวก (positive ionized donor atoms) ซึ่งมีสภาพเป็นประจุบวก และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (immobile positive charge)
- ⊖ หรือ N_A^- คือ สัญลักษณ์ของอะตอมผู้รับที่กลายเป็นไอออนลบ (negative ionized acceptor atoms) ซึ่งมีสภาพเป็นประจุลบ และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (immobile negative charge)
- คือ สัญลักษณ์ของอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) มีประจุเป็นลบ และเคลื่อนที่ได้ (mobile negative charge)
- คือ สัญลักษณ์ของโฮล (hole) มีประจุเป็นบวก และเคลื่อนที่ได้ (mobile positive charge)

สมมุติว่าไม่ได้ให้แรงดันใดๆ ตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น แล้วรอยต่อจะอยู่ในสภาพสมดุลความร้อน คือระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level: E_F) มีค่าคงที่ตลอดในเนื้อสารกึ่งตัวนำดังรูปที่ 2.6 แสดงไดอะแกรมแถบพลังงานสำหรับรอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุลความร้อน แถบพลังงานความนำ (Conduction band: E_C) และแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band: E_V) ต้องโค้งงอเมื่อผ่านบริเวณปลอดพาหะ เพราะว่าตำแหน่งของแถบพลังงานความนำและแถบวาเลนซ์เมื่อเทียบกับพลังงานเฟอร์มีจะเปลี่ยนแปลงไประหว่างบริเวณพีไปบริเวณเอ็น

อิเล็กตรอนในแถบความนำของบริเวณเอ็นพยายามที่จะเคลื่อนที่เข้าไปในแถบความนำของบริเวณพีโดยมีกำแพงศักย์กั้นไว้ กำแพงศักย์นี้เรียกว่า “ศักย์ภายใน” (Built-in Potential Voltage) และเขียนแทนได้โดย V_{bi} กำแพงศักย์ภายในจะรักษาสสมดุลระหว่างอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในบริเวณเอ็น และอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในบริเวณพี และระหว่างโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในบริเวณพีและโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในบริเวณเอ็น ความแตกต่างของศักย์ตกคร่อมรอยต่อไม่สามารถที่จะวัดได้จากโวลต์มิเตอร์ เพราะว่าจะเกิดกำแพงศักย์ค่าใหม่ขึ้นระหว่างโพรบ (Probe) และสารกึ่งตัวนำซึ่งจะหักล้างกับ V_{bi} ทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้ ศักย์ V_{bi} ทำหน้าที่รักษาสสมดุลเอาไว้ ดังนั้นจะไม่เกิดกระแสใดๆ เนื่องจากแรงดันนี้



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นที่สมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับเฟอร์มิอินทรินซิก (Intrinsic Fermi Level: E_{Fi}) จะมีระยะห่างเท่ากับจากขอบของแถบความนำตลอดรอยต่อ ดังนั้นค่าแรงศักย์ภายในสามารถกำหนดได้จากความแตกต่างระหว่างระดับระดับเฟอร์มิอินทรินซิกในบริเวณพีและบริเวณเอ็น เรากำหนดให้ศักย์ ϕ_{Fn} และ ϕ_{Fp} คือศักย์ที่แสดงในรูปที่ 2.6 ดังนั้นเราจะได้

$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| \quad (2.8)$$

ในบริเวณเอ็น ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในแถบความนำหาได้โดย

$$n_0 = N_C \exp \left[\frac{-(E_C - E_F)}{kT} \right] \quad (2.9)$$

ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้ คือ

$$n_0 = n_i \exp \left[\frac{-(E_F - E_{Fi})}{kT} \right] \quad (2.10)$$

ซึ่ง n_i และ E_{Fi} คือ ความเข้มข้นพาหะอินทรินซิกและพลังงานเฟอร์มิอินทรินซิกตามลำดับ อาจจะกำหนดศักย์ ϕ_{Fn} ในบริเวณเอ็นได้เป็น

$$q\phi_{Fn} = E_{Fi} - E_F \quad (2.11)$$

สมการ (2.10) อาจจะเขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$n_0 = n_i \exp \left[\frac{-(q\phi_{Fn})}{kT} \right] \quad (2.12)$$

ทำการใส่สี่อรรถธรรมชาติทั้งสองข้างของสมการ (2.12) และให้ $n_0 = N_d$ จากนั้นแก้สมการเพื่อหาค่าศักย์ เราจะได้

$$\phi_{Fn} = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (2.13)$$

ในการทำงานเดียวกันที่บริเวณพี ความเข้มข้นของโฮลหาได้จาก

$$p_0 = N_a = n_i \exp\left[\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right] \quad (2.14)$$

ซึ่ง N_a คือความเข้มข้นอะตอมผู้รับ เราสามารถหาศักย์ ϕ_{Fn} ในบริเวณพีได้ คือ

$$q\phi_{Fp} = E_{Fi} - E_F \quad (2.15)$$

รวมสมการ (2.14) และ (2.15) เราจะได้พบว่า

$$\phi_{Fp} = +\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (2.16)$$

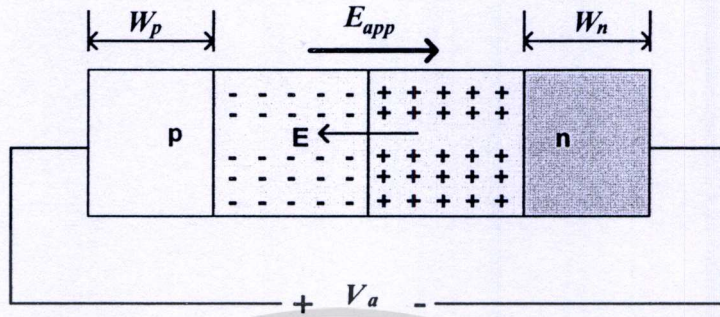
สุดท้ายค่าแรงศักย์ภายในสำหรับรอยต่อชั้นบันได หาได้โดยการแทนสมการ (2.13) และ (2.16) ลงในสมการ (2.8) ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ดังนี้ คือ

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) = V_t \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (2.17)$$

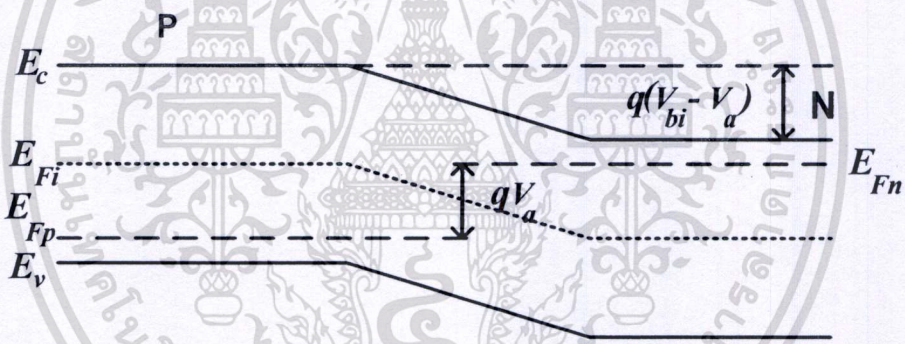
ซึ่ง $V_t = \frac{kT}{q}$ และถูกกำหนดให้เป็นแรงดันเนื่องจากความร้อน (Thermal Voltage)

ถ้าให้แรงดันบวกที่บริเวณพีเมื่อเทียบกับบริเวณเอ็นดังรูปที่ 2.7 ค่าแรงศักย์จะมีค่าลดลง แสดงรอยต่อพี-เอ็น โดยให้แรงดัน V_a สนามไฟฟ้าในเนื้อสารบริเวณพีและบริเวณเอ็นมีค่าน้อยมาก โดยปกติแล้วแรงดันที่ให้ทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณรอยต่อ สนามไฟฟ้า E_{app} ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยแรงดันที่ให้เข้าไปจากภายนอกจะอยู่ในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า ซึ่งมีประจุค้างที่สมดุลความร้อนอยู่ ดังนั้นสนามไฟฟ้าสุทธิในบริเวณประจุค้างจะลดต่ำกว่าค่าที่สมดุล ค่าสมดุลที่น้อยมากระหว่างการแพร่และแรงจากสนามไฟฟ้าที่สมดุลความร้อน จะถูกรบกวนจากแรงสนามไฟฟ้าที่ป้องกันพาหะส่วนมากบริเวณประจุค้างจะลดลง อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากจากด้านเอ็นถูกฉีดข้ามบริเวณปลอดพาหะเข้าไปในด้านพี และโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากจากด้านพีถูกฉีดข้ามบริเวณปลอดพาหะเข้าไปในด้านเอ็น ตลอดเท่าที่แรงดัน V_a ถูกให้แรงดันไบอัสเข้าไป การฉีดของพาหะข้ามบริเวณประจุค้างจะต่อเนื่องเรื่อยไป และกระแสจะถูกสร้างขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น เงื่อนไขการ

ไบอัส คือการไบอัสไปข้างหน้าไดโอะแกรมแสดงแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น เมื่อถูกไบอัสไปข้างหน้าแสดงในรูปที่ 2.8

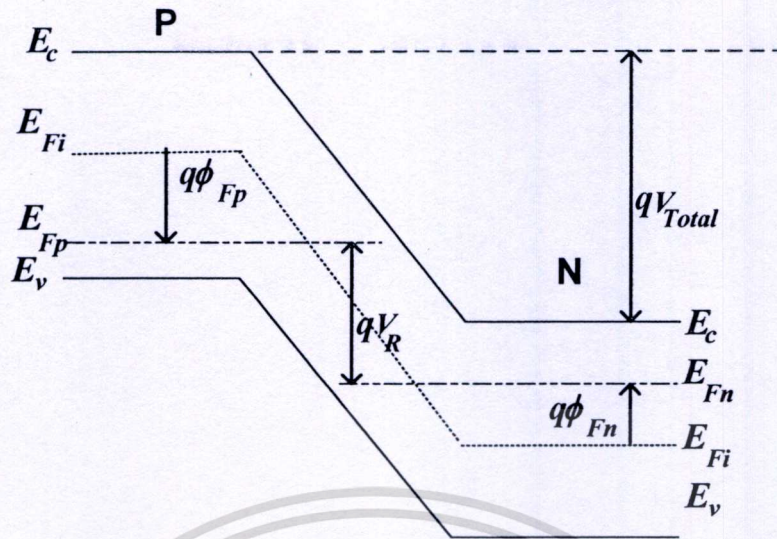


รูปที่ 2.7 รอยต่อพี-เอ็น เมื่อได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้าหรือแรงดันไบอัสตรง แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำโดย V_a และสนามไฟฟ้าประจุก้าง



รูปที่ 2.8 ไดโอะแกรมแสดงแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นเมื่อได้รับไบอัสตรง

กรณีเมื่อให้แรงดันบวกแก่บริเวณเอ็นเมื่อเทียบกับบริเวณพี เมื่อสัณยวัตถุลดต่ำลงระดับเฟอร์มิค่านเอ็นจะต่ำกว่าระดับเฟอร์มิค่านพี ความต่างของระดับพลังงานทั้งสองจะเท่ากับแรงดันที่ให้เข้าไป ไดโอะแกรมของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้การไบอัสย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โคอะแกรมของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้การไบอัสย้อนกลับ

ค่าแรงศักย์รวม หรือ V_{Total} จะเพิ่มขึ้น ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปเป็นเงื่อนไขไบอัสย้อนกลับ
ค่าแรงศักย์รวมตอนนี้คือ

$$V_{Total} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| + V_R \quad (2.18)$$

ซึ่ง V_R คือ ขนาดของแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ สมการ (2.18) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้คือ

$$V_{Total} = V_{bi} + V_R \quad (2.19)$$

ซึ่ง V_{bi} คือค่าแรงศักย์ภายในที่สภาวะสมดุลความร้อน

2.2.1 กระแสรอยต่อพี-เอ็น ในอุดมคติ (Ideal P-N Junction Current)

กระแสทั้งหมดในรอยต่อคือผลรวมของกระแสอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดช่วง
ปลอดพาหะ เพราะว่ากระแสอิเล็กตรอนและโฮลเป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องตลอดรอยต่อพี-
เอ็น ความหนาแน่นกระแสการแพร่โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในด้านเอ็นที่ $x = x_n$ หาได้จาก
ความสัมพันธ์

$$J_p(x_n) = -qD_p \left. \frac{dp_n(x)}{dx} \right|_{x=x_n} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าการ โด๊ปเป็นแบบสม่ำเสมอ ความเข้มข้นพาหะที่สมดุลความร้อนจะคงที่ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสการแพร่โฮลอาจเขียนได้เป็น

$$J_p(x_n) = -qD_p \frac{d(\delta p_n(x))}{dx} \Big|_{x=x_n} \quad (2.21)$$

$$\text{โดยที่ } \delta p_n(x) = p_n(x) - p_{n0} = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{x_n - x}{L_p}\right)$$

ทำการดิฟเฟอเรนทิเอท $\delta p_n(x)$ และแทนในสมการ (2.21) จะได้ว่า

$$J_p(x_n) = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.22)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถคำนวณความหนาแน่นกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนที่ $x = -x_p$ คือ

$$J_n(-x_p) = -qD_n \frac{d(\delta n_p(x))}{dx} \Big|_{x=-x_p} \quad (2.23)$$

$$\text{โดยที่ } \delta n_p(x) = n_p(x) - n_{p0} = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{x_p + x}{L_n}\right)$$

ทำการดิฟเฟอเรนทิเอท $\delta n_p(x)$ และแทนในสมการ (2.23) จะได้ว่า

$$J_n(-x_p) = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.24)$$

ความหนาแน่นกระแสทั้งหมดในรอยต่อพี-เอ็น คือ

$$J = J_p(x_n) + J_n(-x_p) = \left[\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right] \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.25)$$

สมการ (2.25) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น เราอาจนิยามตัว

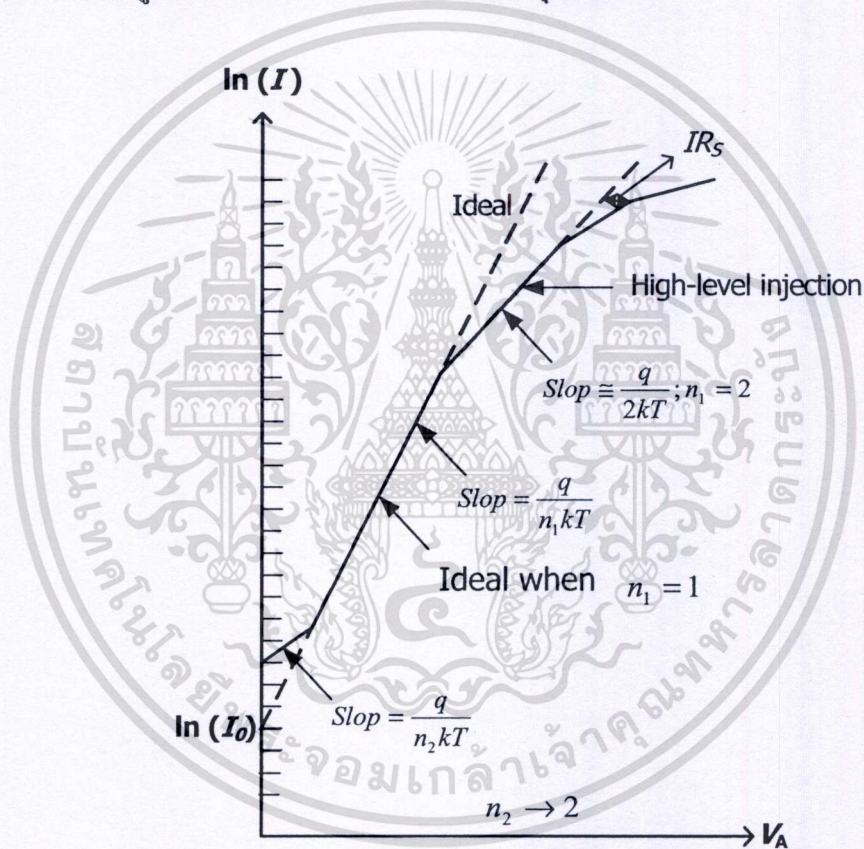
พารามิเตอร์ J_s ดังนี้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_s = \left[\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right] \quad (2.26)$$

ดังนั้นสมการ (2.25) อาจเขียนได้ใหม่เป็น

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.27)$$

สมการ (2.27) เป็นที่รู้จักกันดีในนาม “สมการไดโอดในอุดมคติ”



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง

2.2.2 กระแสการเกิด-การรวมตัวใหม่ (Generation-Recombination Current)

ในการหาความสัมพันธ์ของกระแสต่อแรงดันในทางอุดมคติจะไม่คิดผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลอดพาหะ แต่ในความเป็นจริงมีองค์ประกอบของประจุจากที่อื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่ “กระแสการเกิดและรวมตัวใหม่ (Generation-Recombination Current)” โดยที่กระแสการเกิดและรวมตัวใหม่จะเกิดภายในบริเวณปลอดพาหะ ทำให้คุณสมบัติกระแสต่อแรงดันเบี่ยงเบนไปจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุดมคติ กระแสที่เพิ่มเข้ามานี้เกิดจากกระบวนการรวมตัวใหม่ตามหลักฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ อัตราการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินจากทฤษฎีของ Shockley-Read Hall เขียนได้ดังนี้

$$R = \frac{C_n C_p N_i (np - n_i^2)}{C_n (n + n') + C_p (p + p')} \quad (2.28)$$

โดยที่ n และ p คือ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ กระแสการเกิดเมื่อได้รับแรงดันย้อนกลับ (Reverse-Bias Generation Current) ถ้าเราสมมติว่าอัตราการเกิดเป็นค่าคงที่ตลอดทั้งบริเวณปลอดพาหะ จะได้ว่า

$$J_{gen} = \frac{qn_i W}{2\tau_0} \quad (2.29)$$

ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไบอัสย้อนกลับทั้งหมดคือ ผลรวมของความหนาแน่นกระแสอิมิตัวย้อนกลับรวมกับความหนาแน่นกระแสการเกิดดังสมการ

$$J_R = J_s + J_{gen} \quad (2.30)$$

ดังนั้นกระแสอิมิตัวย้อนกลับรวม จะเกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าเนื่องจาก

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) (V_{bi} + V_R) \right\}^{1/2} \quad (2.31)$$

เมื่อ $V_R \gg V_{bi}$ ประมาณได้ว่า

$$J_R \approx J_{gen} = \frac{Aqn_i W}{2\tau_0} \quad (2.32)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัสรอยต่อพี-เอ็น กระแสการรวมตัวใหม่ในขณะที่ได้รับไบอัสไปข้างหน้า (Forward-Bias Recombination Current) หาได้จาก

$$J_{rec} = \frac{qn_i W}{2\tau_0} \exp\left(\frac{qV_a}{n_2 kT}\right) = J_{r0} \exp\left(\frac{qV_a}{n_2 kT}\right) \quad (2.33)$$

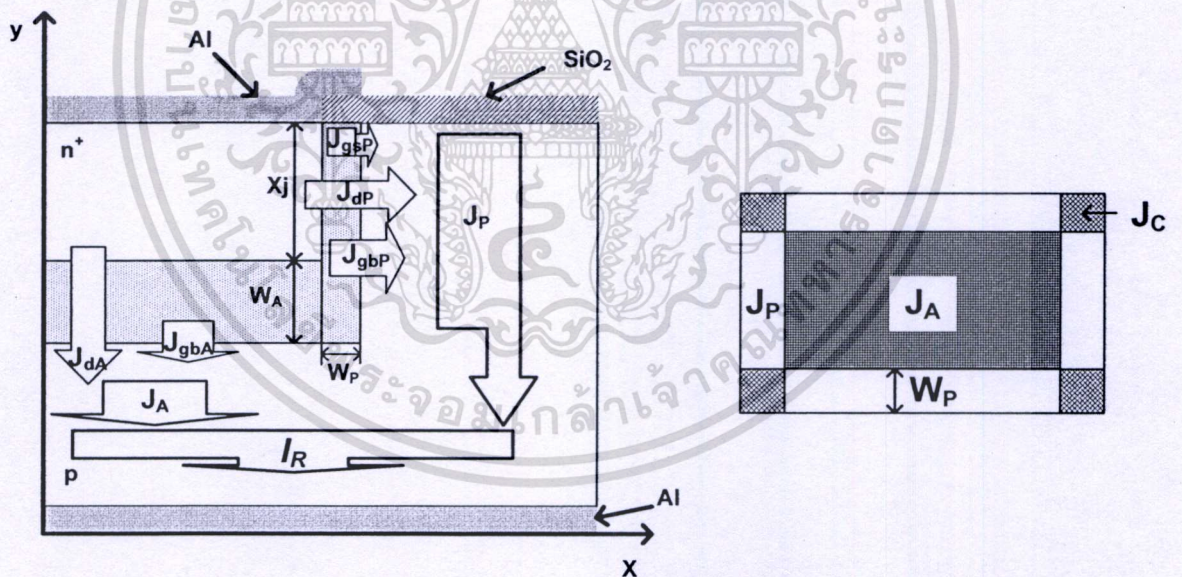
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่พารามิเตอร์ n_2 ถูกเรียกว่า “แฟกเตอร์อุดมคติ” (Ideality Factor) เมื่อแรงดันไบอัสไปข้างหน้ามีค่าน้อย ๆ $V_a \ll V_{bi}$ เมื่อ $n_2 \cong 2$ การรวมตัวใหม่มีอิทธิพลมากกว่าการแพร่ เมื่อแรงดันไปข้างหน้ามีค่าไม่มากนัก $V_a < V_{bi}$ ทำให้ $n_2 \cong 1$ แสดงว่ากระแสการแพร่มีอิทธิพลมากกว่าการรวมตัวใหม่และจะเกิดที่บริเวณการเปลี่ยนแปลง (Transition Region) ซึ่งบริเวณนี้ค่า n_2 มีค่า $1 < n_2 < 2$ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไบอัสไปข้างหน้าทั้งหมดคือ ผลรวมของการรวมตัวใหม่และความหนาแน่นกระแสการแพร่ ดังนี้

$$J = J_{rec} + J_D \quad (2.34)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของไดโอด เขียนได้ดังนี้

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_a}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.11 ภาพจำลองตำแหน่งการเกิดของกระแสบริเวณรอยต่อและบริเวณปลอดพาหะ

โดยที่พารามิเตอร์ n ถูกเรียกว่า “แฟกเตอร์อุดมคติ” (Ideality Factor) โดยที่ $n = n_1 = n_2$ เมื่อแรงดันไบอัสไปข้างหน้ามีค่าน้อยมาก ๆ สมการนำกระแสจะใช้ $n = n_2$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขกระแสการเกิดและรวมตัวใหม่ เมื่อ $n = n_1 = n_2 = 1$ ไดโอดจะอยู่ในรูปการนำกระแสอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงดันไบอัสไปข้างหน้ามีค่ามากขึ้น ทำให้ $n = n_1 \approx 2$ จะพบว่ากระแสการฉีดระดับสูงมีอิทธิพลมากขึ้นดังรูปที่ 2.10 เมื่อความต้านทานอนุกรมในอุปกรณ์ไดโอดมีค่ามาก ส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์กระแสต่อแรงดันเกิดการเบี่ยงเบนอีกครั้ง ซึ่งเป็นผลจากความต้านทานอนุกรมจะกล่าวต่อไป

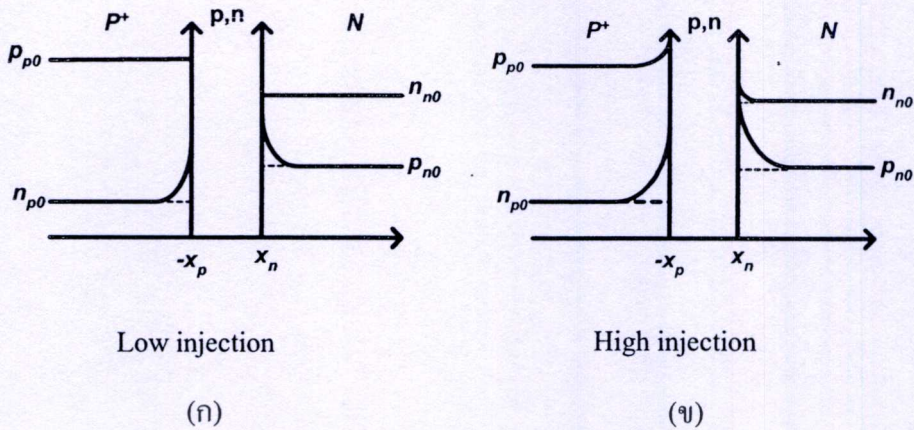
ตำแหน่งการเกิดของกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 2.11 จากรูปสามารถคำนวณกระแสได้ดังสมการที่ (2.36) คือ [13]

$$I = I_A + I_P + I_C + I_{par} = J_A * A + J_P * A_P + J_C * N_C + I_{par} \quad (2.36)$$

จากรูปที่ 2.11 พบว่าการนำกระแสส่วน $I_C + I_{par}$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้นพารามิเตอร์หลักที่กำหนดกระแสรวมคือ $I_A + I_P$ กระแส I_A จะถูกจำกัดด้วยขนาดของอุปกรณ์ แต่ I_P ถูกจำกัดด้วยความลึกในการเจือสาร ดังนั้นถ้าเราสามารถทำการเจือสารให้มีค่าความลึกมากๆ ก็จะสามารถเพิ่มการนำกระแสรวมได้มากขึ้นด้วย แต่กระแสรั่วเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับก็จะมีค่ามากขึ้นเช่นกัน

2.2.3 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะกระแสสูง (High Current Injection in P-N Junction)

เมื่อยรอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสค่าสูงๆ กล่าวคือ $V_A > V_{bi}$ ซึ่งกรณีของซิลิคอนไดโอด $V_{bi} \approx 0.7$ โวลต์ จากการคำนวณและวิเคราะห์จะพบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดข้ามรอยต่อกรณีนี้มีค่าสูงมาก ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยบริเวณปลอดพาหะของรอยต่ออย่างมาก ทำให้ความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นพาหะส่วนมาก นั่นคือ $p_{n0} \approx n_{n0}$ หรือ $n_{p0} \approx p_{p0}$ แสดงดังรูปที่ 2.13 (ข) ในกรณีเช่นนี้ถูกเรียกว่า “การฉีดระดับสูง” (High Level Injection) ซึ่งต่างจาก “การฉีดระดับต่ำ” (Low Level Injection) ที่ $p_{n0} \ll n_{n0}$ หรือ $n_{p0} \ll p_{p0}$ เช่นกรณีรอยต่อ $p^+ - n$ การเปลี่ยนแปลงของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ ในกรณีการฉีดระดับต่ำและการฉีดระดับสูงแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า กรณีการฉีดระดับสูง [14]



รูปที่ 2.12 ความหนาแน่นของพาหะส่วนมากและพาหะส่วนน้อยที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ $p^+ - n$ ในกรณี (ก) การฉีดระดับต่ำ (จ) การฉีดระดับสูงๆ หรือ Kirk Effect

เนื่องจากรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสค่าสูง $V_A > V_{bi}$ ทำให้โฮลจากทางด้านพีฉีดเข้าไปยังด้านเอ็นเป็นจำนวนมาก โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยทางด้านเอ็นจึงเพิ่มขึ้นอย่างมาก และมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากทางด้านเอ็น นอกจากนี้เพื่อรักษาความสมดุลทางไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่ $\Delta n \approx \Delta p$ ดังนั้นที่ขอบบริเวณปลอดพาหะทำให้พาหะส่วนมากและพาหะส่วนน้อยมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากการฉีดระดับต่ำที่มีเพียงพาหะส่วนน้อยเท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลง

ดังนั้นการฉีดระดับสูงจึงทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อทำให้มีแรงตกคร่อมในย่านที่เป็นกลาง (Neutral-Region) ของด้านพีและด้านเอ็น ซึ่งก็คือส่วนที่อยู่นอกบริเวณปลอดพาหะนั้นเอง ดังนั้นในขณะนี้จึงมีแรงดันตกคร่อมทั้งในบริเวณปลอดพาหะและนอกบริเวณปลอดพาหะดังในรูปที่ 2.13 (ก) ผลดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถสังเกตเห็นได้ว่าในซิลิคอนไดโอดเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงโดยเกิดแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าสูงกว่า 0.7 โวลต์ แล้วกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ กับแรงดันที่ป้อนหรือก็คืออัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสจะลดลงนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (จ) ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากค่าความต้านทานอนุกรมของ R_S สมการกระแสของไดโอดในภาวะการฉีดระดับสูง หรือในภาวะกระแสสูงนี้ สามารถประมาณได้ดังสมการที่ 2.37 คือ

$$I \cong I_0 (\exp(qV_i / kT)) \approx I_0 (\exp(q(V_A - IR_S) / kT)) \tag{2.37}$$

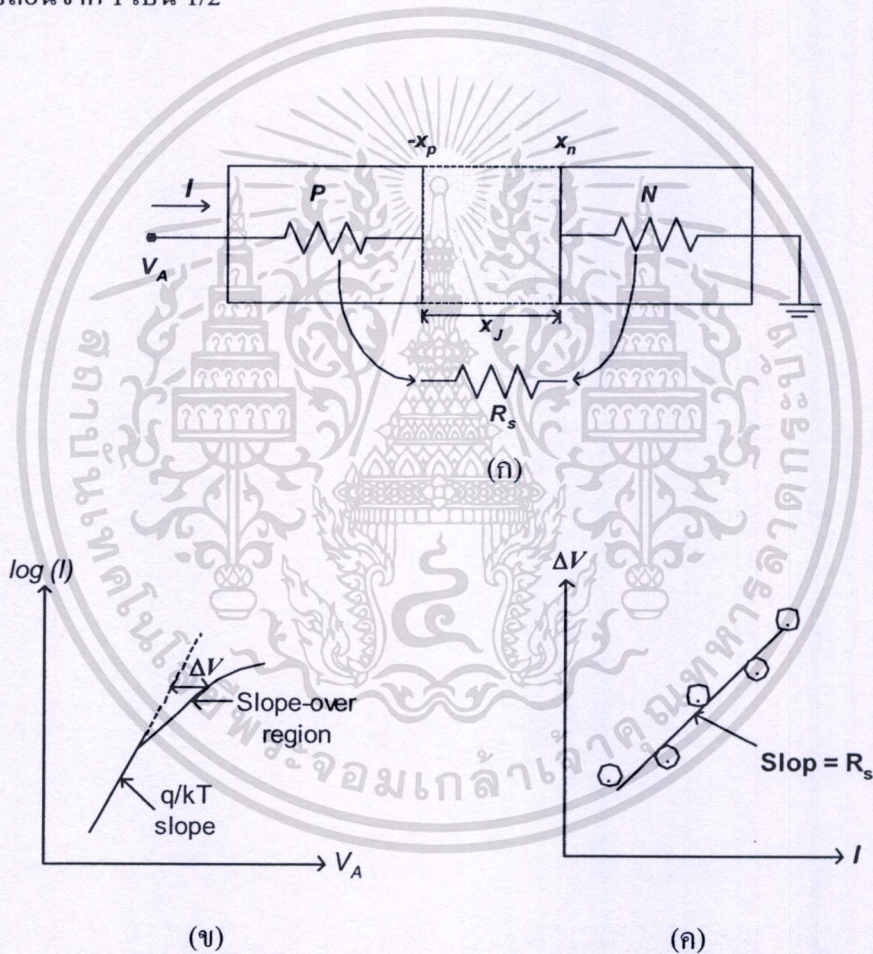
ในทางปฏิบัติ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ $I \propto (\exp(q(V_A - IR_S) / 2kT))$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ได้(2.38) ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของรอยต่อ $p^+ - n$ อาจประมาณได้ว่า

$$I_{high} = \frac{2AqD_p n_i}{L_p} \cdot \exp(qV_j / 2kT) \tag{2.39}$$

โดยที่ $V_j = V_A - IR_S$ และ R_S คือความต้านทานรวมของบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้าของไดโอด จากรูปที่ 2.13 (ข) และสมการที่ 2.39 จะเห็นว่าผลของการฉีดระดับสูง จะทำให้ความชันของกราฟ $I - V$ เปลี่ยนจาก 1 เป็น 1/2



รูปที่ 2.13 (ก) ตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับรอยต่อของไดโอดในกรณีกระแสสูงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม IR_S (ข) ผลของการฉีดระดับสูงในกราฟ $I - V$ และ (ค) กราฟ $\Delta V - I$ ซึ่งแสดงค่าความต้านทานอนุกรม R_S

นอกจากนี้ ผลจากการเพิ่มขึ้นของพาหะส่วนมาก และพาหะส่วนน้อยในด้านอื่น จะทำให้ค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำลดลง แต่ในทางปฏิบัติพบว่า มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ค่าเอกสารกึ่งตัวนำที่ผลิตขึ้นมีค่าสูงมาก และในทางปฏิบัติพบว่า มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมเนื้อสารจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีแรงดันตกคร่อมไดโอดมากขึ้น และเนื่องจากผลของความต้านทานก็จะทำให้อัตราการเพิ่มของกระแสลดลงตามลำดับ ส่งผลให้กระแสไม่ค่อยเพิ่ม เมื่อเราเพิ่มแรงดันต่อไป การแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือทำการสร้างรอยต่อพี-เอ็นให้มีความลึกมากขึ้น และเจือสารในปริมาณความเข้มข้นสูง จะทำให้ความต้านทานรวมลดลง และออกแบบให้อุปกรณ์มีพื้นที่ฐานรองขายน้อยที่สุด หรือการสร้างอุปกรณ์บนชั้นอินทรีนซิก (i-layer) โดยชั้น i ต่ออยู่กับชั้น N+ หรือ P+ โดยให้มีค่ามากกว่าชั้นบริเวณปอดพาหะไม่มากทำให้ลดความต้านทานรวมลงได้

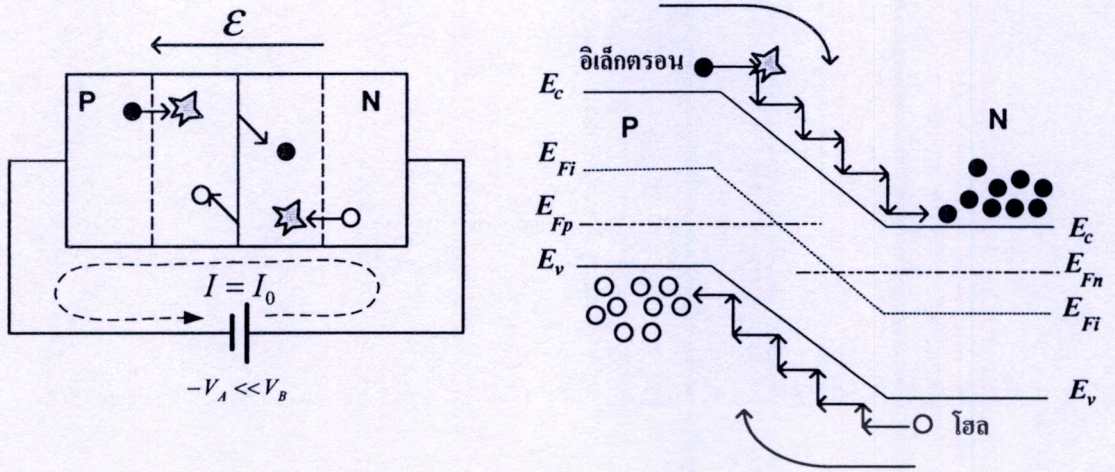
2.3 การพังทลายของรอยต่อ

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับ ไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสส่วนหนึ่งไหลผ่านรอยต่อ ซึ่งเราเรียกว่า “กระแสอิมิตชันกลับ” ดังรูปที่ 2.14 ใช้สัญลักษณ์ I_o หรือ I_R ปริมาณกระแสจะน้อยจนกระทั่งได้รับแรงดันไบอัสที่สูงถึงแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage: V_B) กระแสจะเพิ่มขึ้นมาเรื่อยๆ และรวดเร็ว ค่าแรงดันดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์ “การพังทลายของรอยต่อ (Junction Breakdown)” ซึ่งทำให้ไดโอดเกิดความร้อนและเกิดความเสียหายได้ เมื่อรอยต่อเกิดการพังทลายแล้วตัวไดโอดจะมีความต้านทานน้อยมากเมื่อเพิ่มแรงดันให้กับไดโอด แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะมีค่าเกือบเท่าเดิม จะเพิ่มเฉพาะกระแสเท่านั้น ซึ่งคุณสมบัติในช่วงพังทลายนี้ ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้แก่ ตัวควบคุมแรงดันให้คงที่ (Voltage Regulator) ในเครื่อง Regulated Voltage Supply เป็นต้น

การพังทลายของรอยต่อพี-เอ็น สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการเกิดที่แตกต่างกันได้ 2 ลักษณะ คือการพังทลายแบบอะวอลันซ์ (Avalanche Breakdown) และการพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener Breakdown) ซึ่งรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงการพังทลายแบบอะวอลันซ์เท่านั้น เพราะการพังทลายของอุปกรณ์ไดโอดกำลังจะอธิบายด้วยการพังทลายแบบอะวอลันซ์

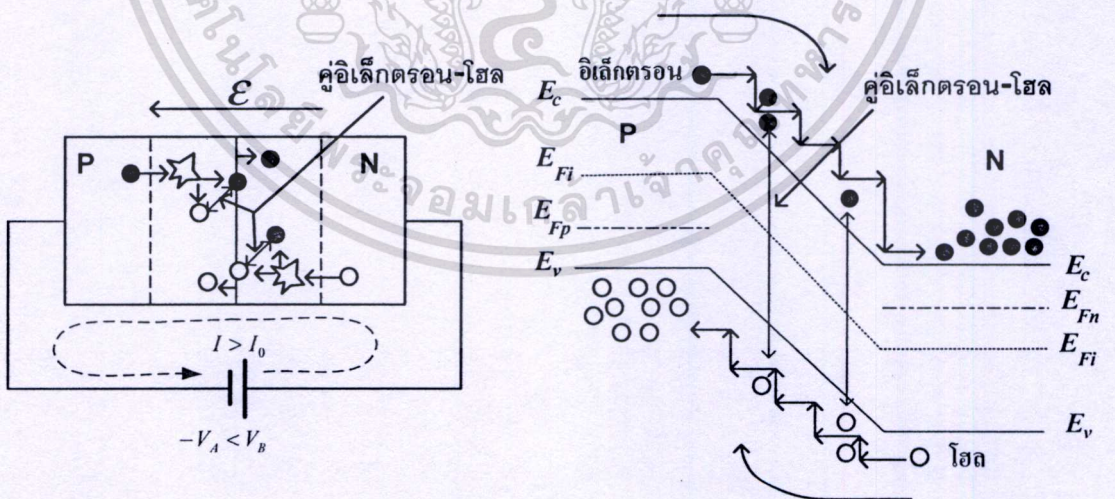
2.3.1 การพังทลายของรอยต่อแบบอะวอลันซ์ (Avalanche Breakdown)

เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าหนึ่งที่น้อยกว่า V_B จะมีกระแสอิมิตชันกลับ ซึ่งเกิดจากพาหะส่วนน้อยไหลผ่านรอยต่อและสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดพลังงานจลน์และเคลื่อนที่ชนกับอะตอมอยู่เสมอ แต่ไม่สามารถทำให้อะตอมกลายเป็นไอออนได้

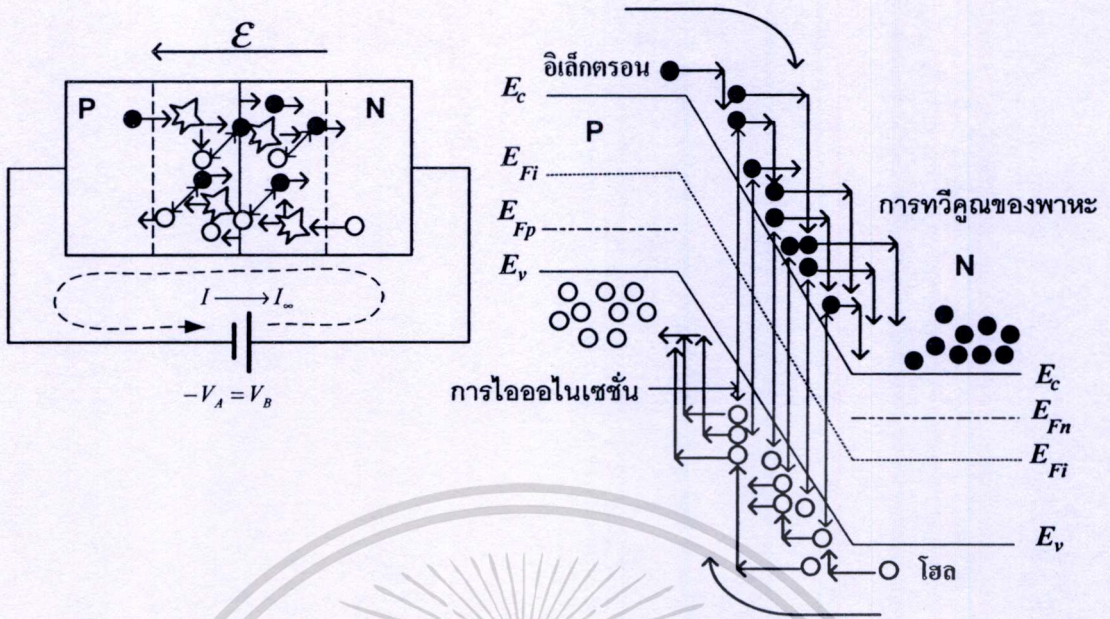


รูปที่ 2.14 การเกิดกระแสอิ่มตัวย้อนกลับจากพาหะส่วนน้อยเมื่อ $-V_A \ll V_B$

แต่เมื่อแรงดันเพิ่มมากขึ้นรอยต่อจะมีสนามไฟฟ้ามากขึ้น พาหะมีพลังงานจลน์มากขึ้นจนกระทั่งทำให้อะตอมเกิดการไอออไนซ์ (Ionize Atoms) หรือการไอออไนเซชัน (ionization) ทำให้ได้คู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole Pairs) อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่เข้าสู่แถบความนำ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การไอออไนซ์เนื่องจากการชน” (Impact Ionization)” ดังรูปที่ 2.15 คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจึงมีพลังงานจลน์สูงพอที่จะทำให้เกิดการไอออไนเซชันอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการทวีคูณของพาหะ



รูปที่ 2.15 รูปจำลองการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล



รูปที่ 2.16 รูปจำลองการเกิดไอออนในเซชันแบบต่อเนื่อง

ทำให้เกิดปริมาณพาหะมากมายและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.16 การเพิ่มขึ้นของพาหะทำให้เกิดกระแสย้อนกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการเพิ่มของกระแสอย่างรวดเร็วเรียกว่า “แรงดันพังทลาย” (Breakdown Voltage) การพังทลายในลักษณะดังกล่าวถูกเรียกว่า “การพังทลายแบบอะวาลันซ์”

การเกิดปรากฏการณ์การพังทลายแบบอะวาลันซ์ จะเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งคือ สนามไฟฟ้าวิกฤติ (Critical Electric Field: \mathcal{E}_{cr}) เมื่อพาหะเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าจะมีพลังงานจลน์มากพอทำให้อะตอมเกิดการไอออนไนซ์และเกิดการพังทลายในที่สุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณรอยต่อ ที่ $x=0$ ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันย้อนกลับ $-V_A$ จะได้ว่า [2]

$$\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}_0 = - \left[\frac{2q}{\epsilon} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) (V_{bi} + V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

ขณะที่เกิดการพังทลาย แรงดันไบอัสในขณะนี้คือ

$$V_{bi} + V_A \approx V_A = V_B \quad (2.41)$$

เมื่อยกกำลังสองค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติจะได้

$$(\mathcal{E}_{max})^2 = (\mathcal{E}_{cr})^2 = - \left[\frac{2q}{\epsilon} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) (V_B) \right] \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาตรีขึ้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ \mathcal{E}_{cr} ต้องมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นพิจารณาได้ว่า

$$V_B \propto \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \quad (2.43)$$

และในกรณีการสร้างรอยต่อชั้นบันไดแบบไม่สมมาตร

กรณี $p^+ - n$ ซึ่ง $N_A \gg N_D$ จะได้

$$V_B \propto \frac{1}{N_D} \quad (2.44)$$

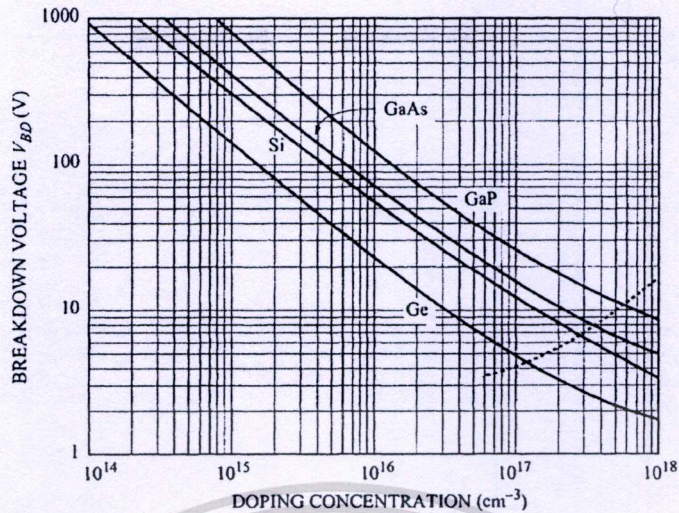
กรณี $n^+ - p$ ซึ่ง $N_D \gg N_A$ จะได้

$$V_B \propto \frac{1}{N_A} \quad (2.45)$$

ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า

$$V_B \propto \frac{1}{N_B} \quad (2.46)$$

โดยที่ N_B คือค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือจันที่มีความเข้มข้นต่ำหรือด้านที่เจือจาง ดังนั้นพบว่าถ้า N_B มีความเข้มข้นสารเจือสูงขึ้น จะทำให้รอยต่อสามารถทนแรงดันได้น้อยลงหรือมีค่า V_B น้อยลงนั่นเอง นอกจากนี้ V_B จะขึ้นอยู่กับ N_B แล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงาน (E_g) ของธาตุแต่ละชนิด แสดงดังรูปที่ 2.17 [12]



รูปที่ 2.17 ค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นแบบจันันโด $p^+ - n$ และ $n^+ - p$ ของเยอรมันเนียม (Ge) ซิลิคอน (Si) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และแกลเลียมฟอสเฟส (GaP) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือในด้านที่มีความหนาแน่นสารเจือต่ำ โดยการพังทลายแบบอะวาลันซ์ ที่อุณหภูมิ $T=300\text{K}$

จากรูปที่ 2.17 จะพบว่าแรงดันพังทลายจะมีค่าไม่กี่โวลต์จนถึงหลายพันโวลต์ โดยการกำหนดความเข้มข้นสารเจือของ N_B และจากผลการทดลองจะได้ว่า

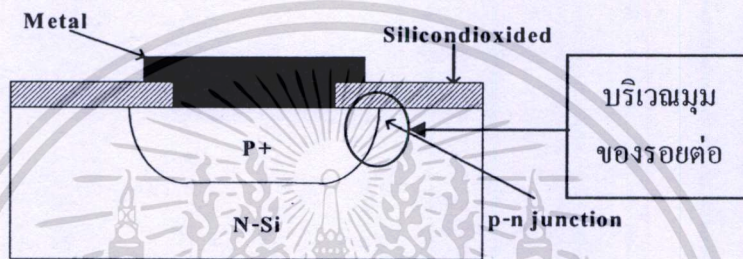
$$V_B \propto \frac{1}{(N_B)^{0.75}} \quad (2.47)$$

จากรูปยังพบอีกว่า สารกึ่งตัวนำที่มี E_g มากกว่าจะค่าแรงดันพังทลายที่สูงกว่า เนื่องจากพลังงานที่จะทำให้เกิดการไอออไนซ์ของอะตอมที่มี E_g สูงกว่า จะมีค่ามากกว่าสารที่มี E_g ต่ำกว่า การสร้างไดโอดบนเทคโนโลยีการผลิตชิปด้วยสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเป็นฐานรอง การสร้างไดโอดที่สามารถทนแรงดันพังทลายมากกว่า 850 V ได้ ต้องใช้ฐานรองซิลิคอนที่มีความเข้มข้นสารเจือน้อยกว่า $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ เพื่อให้สามารถสร้างไดโอดที่สามารถทนแรงดันพังทลายมากกว่า 850 V

นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นการสั่นของอะตอม (Atomic Vibration) จะมีค่ามากขึ้น ทำให้พาหะอิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับอะตอมมากยิ่งขึ้น พาหะจะมีความเร็วลดลงทำให้มีพลังงานจลน์น้อยลงด้วย ดังนั้นจึงพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_{cr} จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแรงดันพังทลายแบบอะวาลันซ์มีค่าสูงขึ้น ในการสร้างไดโอดไม่ว่าจะเจือสาร โดยวิธีแพร่สารเจือ (Diffusion) หรือ การยิงฝังประจุ (Ion Implantation) โดยผ่านชั้นหน้ากากออกไซด์ (Oxide Mask) จะทำให้โครงสร้างของไดโอดเกิดมีมุมของรอยต่อบริเวณรอบๆ ดังในรูปที่ 2.18 ซึ่งเมื่อรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเข้าถึงอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับแรงดันย้อนกลับ บริเวณมุมเหล่านี้ จะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่อื่นๆ และจะมีผลทำให้เกิดการพังทลายได้เร็วกว่าเดิมหรือมีแรงดันพังทลายลดลงนั่นเอง และผลดังกล่าวถูกเรียกว่า “ผลของความโค้ง (Curvature Effect)” ผลของความโค้งดังกล่าวจะทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณมุมมากกว่าปกติ ส่งผลให้เกิดการพังทลายของรอยต่อพีเอ็นที่มุมดังกล่าว หรือเกิดการพังทลายได้เร็วขึ้น สามารถลดความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวได้หลายวิธี เช่นการสร้างโพลต์ดิ่งพีวล์ริง การสร้าง Field Oxide ล้อมรอบรอยต่อพีเอ็น และการสร้างมุมระหว่างรอยต่อมากกว่า 90 องศา เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาผลของโพลต์ดิ่งพีวล์ริงต่อค่าแรงดันพังทลาย



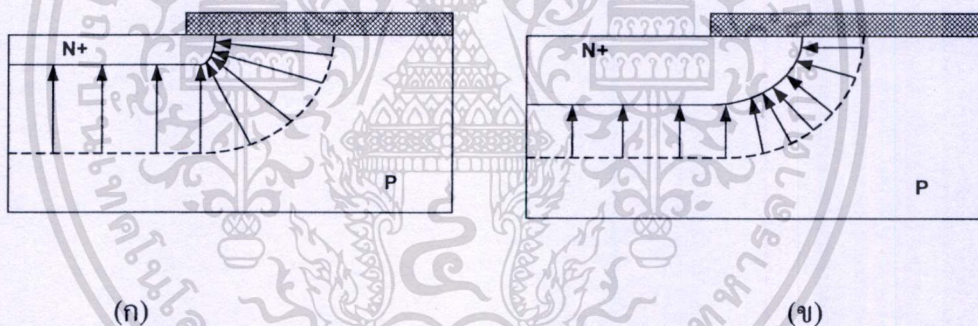
รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างของไดโอด ซึ่งมีมุมหรือส่วนโค้ง ส่งผลให้เกิดผลของ Curvature Effect ทำให้แรงดันพังทลายมีค่าต่ำกว่าปกติ

2.4 ส่วนต่างๆ ที่ทำให้เกิดการพังทลาย (Edge Terminations)

การวิเคราะห์หรือรอยต่อในแนวระนาบสำหรับแรงดันพังทลายของอุปกรณ์กำลัง แรงดันพังทลายสามารถเพิ่มได้ โดยการลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าของแต่ละตำแหน่งใน โครงสร้างของอุปกรณ์ หรือที่ขอบของอุปกรณ์นั้นๆ บริเวณขอบได้ถูกใช้อธิบายปรากฏการณ์พังทลายของอุปกรณ์ โดยแบ่งได้เป็นสองบริเวณคือบริเวณขอบในแนวระนาบ (Planar Terminations) ซึ่งขึ้นอยู่กับการแพร์ของสารเจือในกระบวนการผลิต และบริเวณมุม (Beveled Terminations) ซึ่งขึ้นอยู่กับการเลือกวัสดุที่ใช้บริเวณใกล้ๆ รอยต่อ ทั้งสองบริเวณสามารถเพิ่มแรงดันพังทลายได้โดยการสร้างโพลต์ดิ่งพีวล์ริง (Floating Field Ring: FFR) หรือ Floating Limited Ring (FLR) การออกแบบบริเวณเหล่านี้สามารถอธิบายโดยการคำนวณแบบ 2 มิติ (Two-Dimensional Numerical Analysis) ได้ อย่างไรก็ตามการตามปรากฏการณ์ทางกายภาพของกลไกการตอบสนองต่อข้อจำกัดของแรงดันพังทลายจะถูกอธิบายและแสดงในบทนี้ภายใต้การประมาณแบบง่าย ๆ [15]

2.4.1 ส่วนรอยต่อในแนวระนาบ (Planar Junction Terminations)

เทคโนโลยีการแพร่ในแนวระนาบถูกใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการสร้างอุปกรณ์กำลังและวงจรรวม ซึ่งการแพร่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารเจือที่แพร่เข้าสู่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ โดยทั่วไปใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากป้องกันหรือเรียกว่า “มาสก์” (Mask) หรือในกรณีที่ยังฝังประจุสามารถใช้น้ำยาไวแสงเป็นหน้ากากป้องกันได้อีกอย่างหนึ่ง รอยต่อคือบริเวณที่สารเจือแพร่เข้าสู่สารกึ่งตัวนำ รอยต่อด้านข้างนับจากบริเวณเปิดของมาสก์ไปจนถึงสิ้นสุดการแพร่เข้าสู่สารกึ่งตัวนำบริเวณผิว การแพร่ด้านข้างปกติคิดเป็น 85% ของการแพร่ในแนวตั้ง เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายจะให้การแพร่ด้านข้างเท่ากับการแพร่ในแนวตั้ง เมื่อการแพร่เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้จะเกิดมุมทั้งหมดสี่มุมดังภาพตัดขวางรอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.19 ภาพตัดขวางแสดงกรณีเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ บริเวณปลอดพาหะจะครอบคลุมรอยต่อแสดงดั่งเส้นประ (Dashed Line) ภายในบริเวณของรอยต่อจะมีเส้นสนามไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอ แรงดันพังทลายของรอยต่อในแนวระนาบจะเกิดขึ้นในบริเวณมุมดังกล่าว อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของเส้นสนามไฟฟ้าที่ขอบแสดงดังรูป 2.20

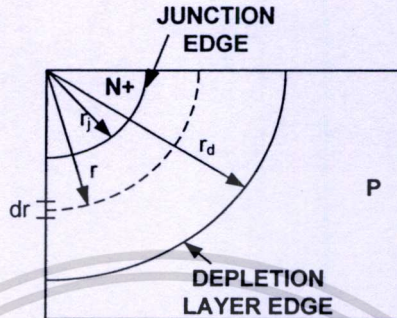


รูปที่ 2.19 ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสำหรับ (ก) รอยตื้น (Shallow Junction) (ข) รอยตื้นลึกจากการแพร่ในแนวระนาบ

ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าไม่เป็นผลดีในกรณีความลึกของรอยตื้น เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาบริเวณปลอดพาหะหรือความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าเท่ากัน ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงดันพังทลายลดลง ในกรณีรอยต่อในแนวระนาบจากที่กล่าวมาสรุปได้ว่า ลักษณะรูปร่างมุมในการแพร่บริเวณเปิดมาสก์ และความลึกของรอยต่อมีผลต่อค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อหรืออุปกรณ์ไดโอด

2.4.2 รอยต่อทรงกระบอก (Cylindrical Junction)

ภาพตัดขวางของรอยต่อทรงกระบอกแสดงดังรูป 2.20 รอยต่อทรงกระบอกมีความลึก r_j และบริเวณปลอดพาหะที่แผ่กว้างเข้าไปด้านสารเจือความเข้มข้นน้อยหรือสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีรัศมี r_d



รูปที่ 2.20 ภาพตัดขวางของรอยต่อทรงกระบอก

วิธีการหาสมการแรงดันฟังก์ชันโดยใช้ Poisson's equation มีสมการคือ

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rE) = -\frac{Q(r)}{\epsilon_s} = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \quad (2.48)$$

โดยการกระจายตัวของค่าฟังก์ชันไฟฟ้า (Potential distribution) มีค่า $V(r)$ และการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (Electric Field Distribution) มีค่า $E(r)$ และเวกเตอร์รัศมี r ในบริเวณปลอดพาหะ เมื่อทำการอินทิเกรตสมการภายใต้เงื่อนไขที่สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่ขอบบริเวณปลอดพาหะซึ่งมีค่าเท่ากับ r_d จะได้สนามไฟฟ้าที่รัศมี r เท่ากับ

$$E(r) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} \left(\frac{r_d^2 - r^2}{r} \right) \quad (2.49)$$

ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อเมทัลลurgical Junction) มีค่ารัศมี r_j หาได้จาก

$$E_m(r_j) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} \left(\frac{r_d^2 - r_j^2}{r_j} \right) \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าสำหรับรอยต่อทรงกระบอก สามารถเปรียบเทียบกับรอยต่อแนวระนาบ โดยพิจารณาจากความลึกของรอยต่อมีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับความหนาบริเวณปลอดพาหะ มีค่าดังสมการที่ 2.51

$$E_{m,CYL}(r_j) \approx \frac{qN_A r_d^2}{2\epsilon_s r_j} \quad (2.51)$$

สำหรับแนวระนาบสามารถหาได้โดยใช้รัศมี r_d มีความกว้างคล้ายกับความหนาของบริเวณปลอดพาหะคือ

$$E_{m,PP} = \frac{qN_A}{\epsilon_s} r_d \quad (2.52)$$

ทำการหาอัตราส่วนของทั้งสองสมการจะได้

$$\frac{E_{m,CYL}}{E_{m,PP}} \approx \frac{r_d}{2r_j} \quad (2.53)$$

สมการนี้ใช้ในการแสดงรอยต่อที่มีความดัน r_j ภายในรัศมีของมุม r_d ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่ส่วนรอยต่อทรงกระบอกจะมีค่ามากกว่ารอยต่อแนวระนาบ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าความลึกของรอยต่อมีค่า $1 \mu\text{m}$ และความหนาบริเวณปลอดพาหะมีค่า $50 \mu\text{m}$ ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่ขอบรอยต่อทรงกระบอกมีค่า 25 เท่า มากกว่ารอยต่อในแนวระนาบ ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อทรงกระบอกส่งผลให้เกิดการพังทลายแบบอะวาลันซ์จะเริ่มเกิดที่ขอบบริเวณเปิดมาส์ก เพราะสัมประสิทธิ์การชนของไอออนมีผลอย่างมากกับฟังก์ชันสนามไฟฟ้า

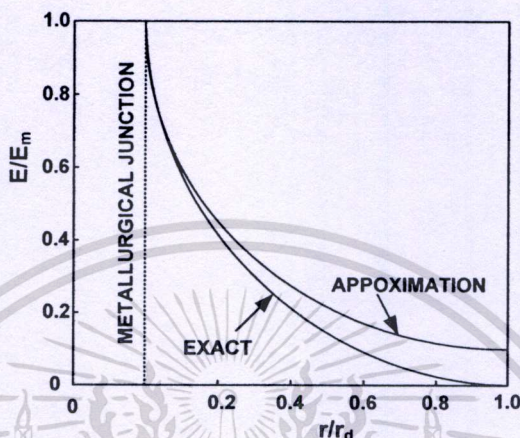
การกระจายของแรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อทรงกระบอกสามารถอธิบายโดยการอินทิเกรตการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าคือ

$$V(r) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} \left[\left(\frac{r_j^2 - r^2}{2} \right) + r_d^2 \ln \left(\frac{r}{r_j} \right) \right] \quad (2.54)$$

โดยใช้เงื่อนไขที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ที่บริเวณขอบด้านที่มีปริมาณสารเจือสูงหรือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N^+) และมีค่า $V(r)$ ที่ด้านบริเวณความเข้มข้นสารเจือต่ำของรอยต่อ บริเวณปลอดพาหะนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะกว้าง r_d ดังที่แสดงไปแล้ว ในการหาสมการสำหรับแรงดันพังทลายโดยการอินทิเกรตสมการ (2.49) จะได้

$$E(r) \approx \frac{q N_A r_d^2}{2 \epsilon_s r} = \frac{K}{r} \quad (2.55)$$



รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบการประมาณแบบไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic Approximation) และการกระจายตัวสนามไฟฟ้าที่แท้จริงสำหรับรอยต่อทรงกระบอก

การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าแบบไฮเพอร์โบลิกแสดงดังสมการ (2.55) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการกระจายตัวแบบแท้จริงตามสมการ (2.49) แสดงในรูปที่ 2.21 แสดงกรณีที่ $r_j = 0.1r_d$ โดยการสมมติให้การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบริเวณความเข้มสูงมีความสม่ำเสมอทั้งบริเวณ อย่างไรก็ตามการกระจายแบบไฮเพอร์โบลิกมีนัยสำคัญที่จะทำให้สนามไฟฟ้าแผ่กว้างเป็นอนันต์ ดังนั้นจะต้องหาค่าจาก r_j ถึงอนันต์ เมื่อใช้การประมาณค่าการกระจายแบบไฮเพอร์โบลิกกับค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัวของไอออน (Ionization Coefficients) สมการสำหรับวิเคราะห์แรงดันพังทลายของรอยต่อทรงกระบอกคือ

$$K = \left(\frac{6r_j^6}{1.85 \times 10^{-35}} \right)^{1/7} \quad (2.56)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัวของไอออนที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สมการแรงดันพังทลายของอุปกรณ์คือ $\alpha = 1.85 \times 10^{-35} E^7$ เมื่อแทนค่าสมการ (2.56) ในสมการ (2.55) จะได้ค่า r_d^2 และนำค่า r_d^2 แทนในสมการ (2.50) ค่าสูงสุดสนามไฟฟ้าจะแสดงถึงสนามไฟฟ้าวิกฤต (Critical Electric Filed) ที่เกิดการพังทลายสำหรับรอยต่อทรงกระบอกคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{c,CYL} = \left(\frac{3.25 \times 10^{35}}{r_j} \right)^{1/7} \quad (2.57)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดการพังทลายสำหรับรอยต่อทรงกระบอก และสำหรับกรณีแนวระนาบ สามารถอธิบายได้โดยการหาอัตราส่วนของสมการ (2.57) และสมการ สนามไฟฟ้าวิกฤตในแนวระนาบโดยมีค่าเท่ากับ $E_{c,PP} = 4010 N_A^{1/8}$ กับความกว้างสนามไฟฟ้าวิกฤต $E_{c,PP} = 2.67 \times 10^{10} N_A^{-7/8}$ เพื่อกำจัดตัวแปร N_A ได้สมการคือ

$$\frac{E_{c,CYL}}{E_{c,PP}} = \left(\frac{3W_{c,PP}}{4r_j} \right)^{1/7} \quad (2.58)$$

เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ สามารถหาค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อทรงกระบอก โดยพิจารณาในแนวระนาบและไม่คิดค่าความเข้มข้นสารเจือ (N_A) สามารถอธิบายแรงดันพังทลายในเทอมของอัตราส่วนระหว่างรัศมีความโค้ง r_j และความกว้างบริเวณปลอดพาหะในแนวระนาบ W_c โดยมีสมการคือ

$$\frac{BV_{CYL}}{BV_{PP}} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{r_j}{W_c} \right)^2 + 2 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} \right] \ln \left[1 + 2 \left(\frac{W_c}{r_j} \right)^{8/7} \right] - \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} \quad (2.59)$$

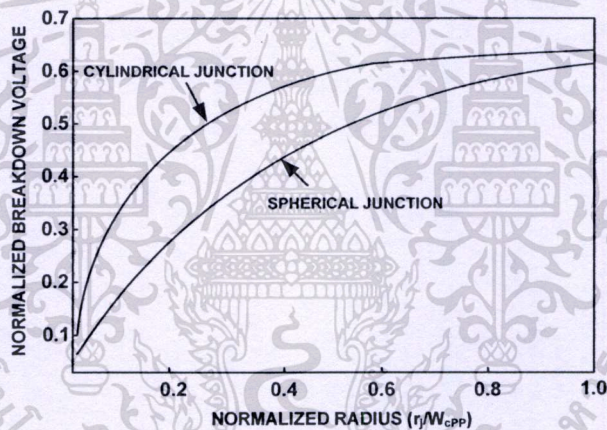
แรงดันพังทลายของรอยต่อทรงกระบอกแสดงดังกราฟรูปที่ 2.22 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของรัศมีความโค้ง r_j และความกว้างบริเวณปลอดพาหะในแนวระนาบ W_c จากกราฟพบว่าแรงดันพังทลายเพิ่มมากขึ้นเมื่อรัศมีความโค้งเพิ่มขึ้น [16] ซึ่งได้แสดงความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าที่ผ่านมาดังรูปที่ 2.19 ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวการสร้างรอยต่อแบบตื้น (Shallow Junction) สามารถสร้างบนฐานรองที่มีความเข้มข้นสารเจือสูงได้ การออกแบบดังกล่าวทำให้อุปกรณ์ทนแรงดันพังทลายได้น้อยลง ยกตัวอย่างเช่น ความลึกของรอยต่อ 3 μm ความเข้มข้นฐานรอง $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (ความหนาบริเวณปลอดพาหะที่พังทลายมีค่า 20 μm) มีค่าแรงดันพังทลายประมาณ 0.4 โวลต์ แต่เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นฐานรองเป็น $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (ความหนาบริเวณปลอดพาหะที่พังทลายมีค่า 60 μm) ค่าแรงดันพังทลายลดลงเหลือประมาณ 0.25 โวลต์ ผลของรอยต่อทรงกระบอกมีผลต่อค่าแรงดันพังทลายประมาณ 50% ด้วยเหตุผลนี้จึงมีการเพิ่ม FFR เพื่อลดปัญหาดังกล่าว ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ออกแบบอุปกรณ์ไดโอดโครงสร้างแบบมี FFR เพื่อศึกษาผลของจำนวน FFR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวางโลหะพิวต์เฟลตบน FFR ต่อค่าแรงดันพังทลายและกระแสรั่วเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ระยะห่างของ FFR กับรอยต่อหลัก และรูปทรงการสร้างอุปกรณ์ เพื่อศึกษาแรงดันพังทลายและกระแสรั่วของไดโอดกำลัง

2.4.3 รอยต่อทรงกลม (Spherical Junction)

ภาพตัดขวางรอยต่อทรงกลมบริเวณมุมการแพร่สารเจือจากบริเวณเปิดมาส์ก ในการสร้างรอยต่อในแนวระนาบ เช่นเดียวกับรอยต่อทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2.20 กรณีการเจือสารความเข้มข้นสูงในบริเวณการแพร่ของรอยต่อ และความสม่ำเสมอของบริเวณสารเจือน้อย (Lightly Doped Side) ของรอยต่อ อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่ารอยต่อทรงกระบอก เพราะว่าเส้นสนามไฟฟ้ามีทั้งหมด 3 มิติ ในกรณีของรอยต่อทรงกลม ขณะที่รอยต่อทรงกระบอกมีเพียง 2 มิติเท่านั้น



รูปที่ 2.22 ค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อทรงกลม (Spherical Junction) และรอยต่อทรงกระบอก (Cylindrical Junction)

พิจารณารอยต่อทรงกลมที่มีความลึก r_j และรัศมีการแผ่กว้างบริเวณความเข้มข้นสารเจือต่ำ r_d ในการหาสมการแรงดันพังทลายจำเป็นต้องใช้ Poisson's equation คือ

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = -\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 E) = -\frac{Q(r)}{\epsilon_s} = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \quad (2.60)$$

อินทิเกรตสมการ (2.60) โดยให้เงื่อนไขขอบเขตสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region Boundary) หรือที่ค่ารัศมี r_d ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E(r) = \frac{qN_A}{3\epsilon_s} \left(\frac{r_d^3 - r^3}{r^2} \right) \quad (2.61)$$

ค่าสูงสุดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อเมทัลลเจจิคัล r_j คือ

$$E_m(r_j) = \frac{qN_A}{3\epsilon_s} \left(\frac{r_d^3 - r_j^3}{r_j^2} \right) \quad (2.62)$$

สำหรับรัศมีของมุม r_j และความเข้มข้นสารเจือของฐานรอง N_A ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าสำหรับรอยต่อทรงกลมมีค่ามากกว่ารอยต่อทรงกระบอก ค่าสนามไฟฟ้านี้แสดงให้เห็นโดยพิจารณากรณีของความลึกรอยต่อมีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับความหนาบริเวณปลอดพาหะคือ

$$E_{m,SP}(r_j) \approx \frac{q N_A r_d^3}{3 \epsilon_s r_j^2} \quad (2.63)$$

เมื่อทำการหาอัตราส่วนระหว่างสมการ (2.63) และ (2.51) ได้

$$\frac{E_{m,SP}}{E_{m,CYL}} \approx \frac{2r_d}{3r_j} \quad (2.64)$$

สมการนี้แสดงสำหรับรอยต่อตันๆ ที่มีรัศมีของมุมน้อยๆ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดของรอยต่อทรงกลมจากบริเวณมุมมีค่ามากกว่ารอยต่อทรงกระบอกที่บริเวณเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ความลึกของรอยต่อ $1 \mu\text{m}$ และความหนาบริเวณปลอดพาหะ $50 \mu\text{m}$ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดบริเวณมุมทรงกลมมีค่า 33 เท่าของทรงกระบอก ค่าสนามไฟฟ้าสูงที่มุมทรงกลมจะทำให้เกิดการพังทลายแบบอะวาลันซ์ (Avalanche Breakdown) โดยเริ่มจากมุมที่เกิดการแพร่บริเวณเปิด (มาส์ก) เพราะสัมประสิทธิ์การชนของไอออนเป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าโดยตรง

การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อทรงกลม สามารถอธิบายโดยการอินทิเกรตการกระจายตัวสนามไฟฟ้าคือ

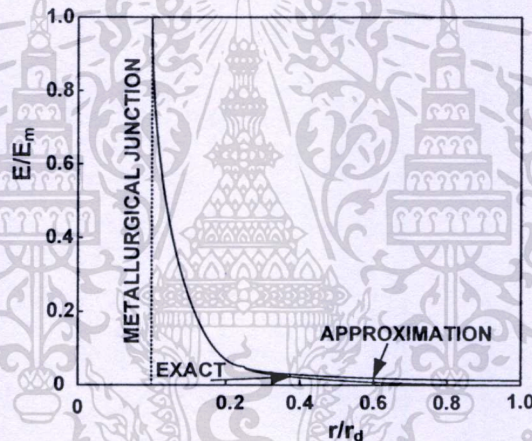
$$V(r) = \frac{q N_A}{3 \epsilon_s} \left[\left(\frac{r_j^2 - r^2}{2} \right) + r_d^3 \left(\frac{1}{r_j} - \frac{1}{r} \right) \right] \quad (2.65)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้เงื่อนไขที่ขอบเขตศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ในด้านสารเจือสูงที่ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ r_d ในการหาสมการแรงดันพังทลายจากการชนของไอออน สามารถหาได้จากการกระจายตัวสนามไฟฟ้าดังสมการ (2.61) การวิเคราะห์สมการสำหรับการรวมตัวของอนุชนกันของไอออน สามารถหาได้โดยการสมมติให้สนามไฟฟ้ามีลักษณะการกระจายเป็นรูปสี่เหลี่ยมได้

$$E(r) \approx \frac{qN_A r_d^3}{3\epsilon_s r^2} = \frac{K_s}{r^2} \quad (2.66)$$

การกระจายตัวสนามไฟฟ้าในสมการ (2.66) ถูกเปรียบเทียบกับกรกระจายตัวสนามไฟฟ้าที่แท้จริงดังสมการที่ (2.61) สำหรับกรณีที่ $r_j = 0.1r_d$ แสดงดังในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การเปรียบเทียบระหว่างการประมาณ (Approximation) และการเกิดขึ้นจริงอย่างถูกต้อง (Actual) ของการกระจายตัวสนามไฟฟ้าสำหรับรอยต่อทรงกลม

การกระจายตัวของทั้งสองกรณีมีลักษณะคล้ายกันที่บริเวณสนามไฟฟ้าสูงสุดที่รอยต่อเมทัลลोजิตลหรือรัศมี r_j อย่างไรก็ตามการกระจายตัวในสมการ (2.66) โดยสนามไฟฟ้าแผ่กว้างเป็นระยะอนันต์ ด้วยเหตุนี้การแตกตัวของไอออนจะสามารถหาได้จาก r_j ถึงอนันต์ เมื่อใช้การประมาณการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่สัมพันธ์การแตกตัวของไอออน ดังสมการสัมพันธ์การแตกตัวคือ $\alpha = 1.8 \times 10^{-35} E^7$ วิธีการหาความหนาบริเวณปลอดพาหะที่รัศมี r_d ที่เงื่อนไขการพังทลายของรอยต่อทรงกลมดังถูกอธิบายมาแล้ว ทำได้โดยการแทนสัมพันธ์การแตกตัวในสมการ (2.61) เพื่อหาค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้า การหาค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้เกิดการพังทลายสำหรับรอยต่อทรงกลมคือ

$$E_{c,SP} = \left(\frac{7 \times 10^{35}}{r_j} \right)^{1/7} \quad (2.67)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดสนามไฟฟ้าที่เกิดการพังทลายสำหรับรอยต่อทรงกลมที่กรณีแนวระนาบ สามารถหาได้โดยอัตราส่วนของสมการ (2.67) กับสมการสนามไฟฟ้าวิกฤต $E_{c,PP} = 4010 N_A^{1/8}$ ที่สมการ $W_{c,PP} = 2.67 \times 10^{10} N_A^{-7/8}$ เพื่อกำจัด N_A คือ

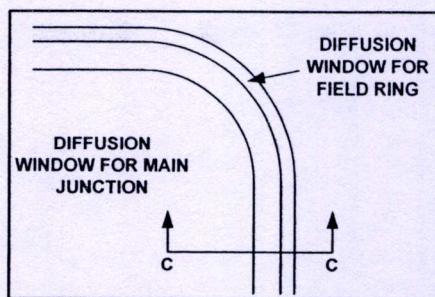
$$\frac{E_{c,SP}}{E_{c,PP}} = \left(\frac{13 W_{c,PP}}{8 r_j} \right)^{1/7} \quad (2.68)$$

เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ สามารถหาค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อทรงกลม โดยพิจารณาในแนวระนาบและไม่คิดค่าความเข้มข้นสารเจือ (N_A) สามารถอธิบายแรงดันพังทลายในเทอมของอัตราส่วนระหว่างรัศมีความโค้ง (r_j) และความกว้างบริเวณปลอดภัยในแนวระนาบ (W_c) โดยมีสมการคือ

$$\frac{BV_{SP}}{BV_{PP}} = \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^2 + 2.14 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} - \left[\left(\frac{r_j}{W_c} \right)^3 + 3 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{13/7} \right]^{2/3} \quad (2.69)$$

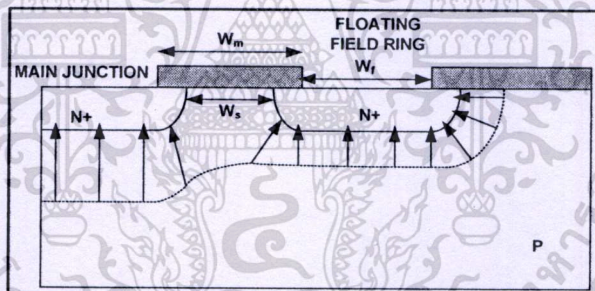
2.5 โฟลตติ้งฟิลด์ริง (Floating Field Ring: FFR)

ก่อนหน้านี้ได้กล่าวถึงการสร้างอุปกรณ์กำลังโดยใช้โครงสร้างรอยต่อแบบตันในแนวระนาบที่มีแรงดันพังทลายต่ำกว่าความสามารถที่ทนได้ของบริเวณสารเจือความเข้มข้นต่ำหรือบริเวณปลอดภัย การพังทลายดังกล่าวเกิดขึ้นจากความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อทรงกระบอก การลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณนั้น สามารถทำได้โดยการวางโฟลตติ้งฟิลด์ริง (Floating Field Ring: FFR) เพราะส่วนของ FFR แต่ละอัน จะเกี่ยวข้องกับการลดลงของสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ ถ้าไม่มี FFR ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันไบอัสจะตกคร่อมรอยต่อหลัก (Main Junction) เพียงอย่างเดียว เมื่อ FFR ถูกวางในความกว้างบริเวณปลอดภัยที่เกิดมาจากรอยต่อหลัก ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนในแนวราบ ซึ่งสามารถลดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อทรงกระบอกได้



รูปที่ 2.24 ภาพด้านบนของบริเวณการแพร่ที่ใช้ในการสร้างรอยต่อและโพลตึงฟิวลิ่ง

ปกติแล้วความลึกของ FFR สามารถที่จะสร้างให้ลึกกว่าหรือตื้นกว่าความลึกรอยต่อหลักได้ แต่อย่างไรก็ตามปกติการสร้าง FFR จะสร้างพร้อมกับรอยต่อหลัก โดยการแพร่ล้อมรอบรอยต่อหลักดังแสดงในรูปที่ 2.24 การสร้าง FFR พยายามที่จะไม่เพิ่มกระบวนการสร้าง เพราะรักษาความสม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักและ FFR สร้างในพื้นที่ที่ล้อมรอบรอยต่อหลัก ภาพตัดขวางของอุปกรณ์แต่ละส่วนแสดงดังรูปที่ 2.25 พร้อมกับเส้นสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าในรูปที่ 2.19 สำหรับรอยต่อทรงกระบอก ถูกทำให้ลดลงโดยการสร้าง FFR



รูปที่ 2.25 ภาพตัดขวางของแต่ละส่วน โดยมี FFR เพียงอันเดียว

ศักย์ไฟฟ้าบริเวณ FFR เกี่ยวข้องกับแรงดันไบอัสที่รอยต่อหลัก โดยทำการสมมุติว่า FFR ไม่เกี่ยวข้องกับการแผ่กว้างของบริเวณปลอดพาหะจากรอยต่อหลัก ภายใต้ข้อสมมุตินี้การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าบริเวณนี้ในสมการ การกระจายตัวศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ $V(x) = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \left(Wx - \frac{x^2}{2} \right)$ สำหรับกรณีที่ระยะห่างของ FFR กับรอยต่อหลักมีค่า W_s และความหนาบริเวณปลอดพาหะมีค่า W_d ศักย์ไฟฟ้าที่ FFR คือ

$$V_{FFR} = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \left(W_d W_s - \frac{W_s^2}{2} \right) \quad (2.70)$$

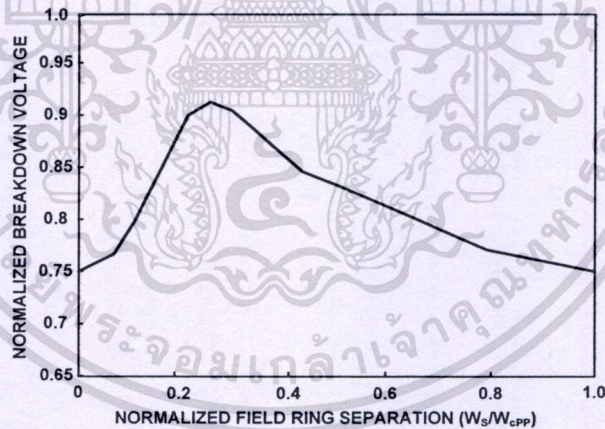
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรวมสมการ (2.70) กับสมการความหนาบริเวณปลดพาหะ $W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_a}{qN_A}}$ และ W_d โดยป้อนแรงดันไบอัส V_a ได้

$$V_{FFR} = \sqrt{\frac{2qN_A}{\epsilon_s} W_S^2 V_a} + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} W_S^2 \quad (2.71)$$

จากสมการพบว่าศักย์ไฟฟ้าของ FFR แปรผันแบบสแควร์รูทกับแรงดันไบอัสที่รอยต่อหลัก

แม้ว่า FFR สามารถช่วยเพิ่มการทนแรงดันพังทลายของรอยต่อทรงกระบอกได้ แต่จะขึ้นอยู่กับระยะห่างที่เหมาะสมจากรอยต่อหลัก ถ้า FFR อยู่ห่างจากรอยต่อหลักมากเกินไปบริเวณปลดพาหะจะไม่ถูกเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการพังทลายที่รอยต่อทรงกระบอก แต่ถ้าอยู่ใกล้มากเกินไปก็จะเกิดศักย์ไฟฟ้าที่ FFR เพียงอย่างเดียว ทำให้ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสูงที่ FFR ด้วยเหตุนี้เองแรงดันพังทลายจะถูกจำกัด โดยความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสูงที่รอยต่อ FFR ค่าแรงดันพังทลายสูงสุดจะมีค่าตอบสนองต่อค่าตำแหน่งการวางของ FFR ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ผลของตำแหน่ง FFR ที่มีผลต่อค่าแรงดันพังทลาย

การวิเคราะห์สมการแรงดันพังทลายสำหรับรอยต่อทรงกระบอกที่มี FFR หนึ่งอัน สามารถอธิบายภายใต้ข้อสมมุติที่ว่า 1) ค่าสนามไฟฟ้าของแต่ละ FFR มีค่าเท่ากับค่าสนามไฟฟ้าในรอยต่อทรงกระบอก 2) ภายใต้เงื่อนไขการพังทลายสนามไฟฟ้าแต่ละแห่งของ FFR มีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าวิกฤตสำหรับรอยต่อทรงกระบอก 3) สนามไฟฟ้าที่รอยต่อหลักสิ้นสุดโดยความต่างของ

แรงดันไฟฟ้าระหว่างสัณฐานไฟฟ้าของรอยต่อหลักกับสัณฐานไฟฟ้าของ FFR ข้อสมมุติที่หนึ่งสัณฐานไฟฟ้าของ FFR ที่แรงดันพังทลาย (V_F) จะมีค่าเท่ากับแรงดันพังทลายที่รอยต่อทรงกระบอกคือ

$$(V_F / BV_{PP}) = (BV_{CY}) / BV_{PP} \quad (2.72)$$

อัตราส่วนทางด้านขวามือ สามารถคำนวณได้โดยสมการ (2.58) ความแตกต่างของแรงดันระหว่างรอยต่อหลักและ FFR เกี่ยวข้องกับสมการ (2.53) คือ

$$(V_M - V_F) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} \left[\left(\frac{W_S^2 - r_d^2}{2} \right) + r_d^2 \ln \left(\frac{r_d}{r_j} \right) \right] \quad (2.73)$$

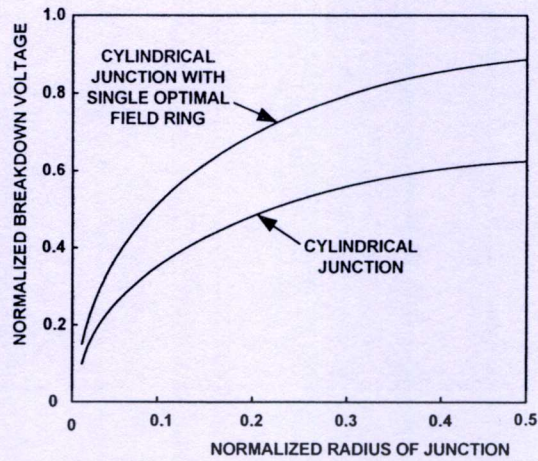
ภายใต้เงื่อนไขสัณฐานไฟฟ้าที่รอยต่อหลัก V_M มีค่าเท่ากับแรงดันพังทลายที่ BV_{FFR} เมื่อนำสมการ (2.49) และ (2.57) และค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อในแนวระนาบมาเปรียบเทียบ จะได้ความสัมพันธ์ของสมการคือ

$$BV_{PP} = \frac{1}{2} E_{cPP} W_c = \frac{qN_A W_c^2}{2\epsilon_s} \quad (2.74)$$

เมื่อรวมกันจะได้

$$\left[\frac{BV_{FFR} - V_F}{BV_{PP}} \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^2 - 0.96 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} + 1.92 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} \ln \left[1.386 \left(\frac{W_c}{r_j} \right)^{4/7} \right] \quad (2.75)$$

เมื่อสัณฐานไฟฟ้าของ FFR ที่แรงดันพังทลายแสดงโดยสมการ (2.72) แรงดันพังทลายที่เหมาะสมของ FFR สามารถคำนวณโดยใช้สมการนี้ได้ ข้อสมมุติที่ทำให้ได้มาซึ่งสมการนี้คือความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน r_j/W_c การเปรียบเทียบค่าของแรงดันพังทลายสำหรับค่าที่เหมาะสมของตำแหน่งการวาง FFR ในรอยต่อทรงกระบอกในรูปที่ 2.27 มีความสำคัญเป็นเครื่องหมายบอกสถานะแรงดันพังทลายที่เหมาะสมสำหรับ FFR หนึ่งอัน เช่น ถ้าความลึกของรอยต่อมีค่า 3 μm และความเข้มข้นฐานรอมมีค่า $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (ความหนาบริเวณปลอดพาหะที่พังทลายมีค่า 20 μm) มีค่าแรงดันพังทลายปกติ 0.75 โวลต์ เทียบได้กับค่า 0.4 โวลต์ ของรอยต่อทรงกระบอก ดังนั้นผลรวมของ FFR ระหว่างอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้สามารถที่จะเพิ่มแรงดันพังทลายให้กับอุปกรณ์ที่สร้างได้ โดยไม่ต้องเพิ่มขั้นตอนในการสร้างแต่อย่างใด



รูปที่ 2.27 การเปรียบเทียบระหว่างแรงดันพังทลายของค่าที่เหมาะสมสำหรับ FFR หนึ่งอัน ออกแบบสำหรับรอยต่อทรงกระบอก

วิธีการเพิ่มแรงดันพังทลายจำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งของ FFR ดังรูปที่ 2.26 ถ้าไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมของระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักและ FFR จะไม่สามารถเพิ่มแรงดันพังทลายได้ การวิเคราะห์สมการสำหรับระยะที่เหมาะสมระหว่างรอยต่อหลักและ FFR สามารถหาได้โดยใช้สมการ (2.73) ให้ระยะห่าง W_S สำหรับกรณีเมื่อ V_F เท่ากับ BV_{CY} และใช้สมการ 2.74 โดยไม่คิด N_A จะได้สมการคือ

$$W_S^2 - 2 \sqrt{\frac{BV_{FFR}}{BV_{PP}}} W_C W_S + \left(\frac{BV_{CY}}{BV_{PP}} \right) W_C^2 = 0 \quad (2.76)$$

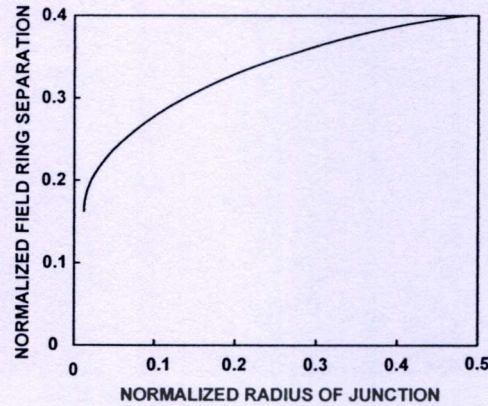
สมการควอดราติก (Quadratic Equation) ได้อธิบายส่วนของแรงดันพังทลายปกติของรอยต่อทรงกระบอกและตำแหน่ง FFR ระยะที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความหนาบริเวณปลดพาหะที่จุด

พังทลายสำหรับรอยต่อในแนวระนาบคือ

$$\frac{W_S}{W_C} = \sqrt{\frac{BV_{FFR}}{BV_{PP}}} - \sqrt{\left(\frac{BV_{FFR}}{BV_{PP}} \right) - \left(\frac{BV_{CY}}{BV_{PP}} \right)} \quad (2.77)$$

การคำนวณค่าที่เหมาะสมของตำแหน่ง FFR ถูกแสดงโดยใช้ค่าของอัตราส่วน r_j/W_C กราฟระยะห่างที่เหมาะสมของ FFR แสดงดังรูปที่ 2.28 โดยแสดงฟังก์ชันของ r_j/W_C

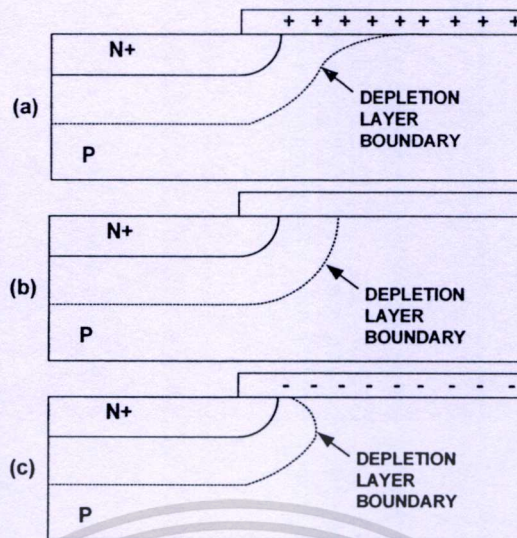
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 ระยะที่เหมาะสมของ FFR สำหรับการออกแบบ FFR หนึ่งอัน

จากกราฟค่าระยะห่างที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.25 ยกตัวอย่างเช่น ถ้าความลึกของรอยต่อมีค่า $3 \mu\text{m}$ และมีความเข้มข้นฐานรอง $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (ความหนาบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันพังทลายมีค่า $20 \mu\text{m}$) มีค่าระยะห่างที่เหมาะสมที่ $5 \mu\text{m}$ เป็นต้น ค่าระยะห่างนี้แสดงไว้ในกฎการออกแบบอุปกรณ์กำลังประยุกต์ (Modern Power Device Design Rules) ซึ่งค่าดังกล่าวมีความสำคัญในการออกแบบระยะห่างการแพร่บริเวณเปิด (มาส์ก) ที่เกิดการแพร่ด้านข้างของทั้งรอยต่อหลักและ FFR

ค่าระยะห่างที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 2.28 สามารถคำนวณได้ภายใต้ข้อสมมุติที่ว่าไม่มีประจุที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำในบริเวณความเข้มข้นสารเจือดำ ถ้าประจุที่ผิวมีความหนาแน่นมากจะส่งผลกระทบต่อชั้นบริเวณปลอดพาหะในการแพร่ที่พื้นผิว เพราะว่าประจุนี้ประกอบไปด้วยประจุที่เกิดจากการแตกตัวของอะตอมผู้รับ (Ionized Acceptor) ในบริเวณปลอดพาหะ ประจุที่ผิวเปรียบได้กับประจุทั้งหมดในบริเวณปลอดพาหะภายใต้พื้นผิว ประจุนี้มีค่าประมาณ $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ การเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้นปลอดพาหะสำหรับกรณีประจุเป็นบวก ศูนย์ หรือประจุลบที่ผิวแสดงดังรูปที่ 2.29 สำหรับรอยต่อในแนวระนาบ ประจุบวกที่ผิวทำให้บริเวณปลอดพาหะของบริเวณสารเจือดำเกิดการแผ่กว้างออก ในขณะที่ประจุลบที่ผิวทำให้ลดการกระจายตัวของบริเวณชั้นปลอดพาหะลงแสดงดังรูปที่ 2.29 โดยแสดงประจุบวกที่ผิวทำให้ลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่มุม ทำให้สามารถเพิ่มแรงดันพังทลายได้ ในขณะที่ประจุลบที่ผิวเกิดปรากฏการณ์ตรงกันข้าม ดังนั้นประจุบวกมีประโยชน์กับรอยต่อในแนวระนาบที่บริเวณความเข้มข้นสารเจือดำเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) ปรากฏการณ์นี้ที่ผิวจะเกิดตรงกันข้ามเมื่อบริเวณความเข้มข้นสารเจือดำเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type)



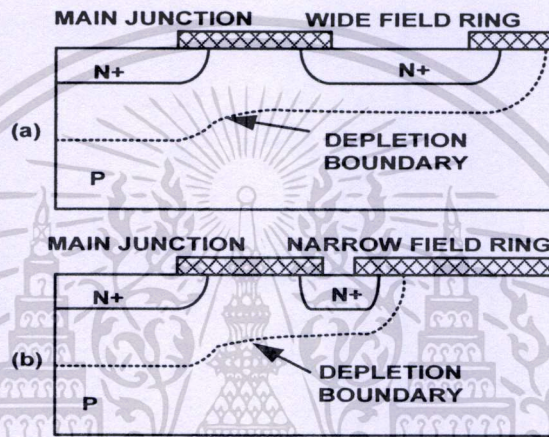
รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของบริเวณปลอดพาหะที่ขอบรอยต่อในแนวระนาบ โดยที่ (a) ผลของประจุบวกที่ผิว (b) ผลของประจุเป็นศูนย์ที่ผิว และ (c) ผลของประจุลบที่ผิว

กรณีรอยต่อที่มี FFR จะเกิดประจุที่ผิวทั้งสองชนิด ทำให้การทนแรงดันพังทลายลดลง เพราะเกิดจากผลกระทบของแรงดันรัชทรู (Reach-Through Voltage) ต่อ FFR ในกรณีของบริเวณความเข้มข้นสารเจือดำเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี แรงดันรัชทรูมีผลกระทบเล็กน้อยต่อประจุบวก แสดงว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับระยะห่างควรเพิ่มขึ้น จากการคำนวณในสมการ (2.51) ในขณะที่การกระจายตัวของแรงดันพังทลายมีค่าสูงสุดที่เหมาะสมดังแสดงในรูป 2.26 แสดงประจุที่ผิวสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันพังทลายโดยเงื่อนไขการเพิ่มขึ้น 2 เท่า ถ้าประจุที่ผิวรู้ค่าที่แน่นอน อาจจะหาวิเคราะห์ขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการวาง FFR โดยรวมผลของประจุและการออกแบบระยะห่างของมาส์ก W_m ในทางปฏิบัติประจุที่ผิวของการออกซิไดซ์ซิลิกอนด้วยความร้อนคือประจุบวกและมีจำนวนตั้งแต่ 10^{10} ถึง 10^{12} cm^{-2} ดังนั้นต้องควบคุมความสะอาดเป็นอย่างดี เช่นขั้นตอนการทำความสะอาดในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ที่ซับซ้อน เช่นการสร้างมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) ประจุที่ผิวระหว่างเวเฟอร์กับเวเฟอร์ และเวเฟอร์ในกลุ่มเดียวกันมีค่าประมาณ $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ประจุนี้จะมีผลต่อการออกแบบค่าแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ที่ใช้ FFR เพียงอันเดียว

การเพิ่ม FFR ที่มีระยะห่างที่เหมาะสมเป็นแค่ส่วนหนึ่งในการสร้าง FFR เท่านั้น อีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่จำเป็นคือความกว้างของบริเวณเปิด W_f สำหรับการแพร่ของ FFR ในสารกึ่งตัวนำ เมื่อ W_f มีขนาดเล็ก FFR ไม่สามารถลดส่วนโค้งของชั้นปลอดพาหะได้ [17] ผลกระทบของขนาดพื้นที่เปิดบริเวณการแพร่และบริเวณปลอดพาหะแสดงดังรูปที่ 2.30 โดย (a) และ (b) แสดงผลกระทบที่ทำให้เกิดการงอโค้งของบริเวณปลอดพาหะ ความกว้างของ FFR เท่ากับ W_f โดยเทียบกับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันพังทลาย W_c ไม่ควรสร้าง FFR ให้มีความกว้างมากกว่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะ เพราะไม่ทำให้แรงดันพังทลายดีขึ้นหรือเพิ่มขึ้นเลย และยังทำให้เสียพื้นที่ของแต่ละชิพ (Chip) เพราะแต่ละชิพจะมีขนาดใหญ่ทำให้จำนวนรวมของอุปกรณ์ในแผ่นเวเฟอร์ลดลงนั่นเอง สิ่งที่ต้องทำในการสร้าง FFR คือการเพิ่มจำนวน FFR หลายๆ อันหรือการสร้างฟิลด์เฟรต (Field Plate) เทคนิคดังกล่าวถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายกับอุปกรณ์กำลังประยุกต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงผลของ FFR ต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย โดยทำการสร้าง FFR จำนวนหลายๆ อัน



รูปที่ 2.30 การเปลี่ยนแปลงการแผ่กว้างบริเวณปลอดพาหะกับความกว้างของ โฟลตติงฟิลด์ริง โดยที่ (a) การกระจายตัวของบริเวณปลอดพาหะเมื่อโฟลตติงฟิลด์ริงมีขนาดใหญ่ และ (b) เมื่อโฟลตติงฟิลด์ริงมีขนาดเล็ก

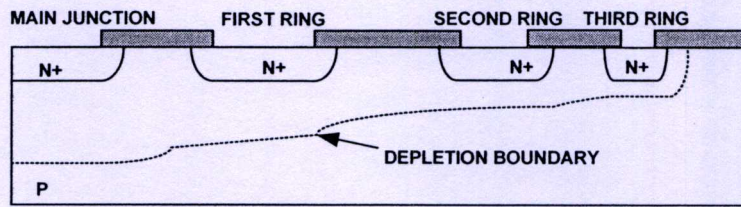
2.5.1 โฟลตติงฟิลด์ริง (FFR) จำนวนหลายๆ อัน (Multiple Floating Field Ring

Termination)

FFR หนึ่งอันสามารถลดความโค้งของชั้นบริเวณปลอดพาหะ, ลดความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าส่งผลให้สามารถทนแรงดันพังทลายได้มากขึ้น การเพิ่มแรงดันพังทลายให้ดีขึ้นสามารถใช้ FFR จำนวนหลายตัว กรณี FFR หนึ่งอันสามารถเพิ่มเป็นหลายอันได้โดยง่าย เพียงแค่เพิ่มจำนวนเปิดในกระบวนการสร้างล้อมรอบรอยต่อหลักเป็นจำนวนหลายๆ อัน และทำการเจือสารพร้อมกับการสร้างรอยต่อหลักโดยไม่ต้องเพิ่มขึ้นตอนการสร้างแต่อย่างใด

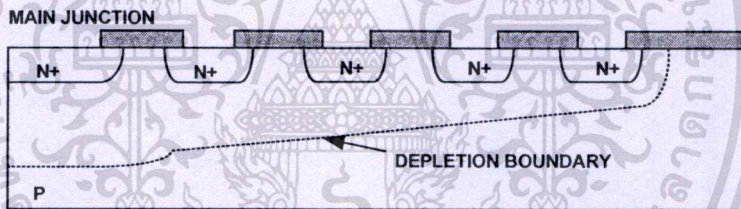
พื้นฐานสองประการถูกใช้สำหรับการออกแบบ FFR จำนวนหลายอัน หนึ่งคือระยะห่างแต่ละอันของ FFR ถูกปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับความกว้างนั้นๆ [18] แสดงดังรูป 2.31 ทั้งระยะห่างและความกว้างของ FFR ถูกใช้ในออกแบบเพื่อลดความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อหลัก เพราะ

ความหนาของชั้นบริเวณปลอดพาหะภายใต้นี้ลดลงตามลำดับ บริเวณปลอดพาหะจะค่อยๆ ลดลงจากรอยต่อหลักไปยัง FFR ตัวต่อๆ ไป



รูปที่ 2.31 การออกแบบจำนวน FFR จำนวนหลายอันและการค่อยๆ ลดลดลงของความกว้างและระยะห่างโพลติ่งพิวลิ่ง

การลดระยะห่างและความกว้างของ FFR ภายใต้ข้อสมมุติที่ว่าประจุที่ผิวมีจำนวนที่คงที่แน่นอน การออกแบบระยะ FFR ให้คำนึงถึงประจุนี้ด้วย การออกแบบที่เหมาะสม FFR เหล่านี้จะแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่เท่าๆ กัน



รูปที่ 2.32 ส่วนของพิวลิ่งที่มีระยะห่างและความกว้างแต่ละ FFR เท่ากัน

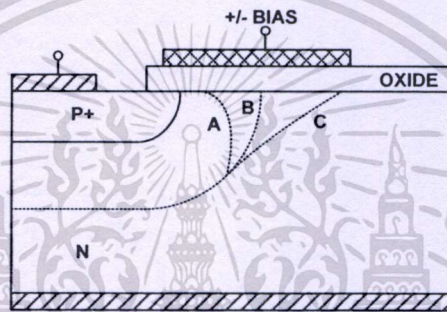
การออกแบบที่สองแสดงดังรูปที่ 2.32 ทุกๆ FFR ถูกออกแบบให้แคบลงและระยะห่างเท่าๆ กัน ความกว้างที่น้อยลงของ FFR เหล่านี้และระยะที่ใกล้เข้ามา การออกแบบนี้ทำให้เกิดการแบ่งชั้นในบริเวณปลอดพาหะที่แต่ละ FFR การออกแบบแต่ละส่วนนี้ทำได้ง่ายเพราะว่าออกแบบภายใต้พื้นฐานค่าน้อยที่สุดตามกฎการออกแบบ เพราะจำนวน FFR มีมากทำให้ลดการชนในการเปลี่ยนแปลงประจุที่ผิวบริเวณจุดเดียว แบ่งออกเป็นหลายๆ จุด

การออกแบบ FFR เพื่อเพิ่มแรงดันพังทลาย ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่จำกัดการไบอัสในการใช้งานชิพ การออกแบบอุปกรณ์ให้เหมาะสมมักจะใช้ FFR จำนวน 3 อันเป็นอย่างน้อย อย่างไรก็ตามการออกแบบ FFR จำนวน 10 อัน ได้ถูกนำเสนอและทำให้ไม่เกิดการพังทลายที่บริเวณรอยต่อในแนวระนาบ โดยทำให้เกิดการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าในแต่ละ FFR ทำให้มีการกระจายที่เหมาะสมและเท่ากัน ส่งผลให้แรงดันพังทลายมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ฟิวล์เพลต (Field Plates)

ในหัวข้อที่ผ่านมาแสดงสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้ารอยต่อด้วยวิธีแปรสารเจือที่ใหญ่มากกว่า รอยต่อในแนวระนาบ โดยที่บริเวณปลอดพาหะมีการเกิดปรากฏการณ์มุม (Curvature Effect) การเพิ่ม FFR เป็นหนึ่งวิธีในการลดปรากฏการณ์นี้ อีกหนึ่งวิธีสำหรับลดปรากฏการณ์ที่มุมในชั้น บริเวณปลอดพาหะคือการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิว วิธีการดังกล่าวนิยมใช้โลหะวางลงบนส่วนรอยต่อในแนวระนาบดังแสดงดังรูป 2.33 เมื่อรูปร่างของบริเวณปลอดพาหะเปลี่ยนแปลง ศักย์ไฟฟ้าที่ผิว การกระจายตัวของบริเวณปลอดพาหะที่บริเวณผิวหน้าจะเปลี่ยนแปลงตามเมื่อได้รับการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ฟิวล์เพลต

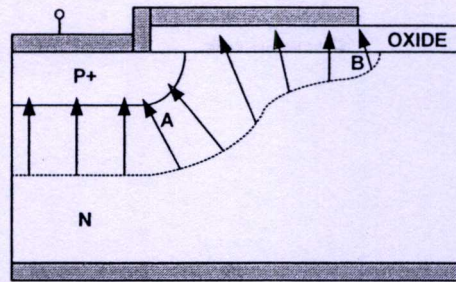


รูปที่ 2.33 ผลของการป้อนแรงดันไบอัสที่ฟิวล์เพลตทำให้การกระจายตัวของบริเวณปลอดพาหะเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งรอยต่อในแนวระนาบ

เมื่อป้อนไฟบวกที่ฟิวล์เพลต โดยที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) จะเห็นขั้วนำ อิเล็กตรอนที่ผิวและทำให้ชั้นปลอดพาหะหดตัวลงแสดงดังกรณี A ถ้าป้อนแรงดันไบอัสเป็นลบที่ ฟิวล์เพลตจะทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่บริเวณผิวในชั้นปลอดพาหะแผ่กว้างแสดงดังในกรณี C และไม่มีการป้อนแรงดันไบอัสแสดงดังกรณี B ดังนั้นสามารถหาแรงดันพังทลายของไดโอดที่ฟิวล์เพลตจากศักย์ไฟฟ้าที่ฟิวล์เพลต (V_{FP}) ได้โดย

$$V_D = mV_{FP} + C \quad (2.78)$$

โดยที่ m ให้มีค่าประมาณเท่ากับ 1 และ C คือค่าคงที่ ค่าของ m ใช้ได้กับชั้นออกไซด์ที่บาง เมื่อป้อนแรงดันไบอัสค่าแรงดันพังทลายของพลาแนร์ไดโอด (Planar Diode) มีค่าใกล้เคียงกับการพังทลายที่รอยต่อในแนวระนาบ



รูปที่ 2.34 รอยต่อในแนวระนาบ โดยมีชั้นพีวล์เฟลต

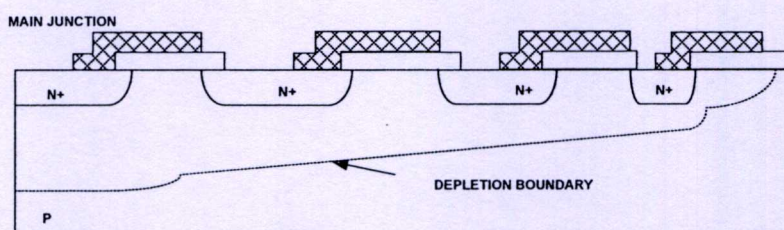
ในอุปกรณ์กำลังจริง ไม่สามารถป้อนแรงดันแยกเพื่อควบคุมศักย์คาไฟฟ้าที่พีวล์เฟลตได้ โดยทำการสร้างรอยต่อโลหะให้ยาวมากขึ้นและอยู่บนชั้นออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.34 เมื่อพีวล์ออกไซด์ได้รับแรงดันไบอัสที่รอยต่อหลักจะเกิดลักษณะรูปร่างของบริเวณปลอดพาหะดังรูปที่ 2.34 การแผ่กว้างของบริเวณปลอดพาหะจากมุมไปตามผิวกระทั่งถึงขอบพีวล์เฟลต ทำให้ลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อหลัก (ตำแหน่ง A) ลงได้ อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าความเข้มข้นสูงสามารถเกิดได้ที่ขอบของพีวล์เฟลต (ตำแหน่ง B) ซึ่งต้องสร้างให้ออกไซด์มีความหนาแน่นมาก [19]

การจำลองแบบการสร้างทางคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติ ของการกระจายตัวศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อแนวระนาบ โดยที่บริเวณพีวล์เฟลตมีความเข้มข้นสารเจือสูง ถูกแสดง โดยการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นฐานรองและความหนาออกไซด์ [4] จากการวิเคราะห์ผลพบว่ถ้าความหนาซิลิคอนไดออกไซด์น้อย ทำให้เกิดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสูงบริเวณขอบของพีวล์เฟลต เหตุการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาให้ขอบของโลหะพีวล์เฟลตกับความหนาออกไซด์ทำตัวคล้ายรอยต่อทรงกระบอกที่ด้านความเข้มข้นสารเจือสูงของรอยต่อ การเปรียบเทียบนี้อยู่ภายใต้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constants) ของชั้นไดอิเล็กตริกและสารกึ่งตัวนำ ใช้กฎของเกาส์ (Gauss's law) อธิบายปรากฏการณ์ที่รอยต่อ โดยที่สนามไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าในออกไซด์ โดยเป็นอัตราส่วนของค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) กรณีการสร้างออกไซด์โดยความร้อนจะมีค่าเปอร์มิตติวิตีเท่ากับ 3.85 ที่เปอร์มิตติวิตีของซิลิคอนมีค่า 11.7 ค่าดังกล่าวจะลดลงในสนามไฟฟ้า โดยมีค่าสัมพันธ์กับความลึกของรอยต่อคือ

$$X_j = \frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_{Ox}} t_{ox} \approx 3t_{ox} \quad (2.79)$$

โดยที่ความหนาของชั้นออกไซด์ได้พีวล์เฟลตมีค่า 1 ไมครอน ทำให้ความลึกของรอยต่อมีค่า 3 ไมครอน ความลึกนี้สามารถถูกใช้ในการหาแรงดันพังทลายในสมการ (2.69) เพื่อคำนวณหาแรงดันพังทลายที่ขอบของพีวล์เฟลต สมการนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อขอบของพีวล์เฟลตมีรัศมีขนาดใหญ่ รูปร่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณมุมของพีวล์เพรตมีลักษณะคล้ายรอยต่อทรงกลม ที่มีรัศมีบริเวณมุมตามสมการ (2.79) เมื่อแรงดันพียงทลายนี้มีค่าน้อยกว่าบริเวณรอยต่อทรงกระบอกมากๆ



รูปที่ 2.35 การออกแบบตำแหน่งการวางพีวล์เพรตกับ FFR

ปกติแล้วการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ระหว่างพีวล์เพรตกับ FFR จะแสดงดังรูปที่ 2.35 ทำให้มีค่าแรงดันพียงทลายสูงขึ้น โดยที่พีวล์เพรตถูกต่อกับ FFR และบริเวณขอบพีวล์เพรตไม่สามารถลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่ขอบของ FFR ได้ แต่สามารถป้องกันประจุบริเวณผิวของอุปกรณ์จากการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ พีวล์เพรตทำให้เสถียรภาพของแรงดันพียงทลายเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการทดลองสร้างพีวล์เพรตบน FFR โดยศึกษาผลของจำนวนพีวล์เพรตบน FFR ต่อค่าแรงดันพียงทลายและกระแสรั่ว ขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

บทที่ 3

กระบวนการสร้างไดโอด

3.1 การสร้างมาสก์ (Mask Fabrication)

มาสก์คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างลวดลายวงจร โดยทำหน้าที่เปิดหรือปิดแสงในการสร้างวงจร ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ดังนั้นมาสก์จึงมีส่วนสำคัญในการกำหนดขนาดและรูปแบบของลวดลายต่างๆ มาสก์จะสร้างจากกระจกควอตซ์ (Quartz) โปร่งแสง เพราะมีคุณสมบัติการส่องผ่านแสงได้ดี การออกแบบลวดลายบนมาสก์จะทำการออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม L-edit หรือตระกูล CAD ทั้งหลาย แล้วทำการเขียนบนกระจกควอตซ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Laser light)

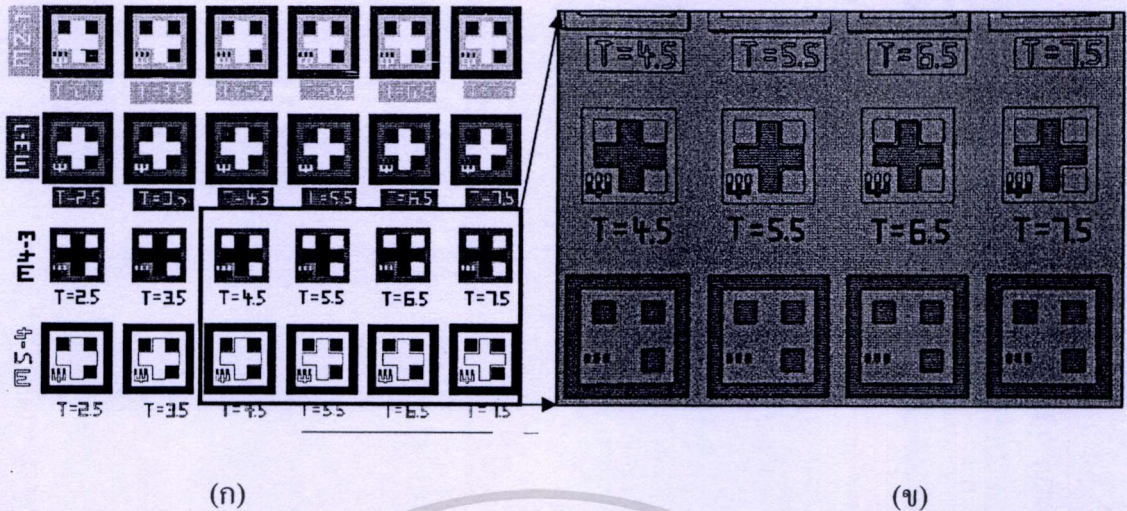
3.1.1 การออกแบบโครงสร้างเพื่อสร้างมาสก์โดยโปรแกรม L-edit (Layout design by L-edit Program Design)

โปรแกรม L-edit คือซอฟต์แวร์ที่สนับสนุนการออกแบบวงจรรวมในระดับ Low-level, Full-Custom Mask Editor จะพบว่าใช้ได้ง่ายและรวดเร็ว ทั้งยังสนับสนุน High-level Floor Planning โปรแกรม L-Edit ยังสามารถอ่านและบันทึกข้อมูลในรูปแบบของ Standard Mask Layout Interchange Formats (GDS II และ CIF) หรือ Tanner Research's Own Binary Database Format (TDB = Tanner Data Base) ซึ่งสามารถทำได้เร็วกว่าสองแบบข้างต้น โดยรูปแบบ TDB จะถูกใช้ในระหว่างกระบวนการออกแบบ เพื่อเรียกใช้และเก็บข้อมูลจากการออกแบบ ส่วน CIF กับ GDS II Formats จะใช้ในการ Transfer Designs ไปยัง Fabricator หรือ CAD Platform อื่นๆ

การออกแบบด้วยโปรแกรม L-edit จะออกแบบแบ่งเป็นชั้นๆ หรือเลเยอร์ (Layer) โดยการสร้างไดโอดโครงสร้างแบบมี FFR จะแบ่งเป็น 5 ชั้น คือ 1) ชั้นจัดตำแหน่งมาสก์ (Alignment Mark Layer) 2) ชั้นโด๊ป (Doping Layer) สารกึ่งตัวนำชนิดพี 3) ชั้นรอยสัมผัสโลหะ (Metal Contact Layer) 4) ชั้นกั๊ดโลหะหรือชั้นกำหนดขนาดโลหะ (Pad Metal Layer) และ 5) ชั้นกั้นความชื้นและแบ่งตัวอุปกรณ์ (Dicing Line) ซึ่งแต่ละชั้นจะออกแบบให้มีลวดลายที่แตกต่างกันตามความต้องการในการใช้งานนั้นๆ

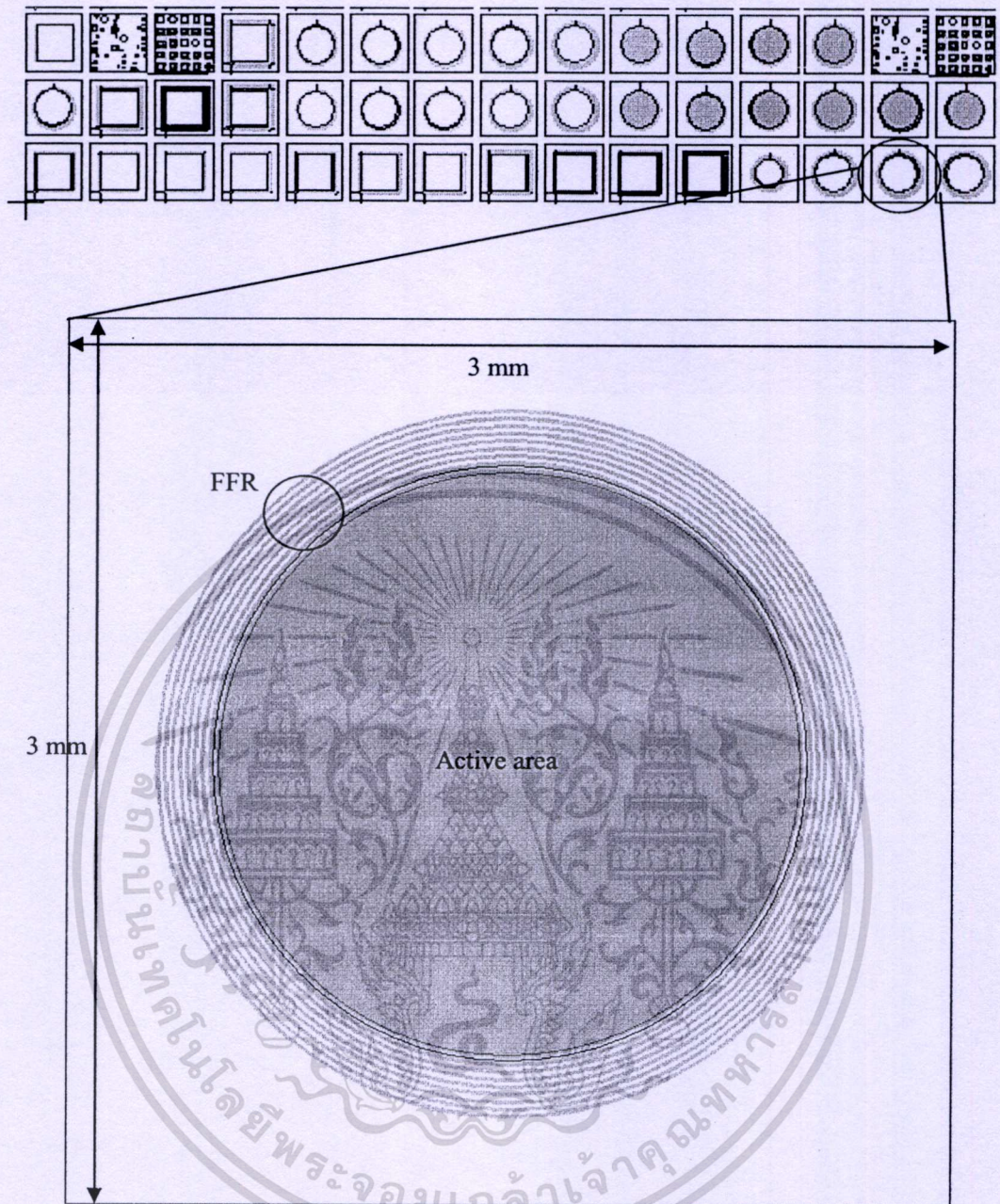
ขั้นตอนที่ 1 Alignment Mark Layer คือการออกแบบชั้นการจัดตำแหน่งมาสก์แต่ละชั้น เป็นส่วนการจัดเรียงตำแหน่งเพื่อให้การสร้างแต่ละชั้นมีตำแหน่งตรงกัน เพราะในกระบวนการสร้างไดโอดจะประกอบไปด้วยหลายๆ ชั้น ดังนั้นการสร้างแต่ละชั้นให้มีตำแหน่งที่ตรงกันต้องอาศัยชั้นการจัดตำแหน่งมาสก์ซึ่งได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 (ก) ชั้น Alignment mark โดยการออกแบบด้วยโปรแกรม L-edit (ข) ภาพถ่ายจากกล้องไมโครสโคป (Microscope) ซึ่งแบ่งเอาบางส่วนของการออกแบบเท่านั้น

ชั้นที่ 2 Doping Layer คือชั้นการโด๊ป ใช้สำหรับกำหนดพื้นที่การเจือสารเพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นที่แลกเปลี่ยนพาหะระหว่างรอยต่อ ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติกระแสของไดโอดทั้งกรณีไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ พร้อมทั้งเป็นตัวกำหนดระยะห่างและขนาดของ FFR ซึ่งมีผลต่อค่าแรงดันพังทลายและกระแสรั่วของไดโอด ชั้นที่ 3 Metal Contact Layer คือชั้นการเปิดให้โลหะสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำหรือชั้นรอยต่อ (Contact) ในการออกแบบนี้สารกึ่งตัวนำคือชั้นโด๊ปสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งการออกแบบต้องให้ความกว้างมีขนาดน้อยกว่าบริเวณโด๊ป เพื่อป้องกันการเกิดพันซ์ทรู (Punch Through) ระหว่างบริเวณปลอดพาหะกับขั้วโลหะ เมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งได้ออกแบบให้มีขนาดน้อยกว่าชั้นโด๊ป ชั้นที่ 4 Pad Metal Layer คือชั้นกีดโลหะหรือชั้นกำหนดขนาดโลหะซึ่งต้องมีค่าที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเหนี่ยวนำประจุบริเวณใต้ชั้นโลหะอันเป็นสาเหตุให้เกิดการสะสมของพาหะ ซึ่งส่งผลให้ไดโอดที่สร้างมีค่าสวิตซิ่ง (Switching) ช้า ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อความถี่สูงลดลง และชั้นที่ 5 คือชั้นการตัดแบ่งอุปกรณ์และชั้นกันความชื้น การตัดแบ่งไดโอดออกเป็นแต่ละตัว ซึ่งในชั้นดังกล่าวจะต้องทำการกัดชั้นฉนวน เพื่อป้องกันการแตกร้าวของฉนวน อันส่งผลให้เกิดการพังทลายของไดโอดที่บริเวณนั้น ในการสร้างออกแบบให้มีระยะห่าง 300 μm เนื่องจากใบมีดในการตัดมีขนาด 100 μm ลวดลายเมื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม L-edit เสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.2



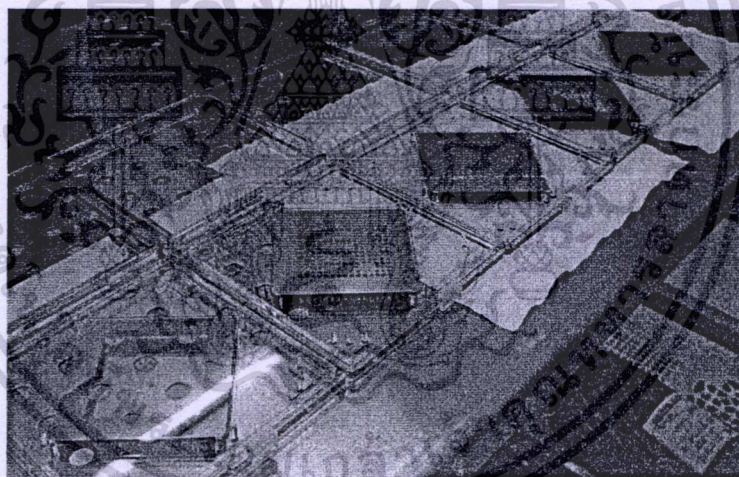
รูปที่ 3.2 การออกแบบด้วยโปรแกรม L-edit

การออกแบบลวดลายการสร้างไดโอด กำหนดให้ขนาดของไดโอดเท่ากับ $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ความกว้างของ FFR เท่ากับ $10 \text{ }\mu\text{m}$ โดยทำการปรับเปลี่ยนจำนวน FFR, ระยะห่าง และรูปทรงการสร้าง

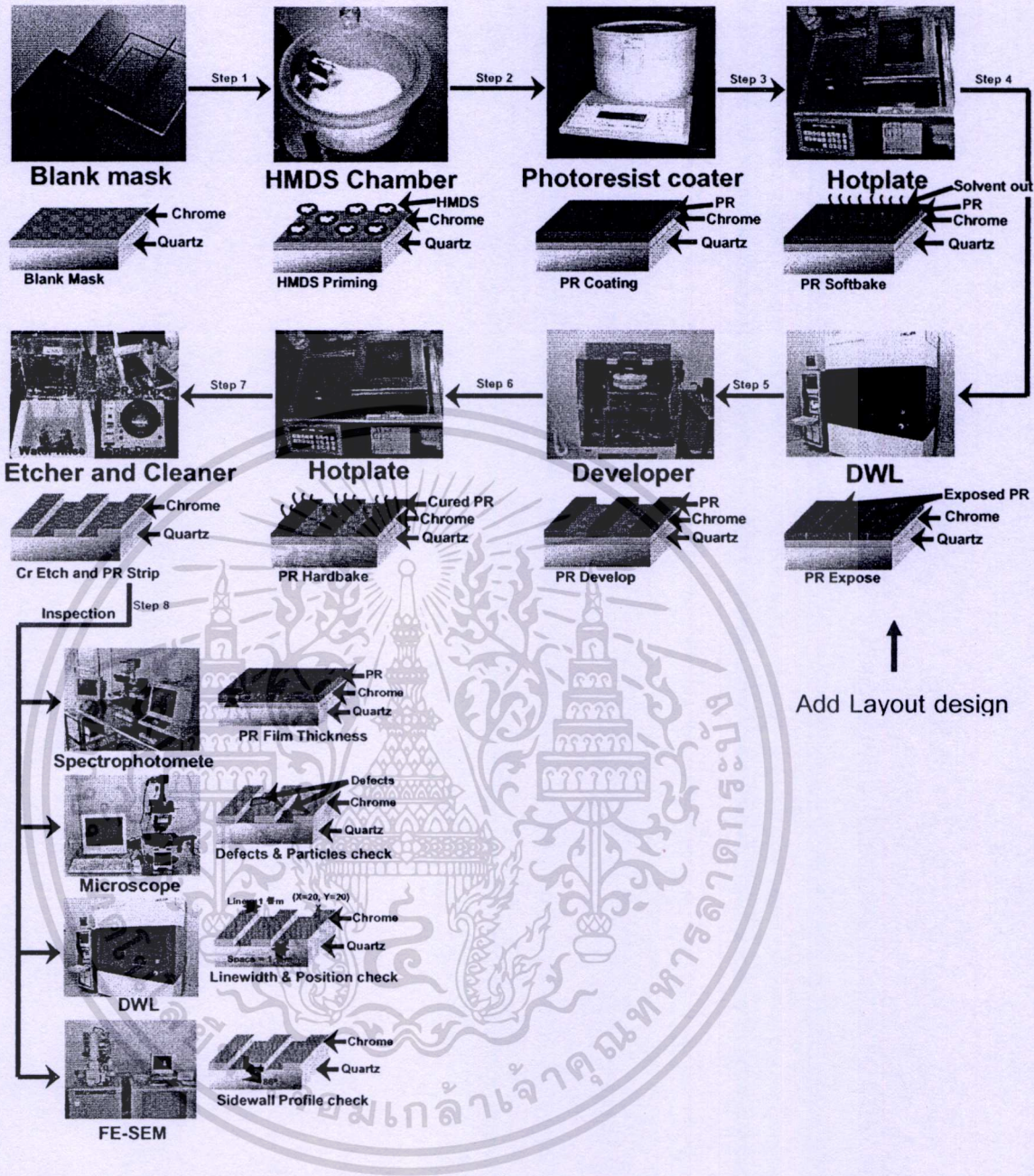
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ขั้นตอนการสร้างมาสก์ (Mask Fabrication)

เมื่อทำการออกแบบมาสก์ด้วยโปรแกรม L-edit เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำแบบลวดลายมาทำการสร้างมาสก์ ขั้นตอนการสร้างมาสก์แสดงดังรูป 3.4 ขั้นตอนการสร้างมาสก์มีลำดับการสร้างดังนี้ คือเตรียมแผ่นกระจกควอตซ์ (Quartz) ที่มีชั้นโครเมียมอยู่ด้านบน จากนั้นเคลือบน้ำยาช่วยประสาน HexaMethylDiSilazane (HMDS) เพื่อให้หน้ายาไวแสงติดกับโครเมียมได้ดีแล้วทำการเคลือบน้ำยาไวแสง จากนั้นทำการอบด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 วินาที จากนั้นทำการเขียนลวดลายที่ออกแบบไว้ในขั้นตอนที่ 1 ด้วยเลเซอร์ โดยเครื่องเขียนกระจกมาสก์ด้วยเลเซอร์ (Direct Write Laser: DWL) จากนั้นทำการลอกชั้นน้ำยาไวแสงด้วยน้ำยาล้างฟิล์มไวแสง (Developer) แล้วทำการอบด้วยความร้อนอีกครั้งด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.30 นาที จากนั้นทำการกัดโครเมียมแล้วลอกน้ำยาไวแสงและปั่นแห้ง จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติขนาดของเส้นลวดลายด้วยเครื่องมือต่างๆ เช่น Spectrophotometer, Microscope และ FE-SEM เป็นต้น เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างมาสก์และจะได้กระจกมาสก์ที่มีลวดลายตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งต้องทำทั้งหมด 5 แผ่น กระจกมาสก์ทั้ง 5 แผ่น แสดงดังรูปที่ 3.3 และขั้นการสร้างมาสก์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ภาพกระจกมาสก์ทั้ง 5 ชั้น



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้างและวิเคราะห์ 마스크

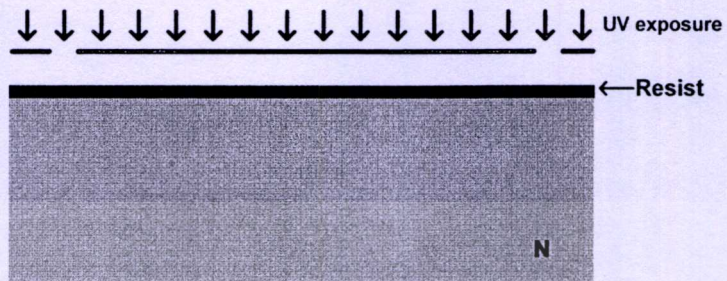
3.2 การสร้างไดโอดกำลัง (Diode Fabrication)

3.2.1 ขั้นตอนการสร้างไดโอดกำลัง (Diode Fabrication Steps)

เมื่อทำการสร้างกระจกต้นแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะทำการสร้างไดโอด โดยมีกระบวนการสร้างดังภาพจำลองขั้นตอนการสร้างไดโอดกำลังแบบมี FFR แสดงตามลำดับดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เตรียมแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (111) ชนิดเอ็น (N-type) สภาพต้านทาน 120 Ohm.cm
2. ทำความสะอาดด้วยสารเคมี
3. ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 1 โดยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photo Lithography)



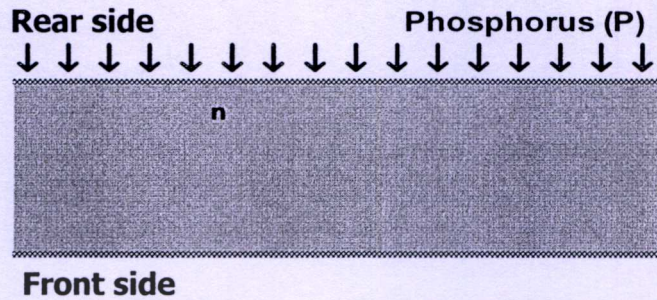
รูปที่ 3.5 ภาพจำลองการสร้างลวดลายชั้นที่ 1 ด้วยกระบวนการ Photo Lithography

4. ทำการกัดแบบแห้ง (Dry Etching) ชั้นฐานรองซิลิคอน เพื่อทำเป็นชั้น Alignment mark จากนั้นทำการลอกนํ้ายาไวแสงโดยการ strip resist
5. ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 250 Å จำนวน 2 ครั้ง เพื่อเป็นชั้น sacrificial (SAC) oxide และชั้นช่วยลดความเสียหายบริเวณผิวหน้าแผ่นในการยิงฟิงเจอร์



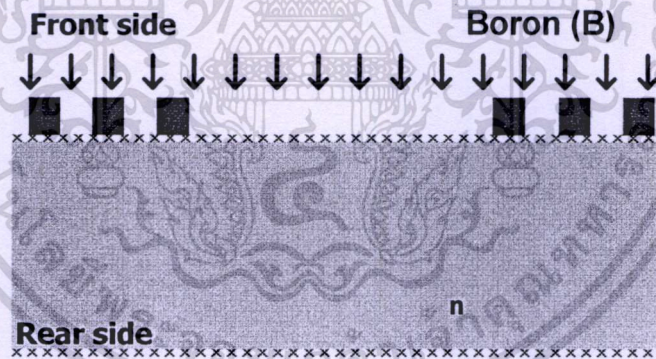
รูปที่ 3.6 ภาพจำลองการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หลังการกัด Alignment mark

6. ทำการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสที่พลังงาน 120 keV ปริมาณสารเจือ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ด้านหลังแผ่น เพื่อสร้างรอยสัมผัส Ohmic ระหว่าง N+ และ โลหะ Al ในการสร้างขั้วแคโทดต่อไป



รูปที่ 3.7 ภาพจำลองการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสด้านหลังแผ่นซิลิคอน

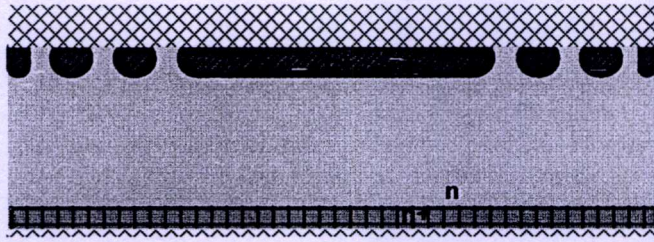
7. ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 2 โดยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อทำการสร้างรอยต่อพี-เอ็น และ FFR
8. ทำการยิงฝังประจุโบรอน (B) ที่พลังงาน 120 keV ปริมาณสารเจือ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ เพื่อทำการสร้างขั้วแอนโนดและ FFR



รูปที่ 3.8 ภาพจำลองการยิงฝังประจุโบรอนด้านหน้าแผ่นซิลิคอน

9. จากนั้นทำการลอกน้ำยาไวแสงโดยการ strip resist และทำความสะอาดด้วยสารเคมี
10. แอนนัล (Anneal) ด้วยอุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 600 นาที
11. ทำการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการกัดแบบเปียก (Wet Etching)
12. ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่ โดยสร้าง Dry Oxide หนา 250 Å และใช้เทคนิค PECVD สร้างซิลิคอนไดออกไซด์หนา 20000 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



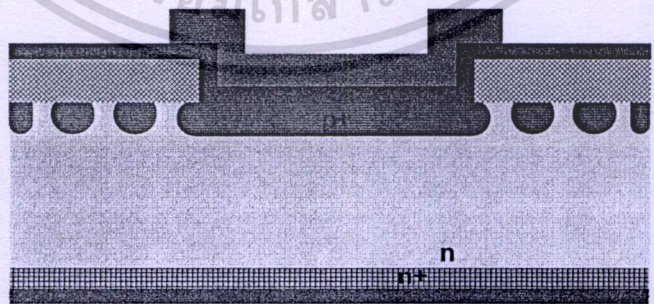
รูปที่ 3.9 ภาพจำลองหลังการแอนนیلและสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

13. ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 3 โดยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อทำการสร้างขั้วสัมผัส (Contact) ระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับโลหะซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดต่อไป
14. กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 20250 Å แล้วทำการลอกน้ำยาไวแสงโดยการ strip resist



รูปที่ 3.10 ภาพจำลองหลังการสร้างลวดลายชั้นที่ 3 และกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

15. สร้างชั้นโลหะด้านหน้าและด้านหลังแผ่นหนา 10000 Å
16. ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 4 โดยกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี เพื่อทำการกัดชั้นโลหะ



รูปที่ 3.11 ภาพจำลองหลังการสร้างโลหะและการสร้างลวดลายชั้นที่ 4

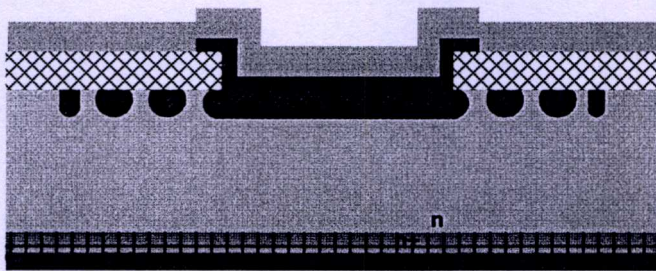
17. กัดชั้นโลหะแล้วทำการลอกชั้นน้ำยาไวแสงด้วยสารเคมี โดยการ strip resist

18. สร้างชั้นกันความชื้น (Passivation layer) ด้วยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และซิลิคอนไน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

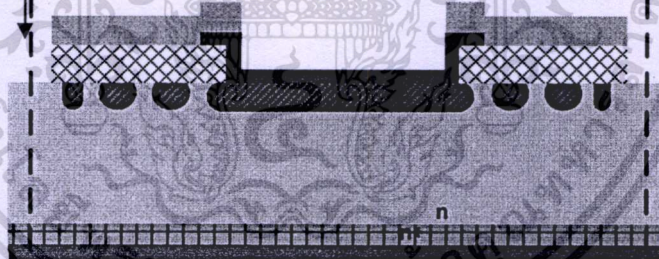
ไตรค์หนา 5000 และ 10000 Å ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 ภาพจำลองหลังการกัดโลหะและการสร้างชั้นกันความชื้น

19. ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 5 โดยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อทำการกัดชั้นกันความชื้น
20. ทำการกัดชั้นซิลิคอนไนไตรค์และซิลิคอนไดออกไซด์ตามลำดับ
21. ทำความสะอาดด้วยสารเคมีและน้ำไร้ประจุ (DI water) เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตไดโอด

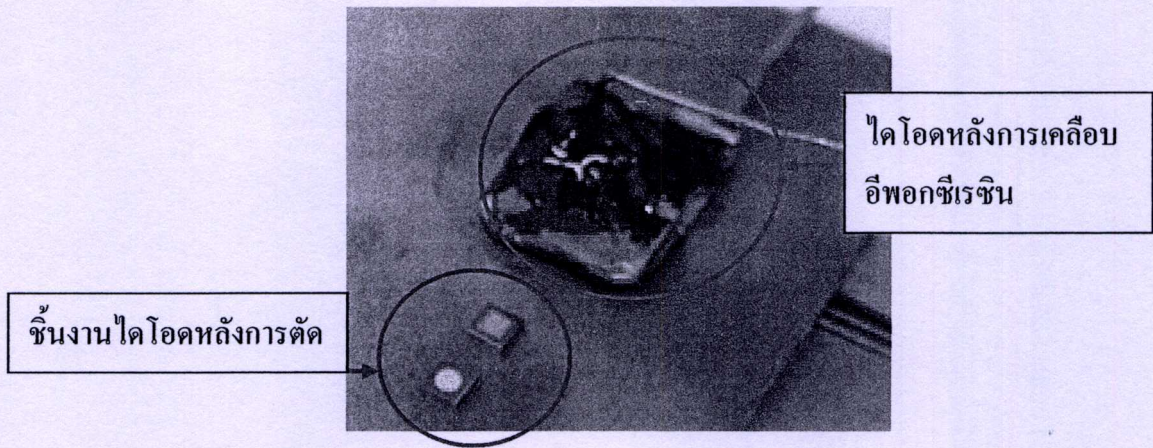
เส้นสำหรับตัด



รูปที่ 3.13 ภาพจำลองหลังการสร้างไดโอดเสร็จสมบูรณ์พร้อมทั้งเส้นการตัดแบ่งอุปกรณ์

จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการวัดค่ากระแสต่อแรงดันด้วยเครื่อง โพรบสัชนัที่ปริมาณแรงดันไฟฟ้า และกระแสต่ำ เมื่อป้อนแรงดันไบอัสตรง จากนั้นนำแผ่นไปทำการตัดแบ่งอุปกรณ์แต่ละตัว แล้วนำชิ้นงานมาทำการชุบนิเกิลโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless Nickel) ต่อจ้ด้วยการบัดกรีตะกั่วและปิดแสงด้วยอีพอกซีเรซินสีดำ ซึ่งแสดงอุปกรณ์ไดโอดหลังการเคลือบอีพอกซีเรซินสีดำดังรูปที่ 3.14 จากนั้นทำการวัดค่ากระแสต่อแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ เพื่อหาค่าแรงดันพังทลายของแต่ละตัวที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ชิ้นไดโอดหลังการตัดแบ่งและไดโอดหลังการเคลือบอีพอกซีเรซินสีดำ

3.3 การเจือสารในกระบวนการสร้างไดโอดกำลัง

3.3.1 ความต้านทานเชิงแผ่นและความลึกในการเจือสาร

ทำการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance: R_s) โดยเครื่องโฟรพรอยส์โฟรบ (Four Point Probe) ทำการวัดทั้งหมด 49 จุด โดยมีพื้นที่การวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 130 mm บนแผ่น 6 inch ซึ่งมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง กลาง 150 mm ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 3.1 ผลการวัดค่า R_s โดยนำข้อมูลมาทำการสรุปจากข้อมูลทั้งหมด 49 ค่า บนระนาบ

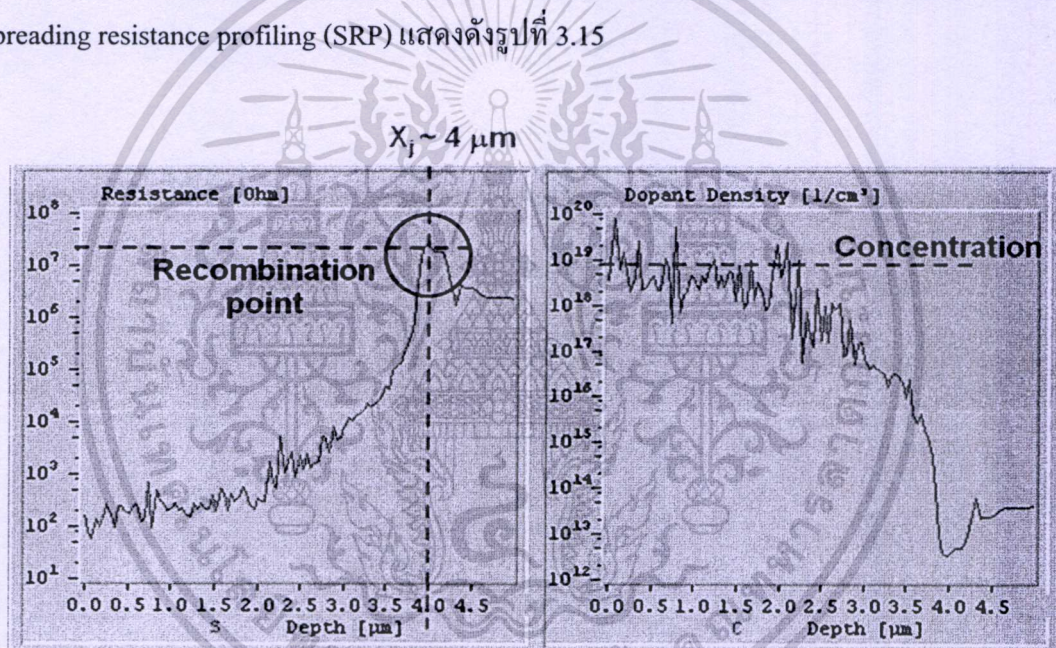
$\langle 111 \rangle$ และ $\langle 100 \rangle$

ระนาบแผ่น	ระนาบ $\langle 111 \rangle$	ระนาบ $\langle 100 \rangle$
ค่าต่ำสุด	11.95	11.33
ค่าเฉลี่ย	12.10	11.47
ค่าสูงสุด	12.30	11.57
เปอร์เซ็นต์ความไม่สม่ำเสมอ	0.67	0.71

จากตารางพบว่าค่า R_s เฉลี่ยในการยิงประจุโบรอน (B) ที่พลังงาน 120 keV, ปริมาณสารเจือ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 600 นาที บนระนาบ(111) และ (100) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 12.10 และ 11.47 Ω/sq ตามลำดับ โดยทั้งสองกรณีมีค่า +/- ไม่เกิน 1 Ω/sq

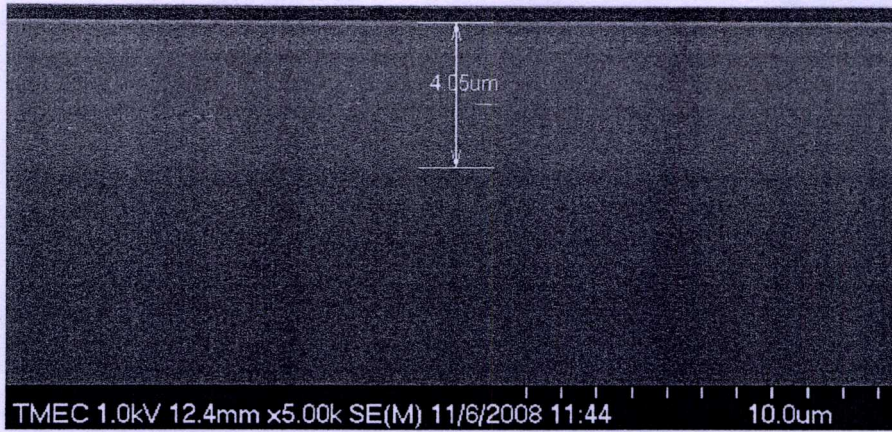
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเจือสารเป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นสำหรับกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด เช่นการนำกระแสไปข้างหน้า การทนแรงดันพังทลาย และกระแสรั่วเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ เป็นต้น คุณสมบัติการทนแรงดันพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นในการสร้างไดโอดจะเกี่ยวข้องกับความลึกในการสร้างและความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพี-เอ็น (r_j) ดังสมการที่ (2.50) จากสมการพบว่าถ้าความลึกในการเจือสารเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าน้อยลง แต่แรงดันพังทลายจะมากขึ้น ในการสร้างไดโอดครั้งนี้ จะทำการสร้างรอยต่อที่มีความลึกในการเจือสารประมาณ 4 ไมครอน จากการจำลองแบบการสร้างด้วยโปรแกรม T-SUPRIM 4 จะได้แรงดันพังทลายมีค่ามากกว่า 1,000 V เมื่อทำการสร้างที่ FFR จำนวน 8 อัน ระยะห่าง 15 μm รูปทรงกลม ความลึกในการเจือสารโดยวิธียิงฝัประจุโบรอน (B) ที่พลังงาน 140 keV ปริมาณสารเจือ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 1050 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 600 นาที โดยวัดค่าความลึกโดยเครื่อง spreading resistance profiling (SRP) แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ภาพผลการวัดค่าความลึกโดยใช้เทคนิค SRP และค่าความเข้มข้นสารเจือจากการคำนวณด้วยโปรแกรมของเครื่องเอง

การวัดค่าความลึกในการเจือสารอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้คือการใช้เครื่อง Field-Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ถ่ายภาพความลึกในการเจือสารได้อีกแนวทางหนึ่ง โดยอาศัยหลักการ Charging ของประจุไอออนนำไฟฟ้า บริเวณที่มีสารเจือสูงเทียบกับบริเวณสารเจือต่ำ ทำให้เกิดสีภาพที่แตกต่างกัน จึงสามารถหาความลึกได้อีกหนึ่งวิธี ภาพการหาค่าความลึกโดยเครื่อง FE-SEM แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ภาพการวัดค่าความลึกโดยใช้เทคนิค FE-SEM



รูปที่ 3.17 ภาพตัดขวางไดโอดโดยมีโพลติ่งพีวล์ริงจำนวน 8 อัน

ความต้องการในการสร้างคือต้องการความลึกในการเจือสารมากๆ ความลึกในการเจือสารกำหนดโดยพารามิเตอร์ของการยิงฝิงประจุและแอนนีส ข้อจำกัดในการยิงฝิงประจุคือพลังงานที่สามารถยิงได้เพียง 120 keV ซึ่งมีความลึกประมาณ 1 μm และเวลาในการยิงฝิงประจุที่ปริมาณสารเจือสูง ซึ่งเงื่อนไขการเจือสารที่ปริมาณสารเจือ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ต้องใช้เวลาในการยิงฝิงประจุประมาณ 45 นาที ในกระบวนการยิงฝิงประจุเวลาดังกล่าวถือว่ามีความมากเกินไป เวลาที่เหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 30 นาทีต่อครั้ง และข้อจำกัดของการแอนนีสคือเราสามารถทำอุณหภูมิได้เพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1050 °C และใช้เวลานานในการแพร่สารเจือที่ประมาณ 600 นาที เพื่อให้ได้ความลึกในการเจือสาร 4 μm

ในการสร้างไดโอดที่ต้องการลดค่าความต้านทานอนุกรม เพื่อให้สามารถนำกระแสได้ดีขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง สามารถทำได้โดยยิงฝิงประจุที่พลังงานสูงในระดับหลายล้านโวลต์ โดยปกติแล้วจะใช้เครื่อง High Energy Ion Implanter ที่สามารถยิงได้ที่พลังงานระดับล้านโวลต์ และแอนนูลที่อุณหภูมิสูงแต่ไม่ควรจะเกิน 1200 °C สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอน และการเพิ่มเวลาในการแอนนูลให้มากขึ้น เพื่อให้เกิดการแพร่ที่ลึกขึ้น แต่ปกติแล้วการแพร่ออก (Out diffusion) ของสารเจือ B จะแพร่ออกจากซิลิคอนฐานรองในบรรยากาศในการแอนนูล ทำให้ปริมาณสารเจือลดลง ดังนั้นการแอนนูลนานมากเกินไป ส่งผลให้ปริมาณสารเจือลดลงได้ จากผลการทดลองเงื่อนไขการเจือสารดังกล่าว ทำให้สามารถสร้างไดโอดที่สามารถทนแรงดันพังทลายได้ที่ 956 โวลต์ ซึ่งมากกว่าที่ตั้งเป้าไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

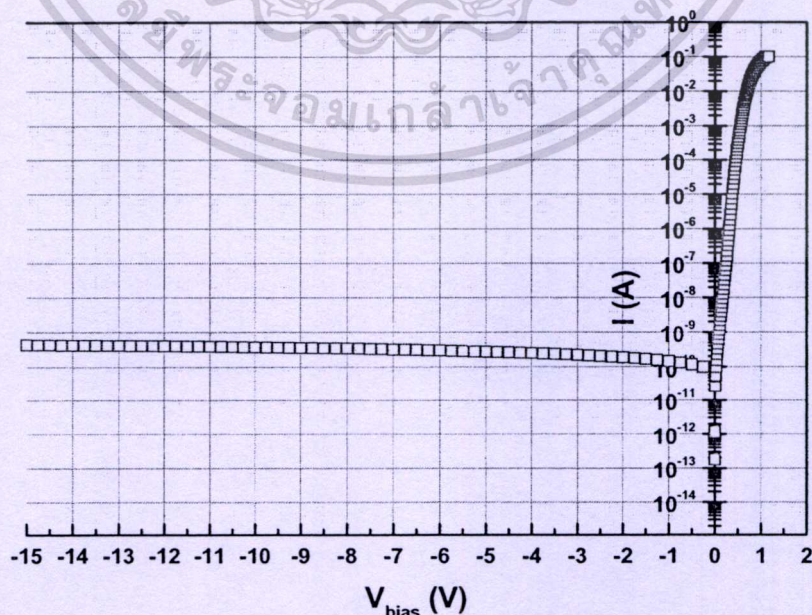
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การนำกระแสและความจุไฟฟ้าของไดโอด

4.1.1 การนำกระแสของไดโอดเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward Bias)

หลังจากทำการสร้างไดโอดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะทำการวัดคุณสมบัติกระแสต่อแรงดันขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยทำการวัดไดโอดที่มีเพียงรอยต่อพี-เอ็นเท่านั้น กรณีได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำการวัดด้วยเครื่องโพรบสเตชัน (Probe Station) ระบบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าใช้วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรวม (Integrated Circuit) หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Device) โดยระบบเครื่องมือวัดประกอบด้วย HP4156B Precision Semiconductor Parameter Analyzer, HP4284A Precision LCR Meter และ HP E5250A Low Leakage Switch Mainframe ระบบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับวงจรรวม หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยผ่าน Alessi REL-6100 Semi-Automatic Probe Station โดย HP4156B ทำหน้าที่เกี่ยวกับการวัดกระแสและแรงดัน, HP4284A ทำหน้าที่วัดค่าความจุไฟฟ้า และ HP E5250A เป็น Metric Switch สลับหน้าที่การทำงานระหว่าง HP4156B และ HP4284A โดยระบบเครื่องมือวัดทั้งหมดได้รับการควบคุมทางคอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม Interactive Characteristics Software (ICS) ค่ากระแสสูงสุดที่วัดได้คือ 100 mA ผลการวัดค่ากระแสต่อแรงดัน โดยป้อนค่า -15 ถึง 2 V ครั้งละ 10 mV แสดงดังรูปที่ 4.1

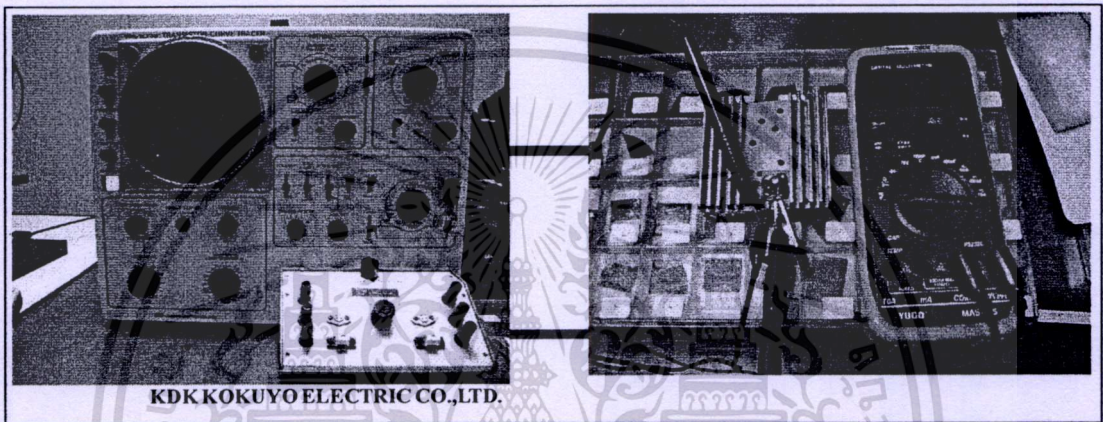


รูปที่ 4.1 ผลการวัดค่ากระแสต่อแรงดันโดยป้อนค่าจาก -15 ถึง 2 V

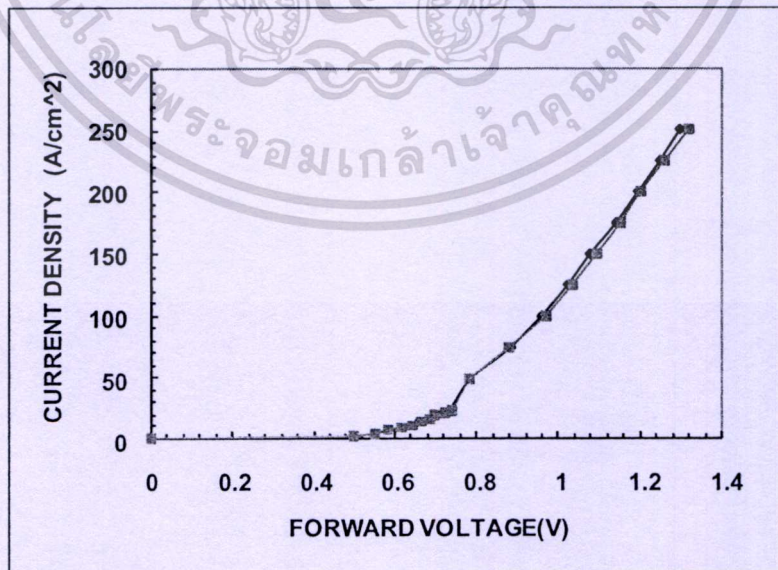
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 พบว่าขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงที่ประมาณ 1 V จะมีกระแสไปข้างหน้าประมาณ 100 mA และเมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ประมาณ 0 ถึง 15 V มีกระแสรั่วที่น้อยในระดับ 0.8 nA ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างมีคุณสมบัติการเป็นไดโอดได้

จากนั้นนำไดโอดไปทำการต่อขั้วและเคลือบอีพอกซีเรซินสีดำแล้วทำการวัดที่กระแสสูงโดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor curve tracer) ของ KDK KOKUYO ELECTRIC CO.,LTD รุ่น TCT-7D Transistor Curve Tracer โดยทำการวัดแบบสี่เส้น (4 wires) แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การวัดค่ากระแสไดโอด เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงโดยเครื่อง KDK KOKUYO ELECTRIC CO.,LTD รุ่น TCT-7D Transistor Curve Tracer



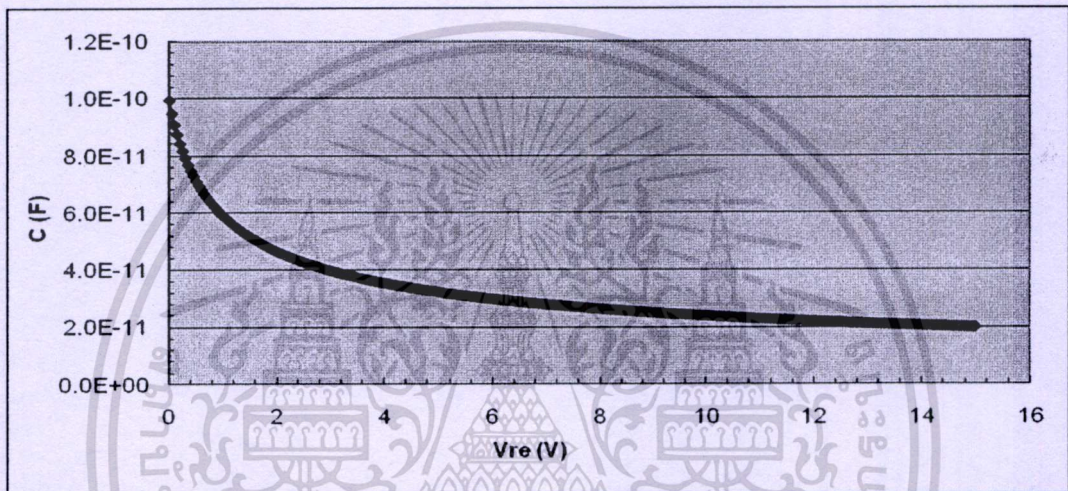
รูปที่ 4.3 ผลการวัดค่าความหนาแน่นกระแสต่อแรงดันขณะได้รับไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่าไดโอดที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นกระแสที่ประมาณ 100 A ที่แรงดันเพียง 1 โวลต์เท่านั้น

4.1.2 ค่าความจุไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้า

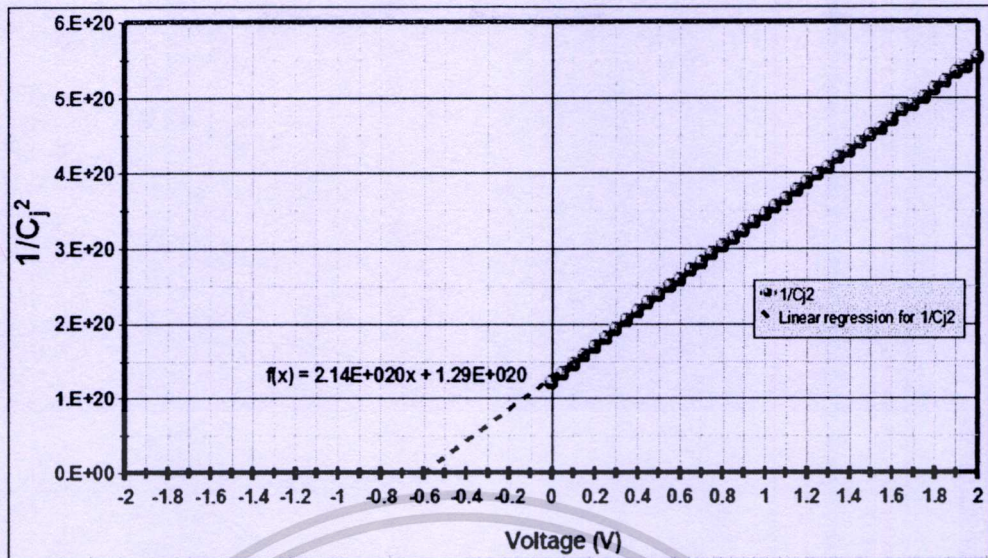
จากนั้นทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อค่าแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาค่า V_{bi} และความต้านทานฐานรอง โดยทำการวัดที่ความถี่ 1 MHz ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.4



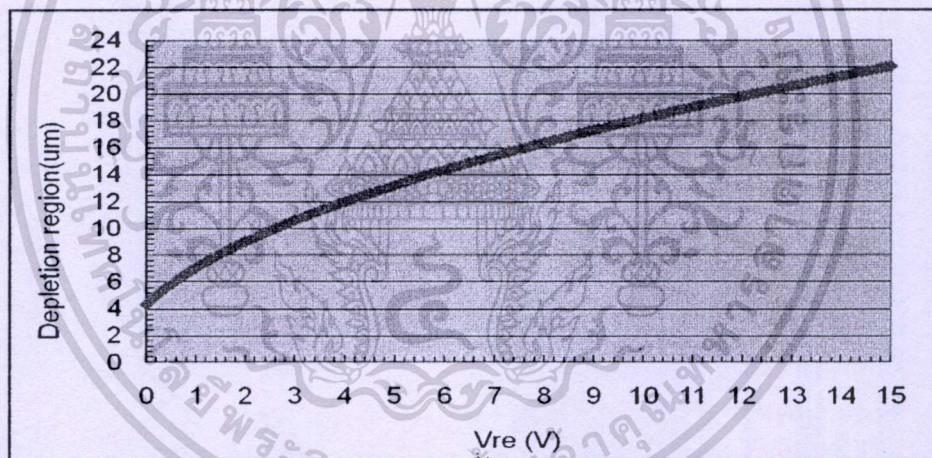
รูปที่ 4.4 ผลการวัดค่าความจุ (C) ต่อค่าแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (V_{re}) ของไดโอด

จากสมการ $C_j = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon N_A}{(V_{bi} \pm V_A)} \right]^{1/2}$ [14] จากนั้นทำการพลอตกราฟ $1/C_j^2$ เพื่อหาค่า V_{bi} ผลการ

วัดค่า $1/C_j^2$ ที่แรงดันไบอัส -2 ถึง 2 V แสดงดังรูปที่ 4.5 จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าค่า V_{bi} เท่ากับ 0.6 V จากนั้นเอาค่า V_{bi} ที่ได้ ไปคำนวณหา N_A จะได้ค่าเท่ากับ $4.19 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นนำค่า N_A ที่ได้ไปทำการหาบริเวณปลอดพาหะจากสมการ (2.31) จะได้ดังรูปที่ 4.6 จากรูปพบว่าเมื่อรอยต่อเข้าสู่ภาวะสมดุล ($V=0$) บริเวณปลอดพาหะมีค่าประมาณ $4 \mu\text{m}$ และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อแรงดันเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลการวัดส่วนกลับค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง ($1/C_j^2$) ต่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ -2 ถึง 2 V



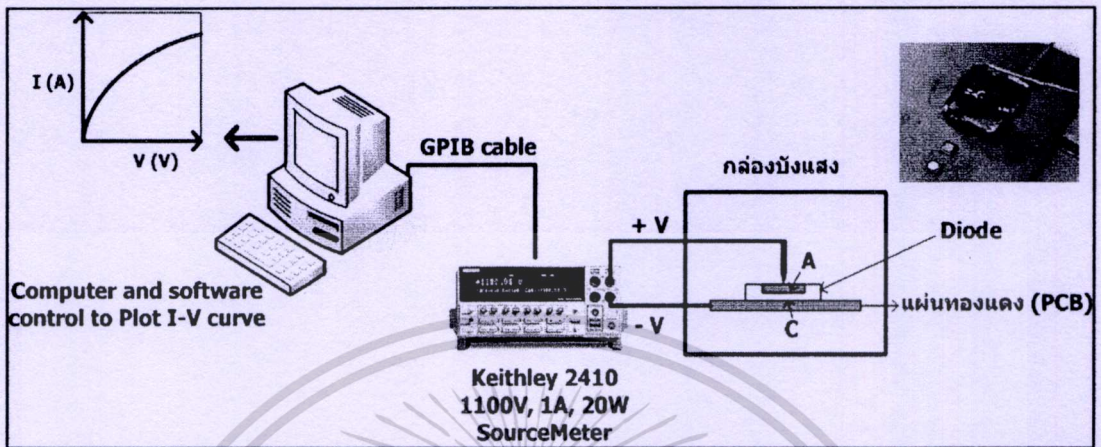
รูปที่ 4.6 ผลการคำนวณหาค่าบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) ต่อแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (V_{re}) ที่ 0 ถึง 15 V

4.2 จำนวนโฟลตดิ่งฟิวลิ่ง (FFR)

การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ได้ทำการออกแบบโครงสร้างของ FFR เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วกับ FFR และแรงดันพังทลายกับ FFR โดยใช้เครื่องมือวัด High voltage ของ Keithley รุ่น 2410 ที่สามารถจ่ายและอ่านค่ากระแสและแรงดันได้ในเครื่องเดียวกัน โดยมีค่าแรงดันสูงสุดที่จ่ายได้คือ 1100 V และกระแสสูงสุดคือ 1 A ที่กำลังสูงสุด 20 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

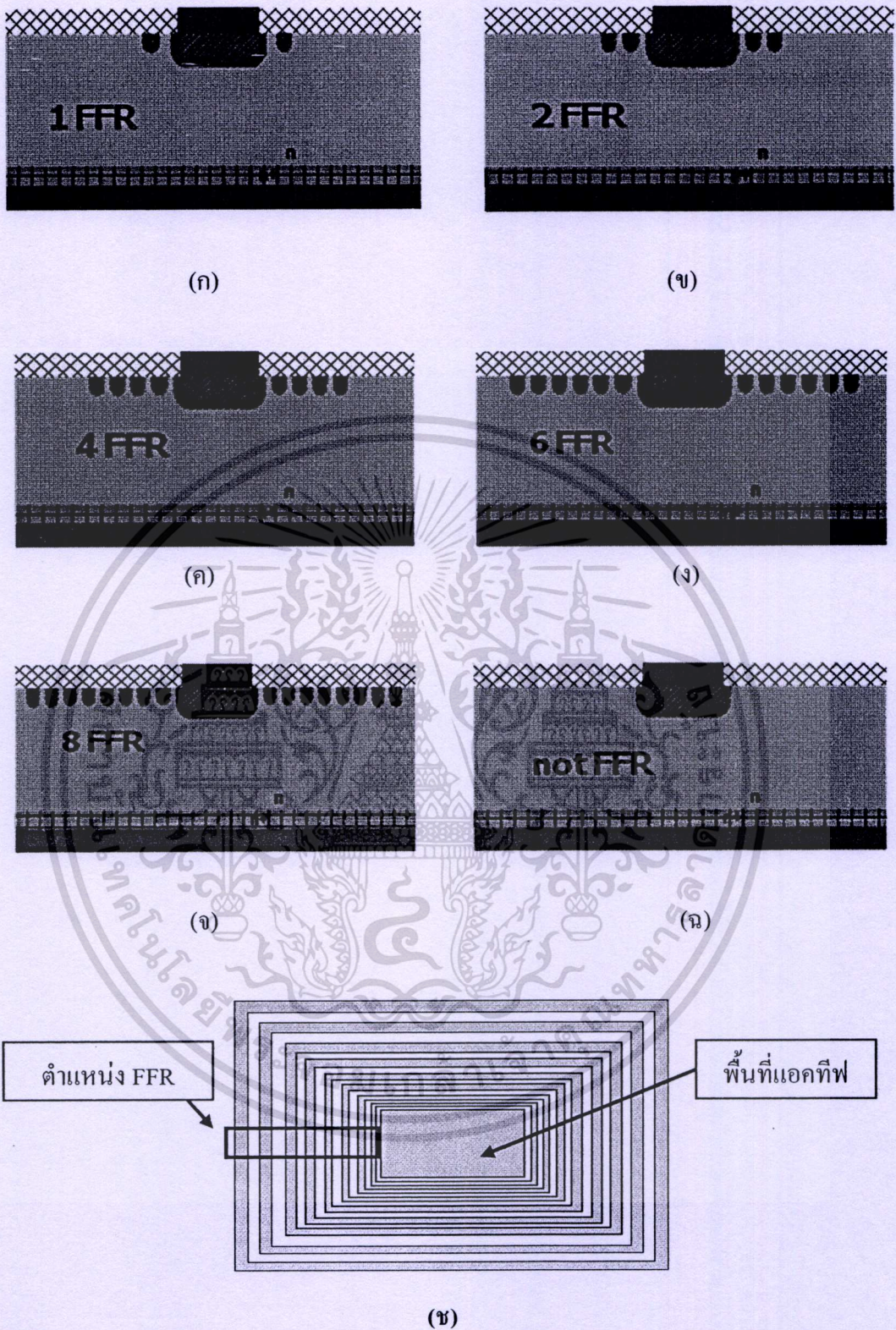
ระบบการวัดค่าแสดงดังรูปที่ 4.7 จากรูปพบว่าระบบการวัดประกอบไปด้วยเครื่องมือวัด High Voltage, กล้องบังแสง, คอมพิวเตอร์และโปรแกรมควบคุมการทำงานและเก็บข้อมูลการวัดค่า



รูปที่ 4.7 ระบบการวัดกระแสต่อแรงดันประกอบไปด้วยเครื่องมือวัด High Voltage, กล้องบังแสง, คอมพิวเตอร์และโปรแกรมควบคุมการทำงานและเก็บข้อมูลการวัดค่า

4.2.1 การทดลองจำนวน FFR ต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย

การสร้าง FFR หลายอัน ทำให้มีการกระจายของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อหลักหรือรอยต่อพี-เอ็น ที่ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดตามลำดับ ในการทดลองจะออกแบบการสร้าง FFR ที่มีขนาดความกว้าง $10\ \mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR ตัวที่หนึ่งคือ $10\ \mu\text{m}$ และระยะห่างแต่ละตัวของ FFR คือ $10\ \mu\text{m}$ โดยทำการยิงฝังประจุพร้อมกับการสร้างขั้วแอโนด ในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนจำนวนของ FFR คือ 1, 2, 4, 6 และ 8 อัน ภาพจำลองโครงสร้างของไดโอดแต่ละเงื่อนไขแสดงดังรูปที่ 4.8 การทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อหาผลของจำนวน FFR ต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลายของไดโอดที่ทำการสร้างขึ้นมา โดยกระบวนการสร้างจะใช้เหมือนกับการสร้างไดโอดที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

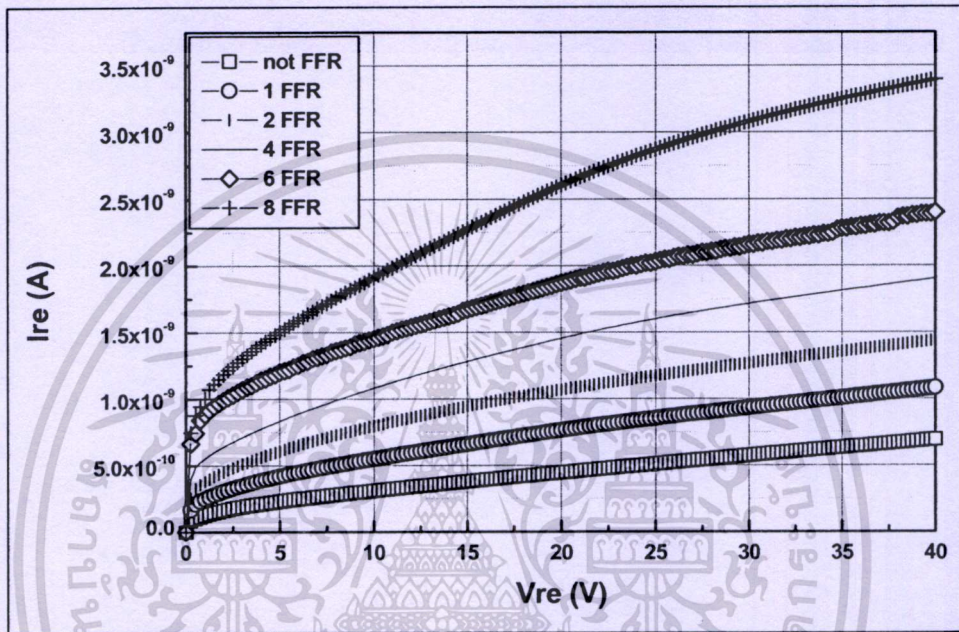


รูปที่ 4.8 ภาพจำลองตำแหน่งการวาง FFR และจำนวน FFR ที่สร้างขึ้น โดย ก) วาง FFR จำนวน 1 อัน ข) วาง FFR จำนวน 2 อัน ค) วาง FFR จำนวน 4 อัน ง) วาง FFR จำนวน 6 อัน ฉ) วาง FFR จำนวน 8 อัน จ) ไม่มี FFR และ (ข) ภาพจำลองด้านบนของการสร้างไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการทดลองจำนวน FFR ต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย

ผลการสร้างไดโอดรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยมีพื้นที่แอคทีฟ (Active) ขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$ กำหนดให้ FFR มีขนาด $10 \text{ }\mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่าง FFR เท่ากับ $10 \text{ }\mu\text{m}$ แล้วทำการปรับเปลี่ยนจำนวน FFR โดยมีค่าเท่ากับ 1, 2, 4, 6 และ 8 อัน ผลการวัดค่ากระแสรั่วต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับที่จำนวน FFR ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 จากรูปพบว่าเมื่อจำนวน FFR เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้กระแสรั่วมีค่ามากขึ้น

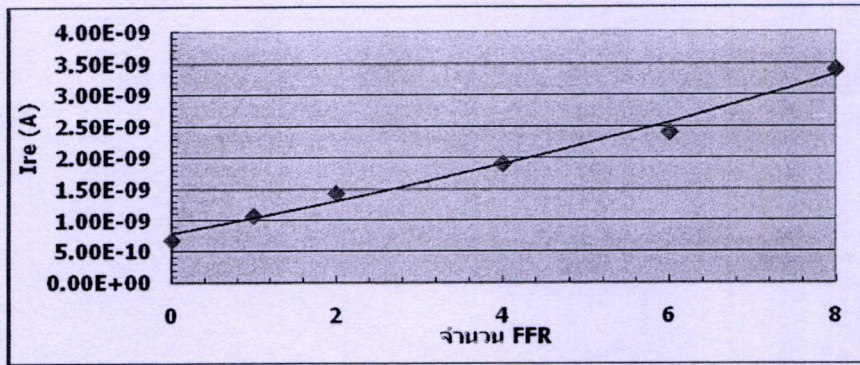


รูปที่ 4.9 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) โดยป้อนค่า 0 ถึง 40 V โดยมีจำนวน FFR เท่ากับ ไม่มี, 1, 2, 4, 6 และ 8 อัน

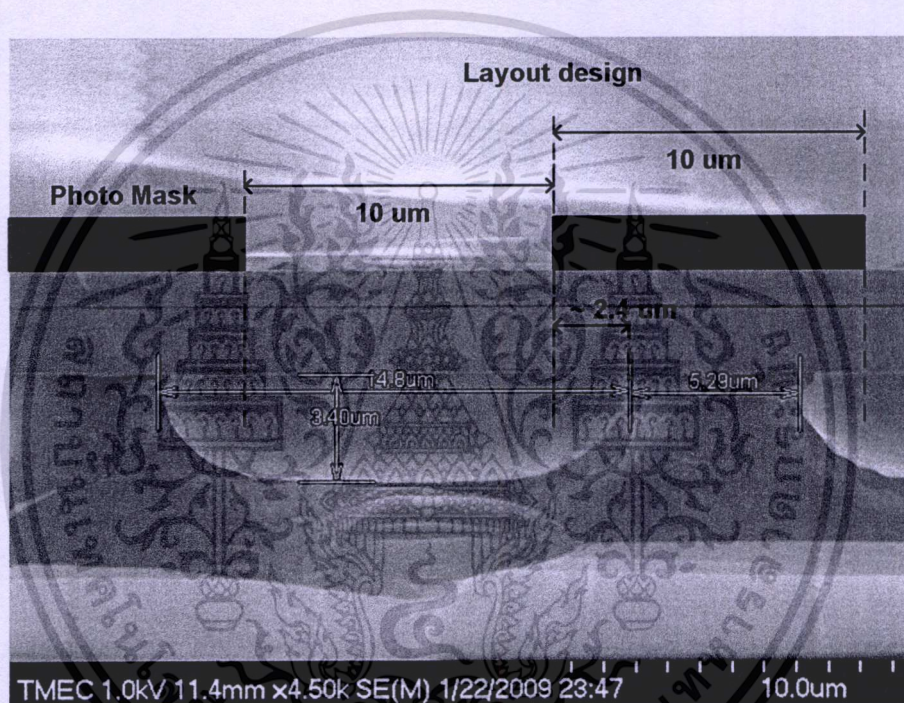
ตารางที่ 4.1 ค่ากระแสรั่วและจำนวน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40 V

จำนวน FFR (อัน)	กระแสรั่ว (A)
0	6.93E-10
1	1.08E-09
2	1.44E-09
4	1.90E-09
6	2.41E-09
8	3.40E-09

เมื่อทำการพลอตกราฟข้อมูลจากตารางที่ 4.1 ระหว่างค่ากระแสรั่วกับจำนวน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเท่ากับ 40 V แสดงดังรูปที่ 4.10 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟผลการวัดค่ากระแสรั่ว (I_{re}) ต่อจำนวน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40 V



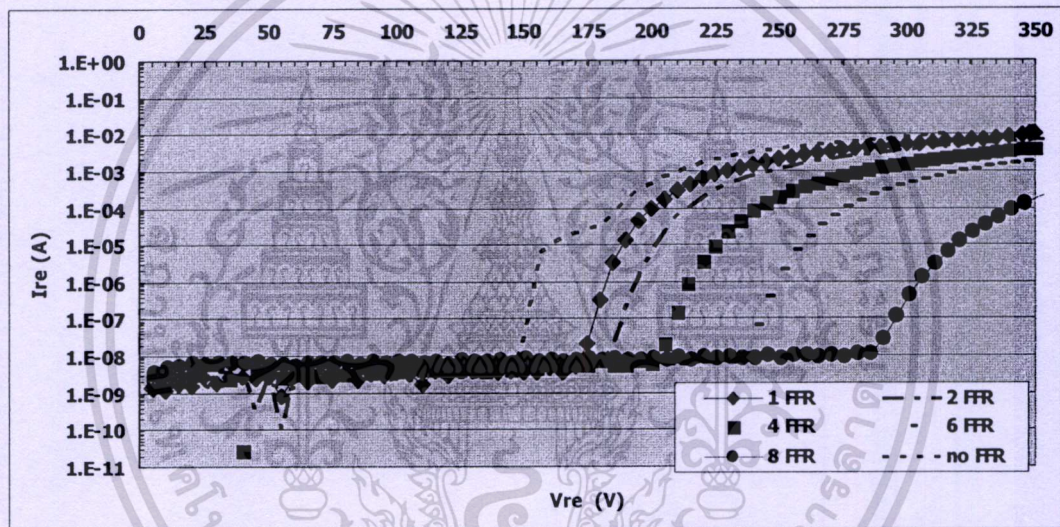
รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวางระยะห่างระหว่าง FFR หลังการ anneal ด้านบนคือ layout design และด้านล่างคือภาพถ่ายด้วย FE-SEM

จากนั้นนำไดโอดไปทำการกัดด้วยกรดไนตริกผสมกับไฮโดรเจนฟลูออไรด์ 10% ในอัตราส่วน 8 ต่อ 2 แล้วแช่เป็นเวลา 15 วินาที ทำความสะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งโดยไนโตรเจน แล้วนำไปทำการวัดด้วยเครื่อง FE-SEM แสดงดังภาพที่ 4.11 จากรูปพบว่าการออกแบบให้มีขนาดของ FFR เท่ากับ 10 μm ด้วยกระจกมาสก์ เมื่อทำกระบวนการเจือสารแล้วเสร็จพบว่าด้านข้างจะแพร่ออกไปประมาณข้างละ 2.4 μm ทำให้ระยะห่างระหว่าง FFR มีค่าเหลือประมาณ 6 μm จากการหาความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อที่ไม่มี FFR พบว่าเมื่อไม่มีแรงดันจ่ายจากภายนอกจะมีบริเวณปลอดพาหะประมาณ 4 μm (รูปที่ 4.6) นั้นหมายความว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อหลักและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FFR แต่ละตัวขยายเข้ามาชนและรวมตัวกันแล้ว เมื่อบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อหลักขยายมาชนกับบริเวณปลอดพาหะของ FFR จะทำให้มีกระแสรั่วเพิ่มขึ้น [20] ดังนั้นเมื่อจำนวน FFR เพิ่มมากขึ้นทำให้มีบริเวณปลอดพาหะมากขึ้นส่งผลให้มีกระแสรั่วมากขึ้น นั่นเอง

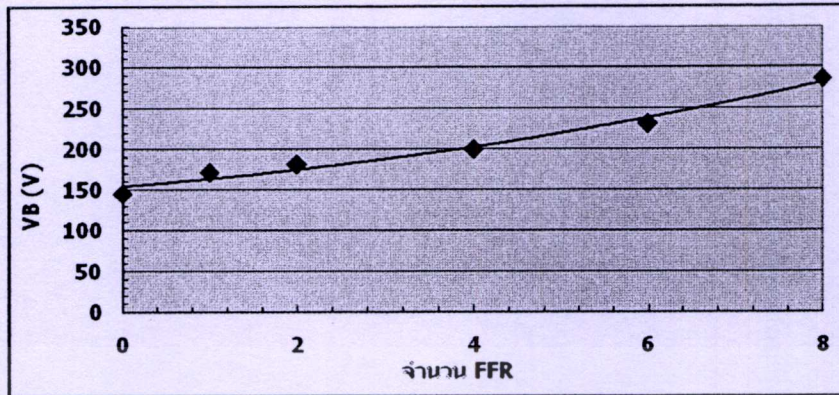
ผลการวัดจำนวน FFR ต่อค่าแรงดันพังทลายแสดงดังรูปที่ 4.12 จากรูปพบว่าเมื่อจำนวน FFR เพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันพังทลายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อจำนวน FFR เพิ่มมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่ FFR แต่ละตัวและที่รอยต่อหลักเองมีค่าลดลง เพราะความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะกระจายแบ่งออกไปตามจำนวน FFR ที่เพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นสนามไฟฟ้าลดลงส่งผลให้อัตราการเกิด impact ionize ของกระแสรั่วลดลง เมื่อปริมาณกระแสรั่วลดลงทำให้แรงดันพังทลายมีค่ามากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.12 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (I_{re}) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (V_{re}) ที่จำนวน FFR เท่ากับ 1, 2, 4, 6, 8 อัน และไม่มี FFR

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันพังทลายและจำนวน FFR เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ

แรงดันพังทลาย (V)	จำนวน FFR (อัน)
146	0
171	1
181	2
200	4
231	6
286	8

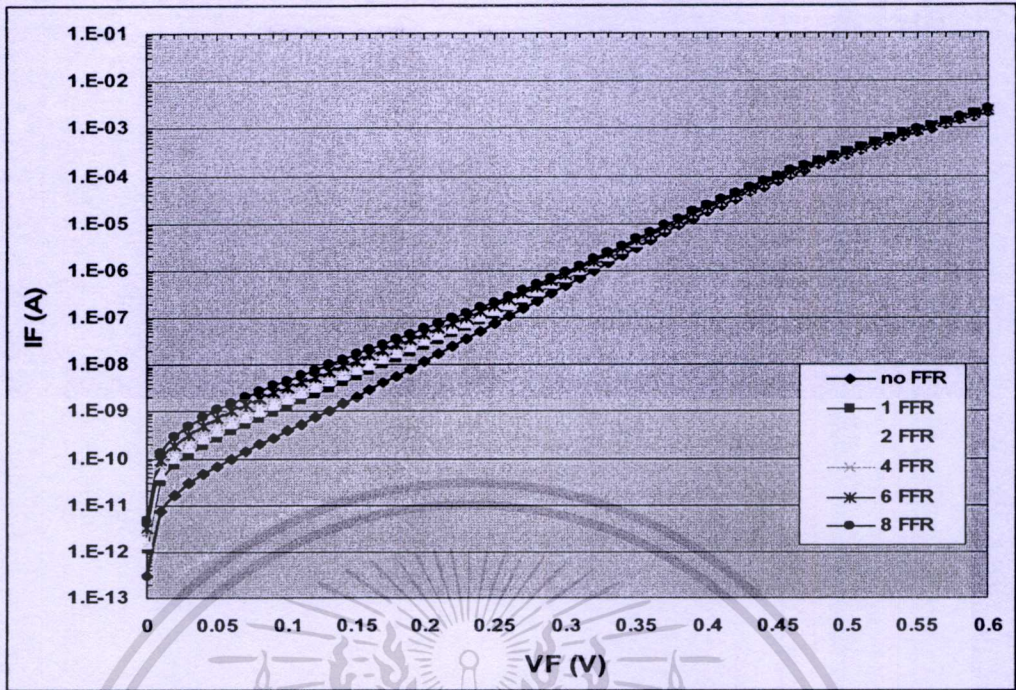


รูปที่ 4.13 กราฟค่าแรงดันพังทลาย (VB) ต่อจำนวน FFR ที่ 0, 1, 2, 4, 6 และ 8 อัน

เมื่อทำการพลอตกราฟข้อมูลจากตารางที่ 4.2 ระหว่างค่าแรงดันพังทลายกับจำนวน FFR ที่ 0, 1, 2, 4, 6 และ 8 อัน แสดงดังรูปที่ 4.13 จากรูปพบว่าแรงดันพังทลาย (VB) เพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวน FFR เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของแรงดันพังทลายต่อจำนวน FFR เนื่องจากบริเวณปลดพาหะของรอยต่อหลักและ FFR ต่อกันทั้งหมด ดังนั้นเมื่อจำนวน FFR เพิ่มมากขึ้นความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะเบี่ยงเบนไปยัง FFR ต่างๆ [20] เมื่อจำนวน FFR มีมาก ทำให้การกระจายสนามไฟฟ้าได้ดีกว่าและมุมของแต่ละรอยต่อจะมีความหนาแน่นสนามไฟฟ้าน้อยกว่าที่มีจำนวน FFR น้อยๆ เมื่อความหนาแน่นสนามไฟฟ้าน้อย ส่งผลให้แรงดันพังทลายของรอยต่อมีค่ามากยิ่งขึ้นนั่นเอง

ไดโอดที่มี FFR เมื่อนำมาทำการวัดค่ากระแสไปข้างหน้า (Forward Current) ผลการวัดค่ากระแสต่อแรงดันเมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงแสดงดังรูปที่ 4.14 จากรูปพบว่าเมื่อจำนวน FFR เพิ่มมากขึ้น บริเวณปลดพาหะใน ไดโอดจะมีพื้นที่ตามจำนวนของ FFR นั่นคือ เมื่อจำนวน FFR เพิ่มมากขึ้น บริเวณปลดพาหะก็จะมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นกระแสการเกิดและรวมตัวใหม่ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจึงมีค่ามากกว่าที่จำนวน FFR น้อยๆ ที่แรงดันไฟฟ้าค่าน้อยๆ ประมาณ 0 ถึง 0.4 V จะพบว่าผลของกระแสการเกิดและรวมตัวใหม่จะมีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.4 V ขึ้นไป ทำให้ปริมาณกระแสมีค่าเท่ากัน เนื่องจากเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น บริเวณปลดพาหะจะลดลงและหมดไป ดังนั้นปริมาณกระแสทั้งหมดจะเกิดการแลกเปลี่ยนที่รอยต่อหลักเท่านั้น ในการออกแบบรอยต่อหลักของไดโอดแต่ละตัวจะมีค่าที่เท่ากัน และใช้ฐานรองเดียวกันทำให้การฉีดระดับสูงและผลของความต้านทานอนุกรมมีค่าเท่ากัน สมการความหนาแน่นกระแสการเกิดและรวมตัวใหม่ในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง แสดงดังสมการที่ 2.32 เมื่อ W มีค่ามากขึ้นในกรณีที่มี FFR หลายตัว จะทำให้ความหนาแน่นกระแสมากขึ้นตามขนาดของ W ดังนั้นเมื่อ FFR เพิ่มมากขึ้นทำให้ W มากขึ้น ส่งผลให้กระแสการรวมตัวใหม่มากขึ้นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



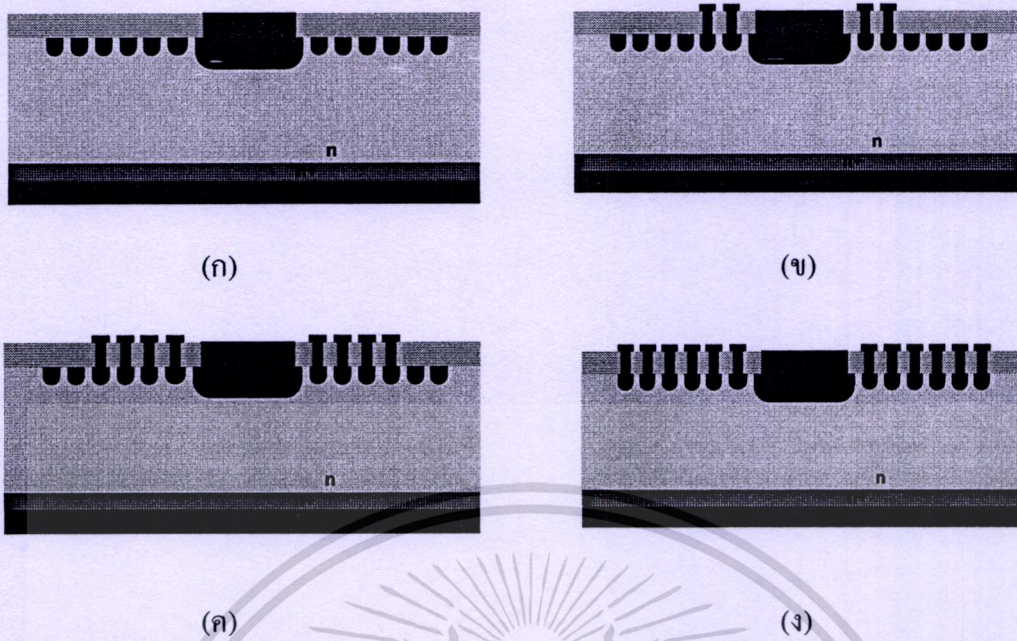
รูปที่ 4.14 กราฟกระแสไปข้างหน้า (IF) ต่อแรงดันไบอัสตรง (VF) ที่จำนวน FFR เท่ากับ 0, 1, 2, 4, 6 และ 8 อัน ที่แรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.6 V

4.3 การเพิ่มโลหะบน FFR

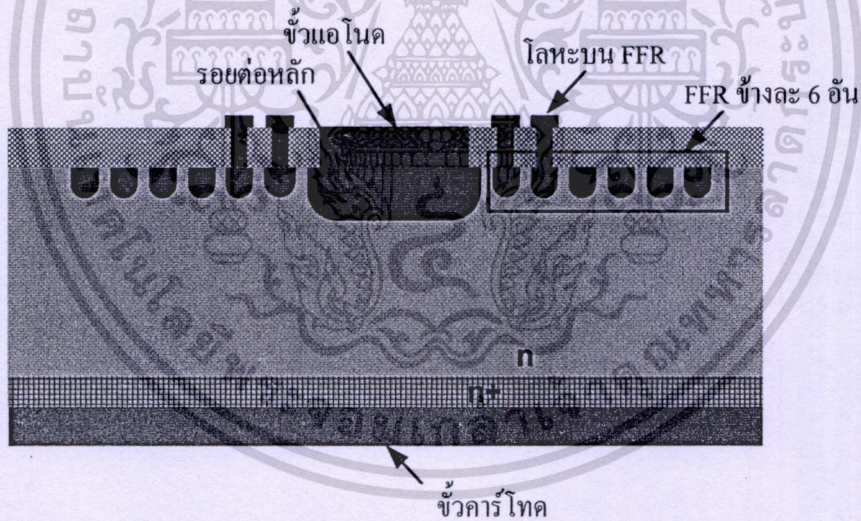
4.3.1 การทดลองเพิ่มขึ้นโลหะบน FFR

การเพิ่มจำนวน FFR ทำให้แรงดันพังทลายมากขึ้น แต่กระแสรั่วก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน การเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงหาแนวทางการลดปริมาณกระแสรั่ว โดยทดลองทำการสร้างโลหะบน FFR เพราะถ้ามีโลหะบน FFR จะช่วยในการดักประจุที่วิ่งอยู่ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน รวมทั้งประจุที่ผิว [21] ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโลหะมากขึ้น กระแสรั่วควรที่จะลดลง ดังนั้นจึงทำการทดลองสร้างโลหะบน FFR เพื่อดูผลต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย

การทดลองจะออกแบบให้อุปกรณ์ไดโอดมีรูปทรงสี่เหลี่ยม มีพื้นที่แอคทีฟขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$ กำหนดให้ FFR มีขนาด $10 \text{ }\mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่าง FFR เท่ากับ $10 \text{ }\mu\text{m}$ และจำนวน FFR เท่ากับ 6 อัน แล้วทำการปรับเปลี่ยนจำนวนโลหะบน FFR เริ่มจากไม่มี, 2, 4 และ 6 อัน แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยการนับ FFR จะนับด้านขวาหรือซ้ายด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อ เนื่องจากการสร้างจริงจะเป็น FFR ด้านตรงข้ามจะเป็นเส้นเดียวกัน ส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ในการสร้างโลหะบน FFR แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งการวางโลหะบน FFR ซึ่งจำนวน FFR เท่ากับ 6 อัน โดยที่ (ก) ไม่มีโลหะ (ข) มีโลหะบน FFR 2 อัน (ค) มีโลหะบน FFR 4 อัน และ (ง) มีโลหะบน FFR 6 อัน



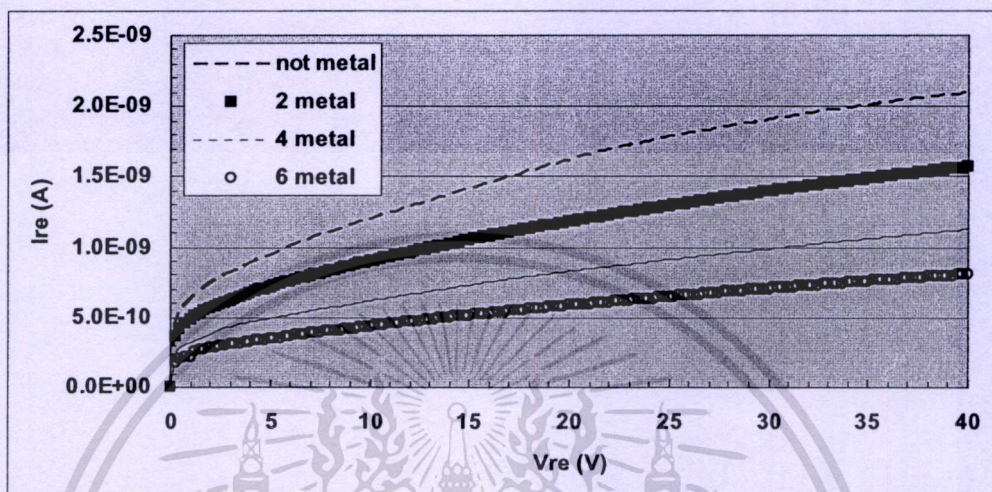
รูปที่ 4.16 ภาพจำลองตำแหน่งการวางโลหะบน FFR และส่วนประกอบต่างๆ ในโครงสร้างไดโอด

4.3.2 ผลการทดลองเพิ่มขึ้นโลหะบน FFR

ผลการสร้างไดโอดรูปทรงสี่เหลี่ยม มีพื้นที่แอคทีฟขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$ กำหนดให้ FFR มีขนาด $10 \mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่าง FFR เท่ากับ $10 \mu\text{m}$ และจำนวน FFR เท่ากับ 6 อัน

ผลการวัดค่ากระแสรั่วที่จำนวนโลหะบน FFR ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.17 จากรูปพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนโลหะบน FFR เพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสรั่วมีค่าลดลง เนื่องจากโลหะบน FFR จะช่วยในแง่การนำไฟฟ้าที่ลดลง อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดักประจุที่วิ่งอยู่บนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน (I_{INTER}) กระแสการเกิดและรวมตัวใหม่บริเวณปลดพาหะ (I_0) รวมทั้ง ไอออนที่เกิดขึ้นในชั้นฉนวนเอง (I_{SURF}) [21] ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโลหะมากขึ้น กระแสรั่วของรอยต่อหลักก็จะลดลง

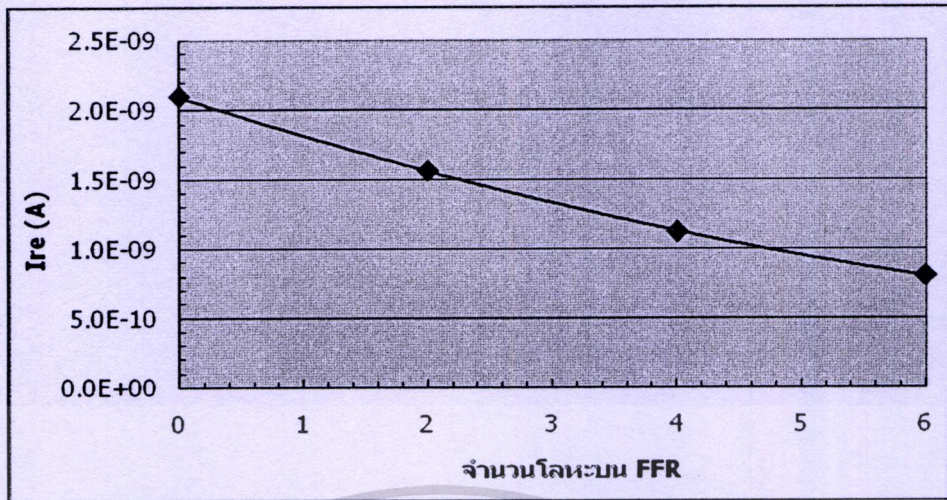


รูปที่ 4.17 ผลการวัดค่ากระแสรั่วที่แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า 0 ถึง 40 โวลต์ โดยมีจำนวนโลหะบน FFR เท่ากับ 2, 4, 6 และ ไม่มีโลหะบน FFR

เมื่อทำการพลอตกราฟข้อมูลจากตารางที่ 4.3 ระหว่างค่ากระแสรั่วกับจำนวนโลหะบน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเท่ากับ 40 V แสดงดังรูปที่ 4.18 จากรูปพบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40 V กระแสรั่ว (I_{re}) เทียบกับจำนวนโลหะบน FFR ที่ 2, 4, 6 และ ไม่มี จะพบว่าเมื่อจำนวนโลหะเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้กระแสรั่วมีแนวโน้มลดลง

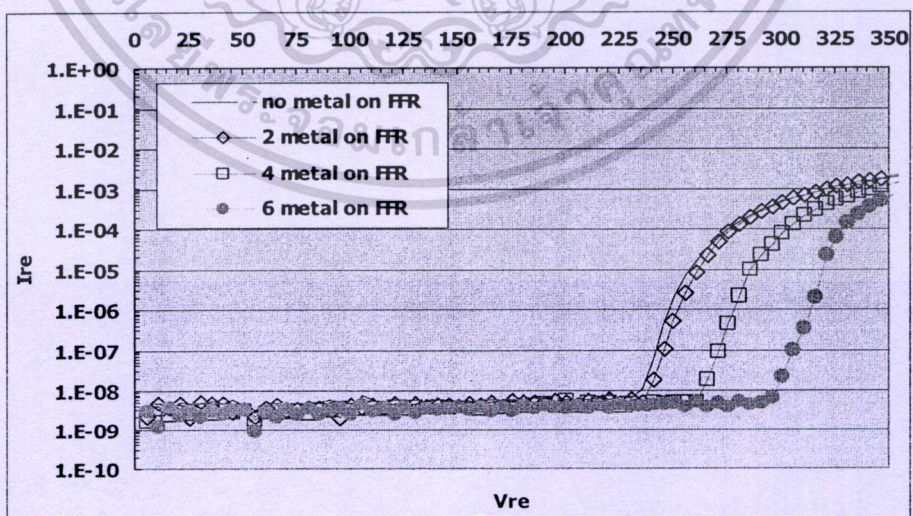
ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสรั่วและจำนวนโลหะบน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40 V

จำนวนโลหะบน FFR (อัน)	กระแสรั่ว (A)
0	2.09863E-09
2	1.56926E-09
4	1.1258E-09
6	8.05662E-10



รูปที่ 4.18 กราฟผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อจำนวน โลหะบน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ 40 V

ผลการวัดค่าแรงดันพังทลายที่จำนวนโลหะบน FFR ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.19 จากรูปพบว่าเมื่อจำนวนโลหะบน FFR เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แรงดันพังทลายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโลหะบน FFR จะช่วยในการดักประจุที่วิ่งอยู่บนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน กระแสการเกิดและรวมตัวใหม่บริเวณปลดพาหะ รวมทั้งไอออนที่เกิดขึ้นในชั้นฉนวนเอง ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโลหะมากขึ้นกระแสรั่วจะลดลง ทำให้แรงดันพังทลายเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอัตราการเกิด impact ionize ลดลง



รูปที่ 4.19 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) ที่จำนวน โลหะบน FFR เท่ากับ 2, 4, 6 อัน และ ไม่มี

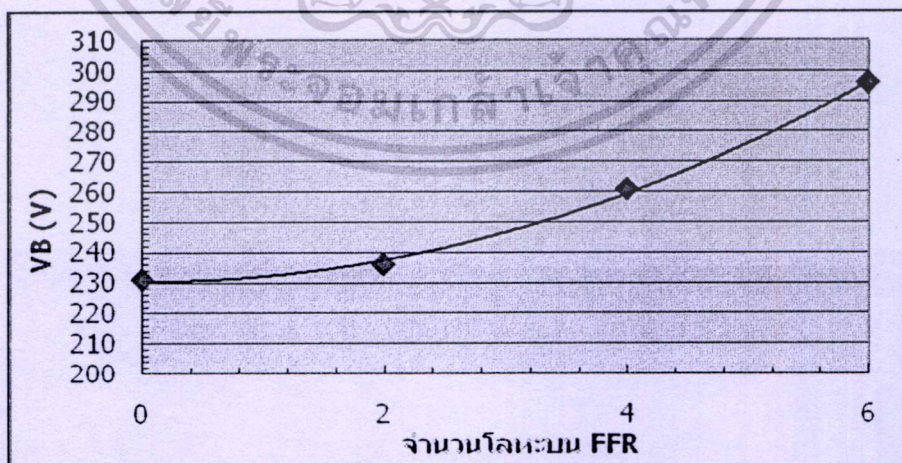
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพลอตกราฟข้อมูลจากตารางที่ 4.4 ระหว่างค่าแรงดันพังทลายกับจำนวน โลหะบน FFR แสดงดังรูปที่ 4.20 จากรูปพบว่า การเพิ่มขึ้นของจำนวน โลหะบน FFR ทำให้แรงดันพังทลายมากขึ้น

จากรูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะเกิดกระแสรั่วจากประจุที่วิ่งอยู่บนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน ประจุการเกิดและรวมตัวใหม่บริเวณปลดพาหะ รวมทั้งประจุที่เกิดขึ้นในชั้นฉนวนเอง กรณีที่ไม่มี FFR พบว่ากระแสทั้งหมดจะไหลเข้ารอยต่อหลักเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 4.21 (ก) ทำให้ปริมาณกระแสรั่วมีจำนวนมาก แต่จะน้อยกว่ากรณีที่มี FFR เนื่องจากเมื่อมี FFR ทำให้พื้นที่บริเวณปลดพาหะมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณกระแสรั่วมากกว่าไม่มี FFR เมื่อทำการเพิ่มโลหะบน FFR ประจุบางส่วนจะวิ่งเข้าสู่ FFR โดยประจุที่วิ่งเข้าสู่โลหะบน FFR จะเกิดการรวมตัวกับประจุที่บริเวณ FFR ทำให้เกิดการรวมตัวกัน ส่งผลให้ประจุที่เป็นกระแสรั่วรวมลดลง ดังนั้นเมื่อมีโลหะเพิ่มมากขึ้นก็จะเกิดการรวมตัวบริเวณ FFR มากขึ้น ส่งผลให้กระแสรั่วลดลงเมื่อจำนวนโลหะบน FFR มากขึ้น

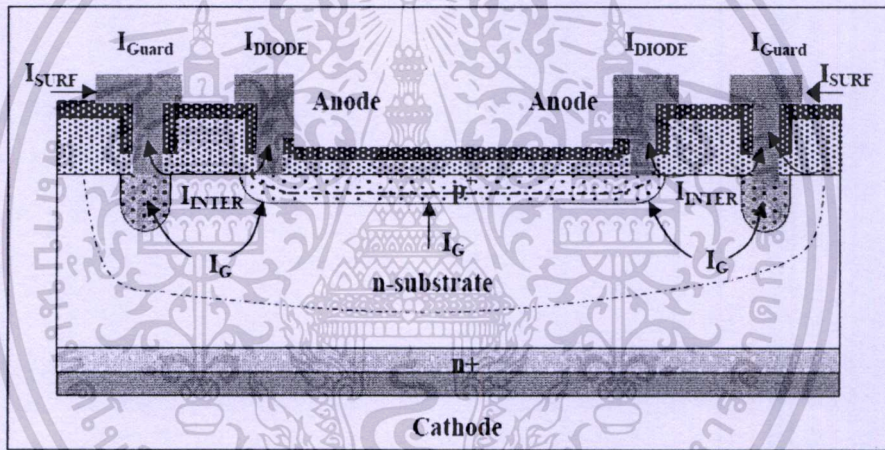
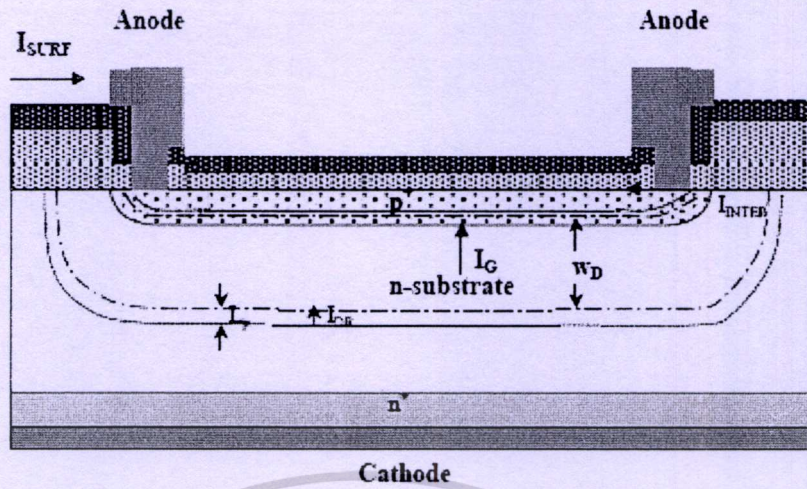
ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันพังทลายและจำนวน โลหะบน FFR เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

แรงดันพังทลาย (V)	จำนวนโลหะบน FFR (อัน)
231	0
236	2
261	4
296	6



รูปที่ 4.20 กราฟผลการวัดค่าแรงดันพังทลาย (VB) ต่อจำนวน โลหะบน FFR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ตำแหน่งการเกิดกระแสรั่วต่างๆ และทิศทางการกระจายตัวของกระแสรั่วเมื่อมี (ก) ไม่มี FFR และ (ข) มีโหนดอยู่บน FFR [21]

4.4 ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR

ในการสร้างไดโอดที่ผ่านมาพบว่า แรงดันพังทลายของไดโอดมีค่าประมาณ 296 V ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ต้องการ ดังนั้นการสร้างที่ระยะห่างของ FFR และรอยต่อหลักที่ 10 μm อาจยังไม่ใช่เงื่อนไขที่เหมาะสม ดังนั้นจึงทำการทดลองหาค่าระยะห่างต่อค่าแรงดันพังทลาย เพื่อเพิ่มแรงดันพังทลายของไดโอด โดยทำการสร้างที่ระยะ 5, 10 และ 15 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 การทดลองหาระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR ต่อค่าแรงดันพังทลาย

การทดลองนี้จะทำการออกแบบระยะห่างเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายกับระยะห่างของ FFR โดยทำการสร้างไดโอดรูปทรงสี่เหลี่ยม มีพื้นที่แอคทีฟขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$ กำหนดให้ FFR มีขนาด $10 \text{ }\mu\text{m}$ ทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่าง FFR มีค่าเท่ากับ 5, 10 และ $15 \text{ }\mu\text{m}$ ทำการทดลองที่จำนวน FFR เพียงอันเดียวโครงสร้างและตำแหน่ง FFR แสดงดังรูปที่ 4.22 ระยะห่างของ FFR กับรอยต่อหลักมีผลต่อค่าแรงดันพังทลายอย่างไร ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมรอยต่อหลักและ FFR มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.73) คือ

$$(V_M - V_F) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} \left[\left(\frac{W_s^2 - r_d^2}{2} \right) + r_d^2 \ln \left(\frac{r_d}{r_j} \right) \right]$$

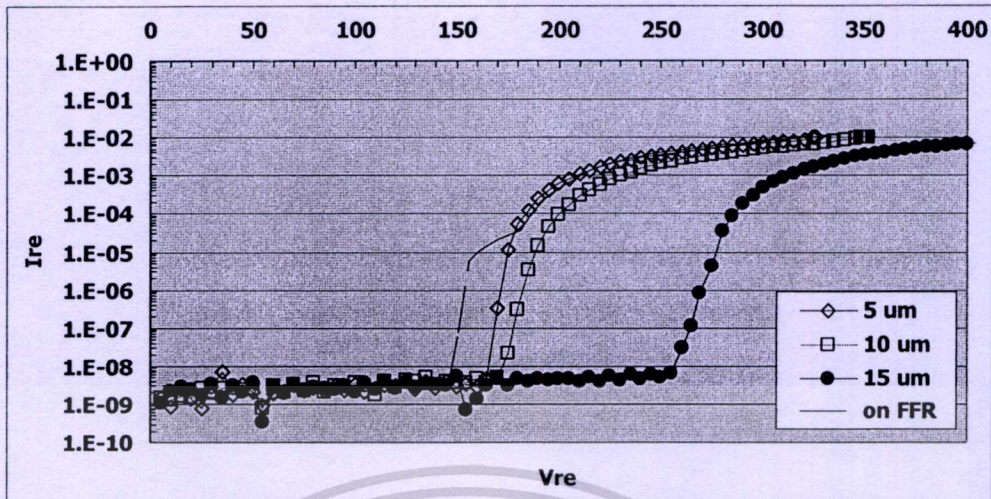
สมการนี้อธิบายไว้ในบทที่ 2 จากสมการพบว่าแรงดันพังทลาย (V_M) ที่รอยต่อหลักมีความสัมพันธ์กับระยะห่าง W_s ในรูปยกกำลังสอง



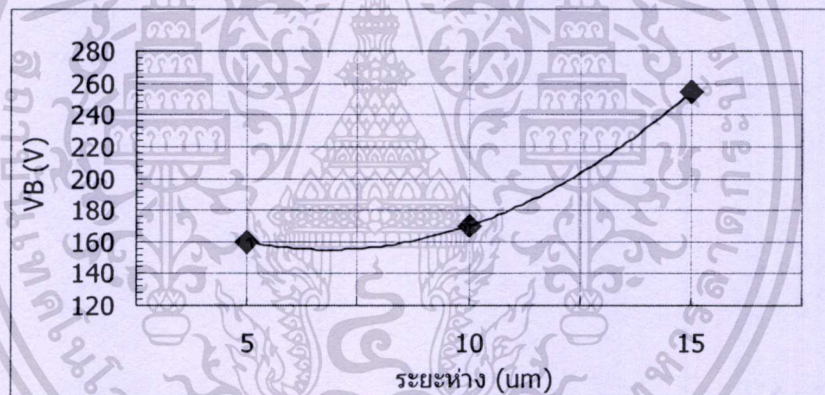
รูปที่ 4.22 ภาพจำลองโครงสร้างและตำแหน่งการวาง FFR ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนระยะห่าง (Spacing) มีค่า 5, 10 และ $15 \text{ }\mu\text{m}$

4.4.2 ผลการทดลองหาระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR ต่อค่าแรงดันพังทลาย

ผลการสร้างไดโอดโดยมีพื้นที่แอคทีฟขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$ กำหนดให้ FFR มีขนาด $10 \text{ }\mu\text{m}$ จำนวน FFR 1 อัน ทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่าง FFR กับรอยต่อหลัก เท่ากับ 5, 10 และ $15 \text{ }\mu\text{m}$ รวมทั้งไม่มี FFR ผลการวัดค่าแรงดันพังทลายที่ระยะห่างดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.23 จากรูปพบว่าเมื่อระยะห่างมีค่า 5, 10 และ $15 \text{ }\mu\text{m}$ จะมีแรงดันพังทลายที่ 160, 170 และ 255 V ตามลำดับ เมื่อทำการพลอตกราฟระหว่างค่าแรงดันพังทลายกับระยะห่างของ FFR กับรอยต่อหลักที่ได้ออกแบบไว้จะแสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (I_{re}) ต่อค่าแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ (V_{re}) ที่ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR มีค่าเท่ากับ 5, 10, 15 μm และไม่มี FFR



รูปที่ 4.24 ผลการวัดค่าแรงดันพังทลาย (V_B) ต่อค่าระยะห่างระหว่าง FFR กับรอยต่อหลักที่ได้ ออกแบบไว้โดยมีระยะห่างเท่ากับ 5, 10 และ 15 μm

จากรูปพบว่าแรงดันพังทลายที่ระยะห่าง 15 μm มีค่าแรงดันพังทลายมากที่สุด ดังนั้นเราจะเลือกที่ระยะ 15 μm ไปทำการทดลองต่อไป โดยจะทำการสร้างไดโอดที่มีจำนวน FFR จำนวน 8 อัน มีระยะห่างเท่ากับ 15 μm และขนาดของ FFR เท่ากับ 10 μm

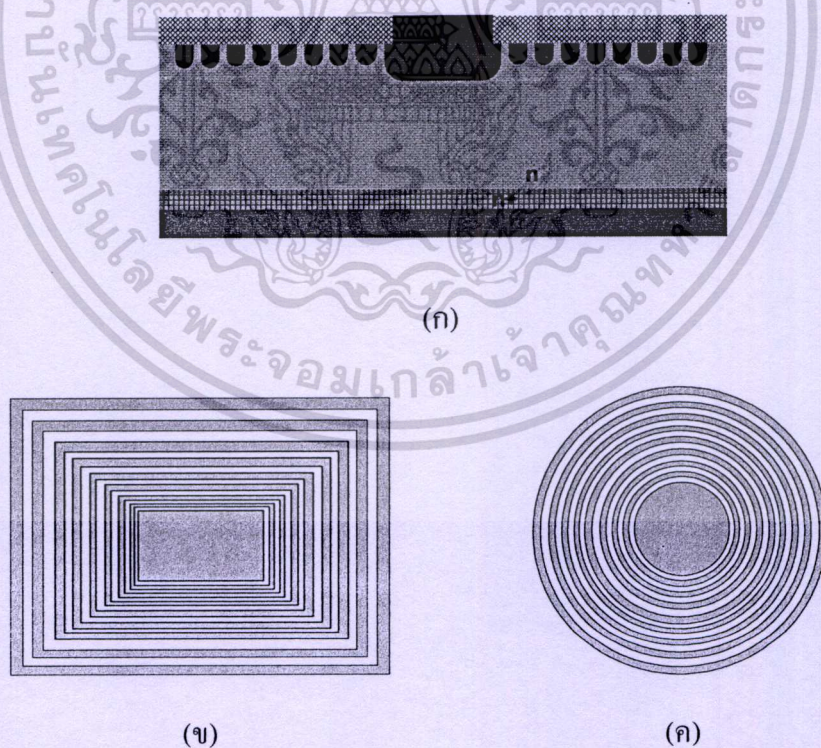
รูปทรงการสร้างเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่มีผลต่อค่าแรงดันพังทลาย ดังนั้นจึงทำการสร้างไดโอดสองรูปทรงคือ ทรงกลมและทรงสี่เหลี่ยม

4.5 รูปทรงการสร้าง

รูปทรงในการสร้างไดโอดมีผลต่อค่าแรงดัน เพราะมุมในการสร้างมีผลต่อค่าการเกิดความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า (Electric Field) บริเวณมุม ที่มีผลทำให้เกิดการพังทลายของรอยต่อ เพราะบริเวณมุมจะมีปริมาณกระแสรั่วมากหรือมีความหนาแน่นของกระแสมากนั่นเอง และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์พังทลายที่เกิดจากมุมนี้เรียกว่า “Curvature Effect” ดังนั้นรูปทรงที่มีมุมเกิดขึ้นมากก็มีโอกาสการเกิด Curvature effect มากขึ้นด้วย การทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบการสร้างไดโอดรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลมเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันพังทลายของทั้งสองรูปทรง

4.5.1 การทดลองเปรียบเทียบรูปทรงสี่เหลี่ยมกับทรงกลมต่อค่าแรงดันพังทลาย

การทดลองสร้างไดโอดทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลมเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันพังทลายของทั้งสองรูปแบบ ทำการออกแบบรูปทรงการสร้างบนพื้นฐาน FFR จำนวน 8 ตัว และระยะห่างระหว่าง FFR มีค่า $15\ \mu\text{m}$ ซึ่งทั้งสองเงื่อนไขมีผลที่น่าพอใจจากการทดลองในข้อ 4.1 และ 4.3 ดังนั้นจึงทำการสร้างไดโอด กำหนดให้ FFR มีขนาด $10\ \mu\text{m}$ ทำการปรับเปลี่ยนรูปทรงการสร้าง โดยทำการสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลมแสดงดังรูปที่ 4.25 โดยมี FFR จำนวน 8 ตัว และระยะห่างระหว่าง FFR มีค่า $15\ \mu\text{m}$



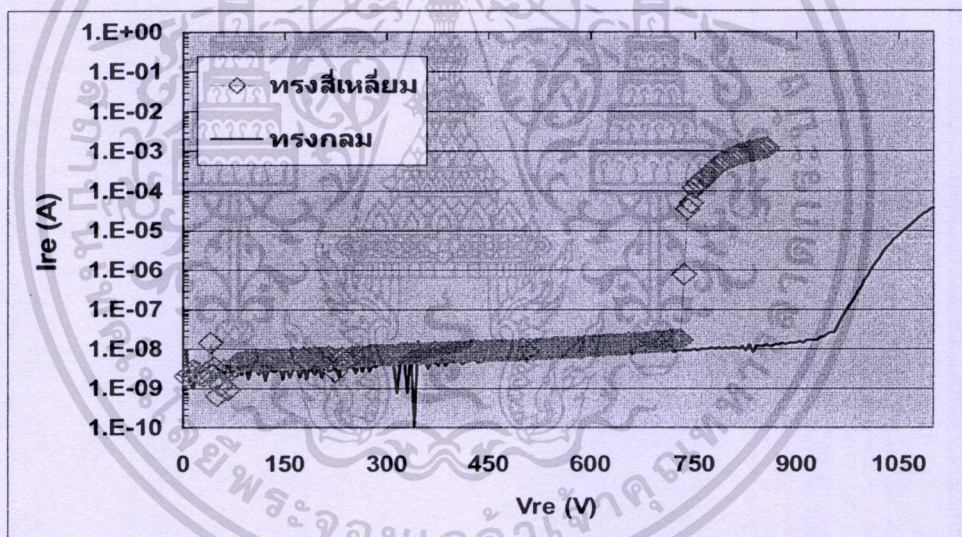
รูปที่ 4.25 ภาพจำลองการทดลอง (ก) ภาพจำลองตัดขวางไดโอด (ข) ภาพจำลองด้านบนทรง

สี่เหลี่ยม (ค) ภาพจำลองด้านบนทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบรูปทรงสี่เหลี่ยมกับทรงกลมต่อค่าแรงดันพังทลาย

ผลการสร้างไดโอดรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลม กำหนดให้ FFR มีขนาด $10\ \mu\text{m}$ จำนวน FFR 8 อัน และระยะห่างระหว่าง FFR เท่ากับ $15\ \mu\text{m}$ ผลการวัดค่ากระแสรั่วต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับของไดโอดรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลม แสดงดังรูปที่ 4.26 จากรูปจะพบว่าทรงสี่เหลี่ยมมีค่าแรงดันพังทลายเท่ากับ $731\ \text{V}$ และทรงกลมมีค่าแรงดันพังทลายเท่ากับ $956\ \text{V}$ ผลของแรงดันพังทลายพบว่าทรงกลมมีค่า V_B ที่มากกว่าทรงสี่เหลี่ยมประมาณ $225\ \text{V}$ เนื่องจากทรงสี่เหลี่ยมมีผลของ Curvature effect บริเวณมุมมากกว่าทรงกลม ทำให้มีค่า V_B ที่น้อยกว่า ดังนั้นการสร้างไดโอดทรงกลมจะให้แรงดันพังทลายที่มากกว่าทรงสี่เหลี่ยมประมาณ $225\ \text{V}$ ดังนั้นการสร้างไดโอดกำลังควรออกแบบให้มีผลของมุนน้อยๆ เช่น การออกแบบปรัศมีมุมให้มีส่วนโค้งมากๆ หรือการสร้างรูปทรงกลม เป็นต้น



รูปที่ 4.26 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) ในการสร้างไดโอดรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกลม

4.6 การสร้างไดโอดทรงกลมที่มี FFR 8 อัน ที่ระยะห่าง 12, 15 และ $18\ \mu\text{m}$

การสร้างไดโอดรูปทรงกลมทำให้ได้ค่าแรงดันพังทลายมากกว่าทรงสี่เหลี่ยม การสร้างไดโอดที่มี FFR จะทำให้มีแรงดันพังทลายมากขึ้น ถ้าทำที่ 1 ถึง 8 อัน จะพบว่า 8 อัน ให้ค่าพังทลายมากที่สุด ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ FFR จำนวน 8 อัน สร้างไดโอดรูปทรงกลม โดยจะทำการสร้างให้

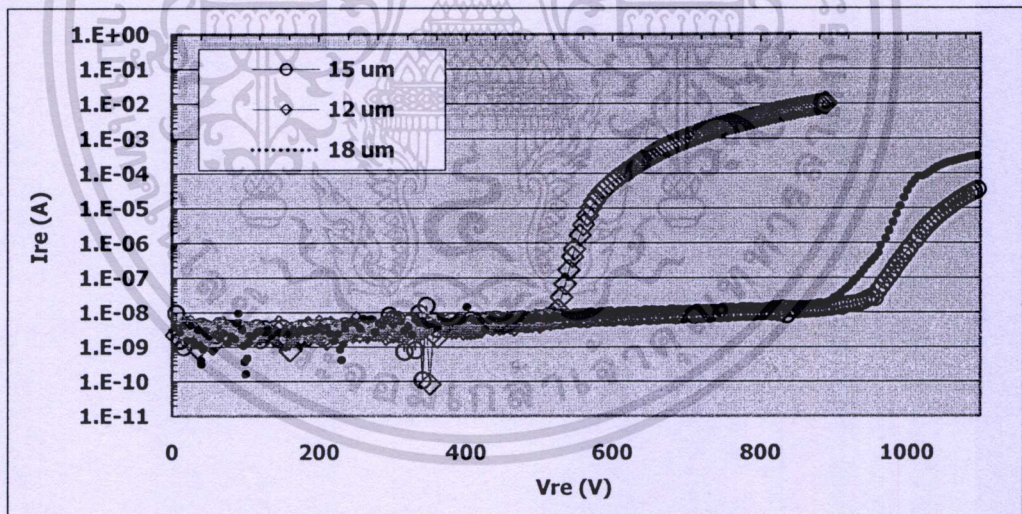
ระยะห่างระหว่าง FFR มีค่ามากกว่าและน้อยกว่า 15 μm เพื่อหาความสัมพันธ์ของระยะห่าง FFR ต่อค่าแรงดันพังทลายที่จำนวน FFR 8 อัน

4.6.1 การทดลองเปรียบเทียบระยะห่างของ FFR ที่ 12, 15 และ 18 μm บนไดโอดทรงกลม และมี FFR 8 อัน

การทดลองสร้างไดโอดทรงกลมทำการออกแบบรูปทรงการสร้างบนพื้นฐาน FFR จำนวน 8 ตัว โดยมีพื้นที่แอคทีฟขนาด 3.143 mm^2 กำหนดให้ FFR มีขนาด 10 μm ทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่าง FFR คือ 12, 15 และ 18 μm โดยมีรูปทรงดังรูปที่ 4.25 (ก) และ (ค)

4.6.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบระยะห่างของ FFR ที่ 12, 15 และ 18 μm บนไดโอดทรงกลม และมี FFR 8 อัน

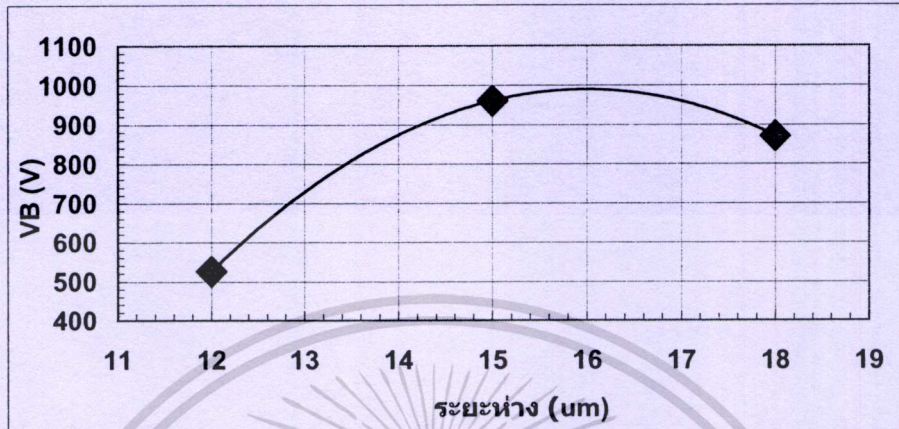
ผลการสร้างไดโอดทรงกลม โดยมี FFR จำนวน 8 ตัว พื้นที่แอคทีฟขนาด 3.143 mm^2 กำหนดให้ FFR มีขนาด 10 μm ทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่าง FFR คือ 12, 15 และ 18 μm ผลการวัดค่ากระแสรั่วต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับ แสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) ในการสร้างไดโอดรูปทรงทรงกลมที่ระยะห่าง FFR มีค่าเท่ากับ 12, 15 และ 18 μm

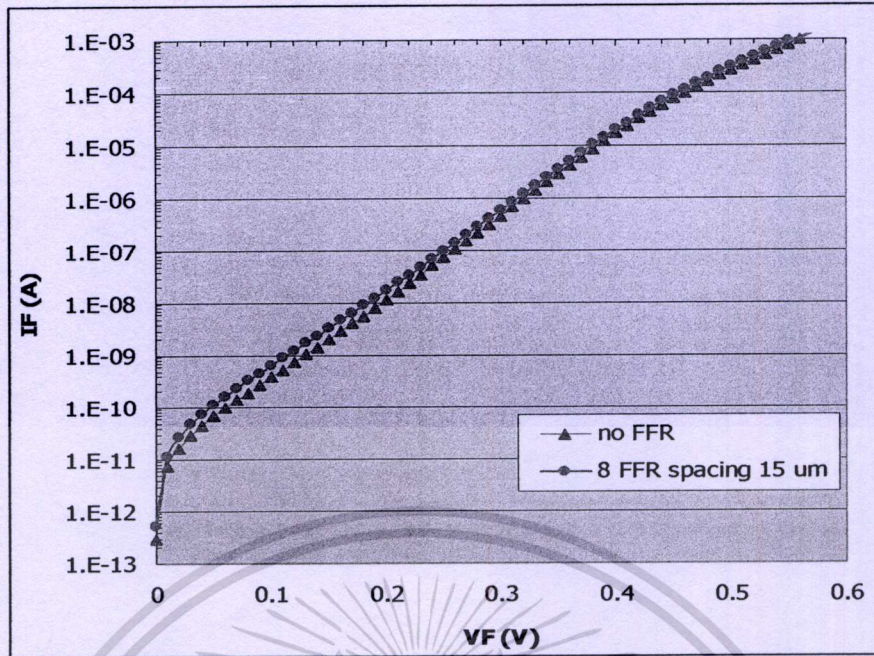
จากการทดลองพบว่าที่ระยะห่าง 12, 15 และ 18 μm มีค่าแรงดันพังทลายเท่ากับ 526, 956 และ 871 โวลต์ ตามลำดับ ดังนั้นที่ระยะห่าง 15 μm มีค่าแรงดันพังทลายมากที่สุดคือ 956 V จากนั้นนำค่า

แรงดันพังทลายของแต่ละตัวมาทำการพลอตค่าแรงดันพังทลายต่อค่าระยะห่างของ FFR ได้กราฟ ดังรูปที่ 4.28

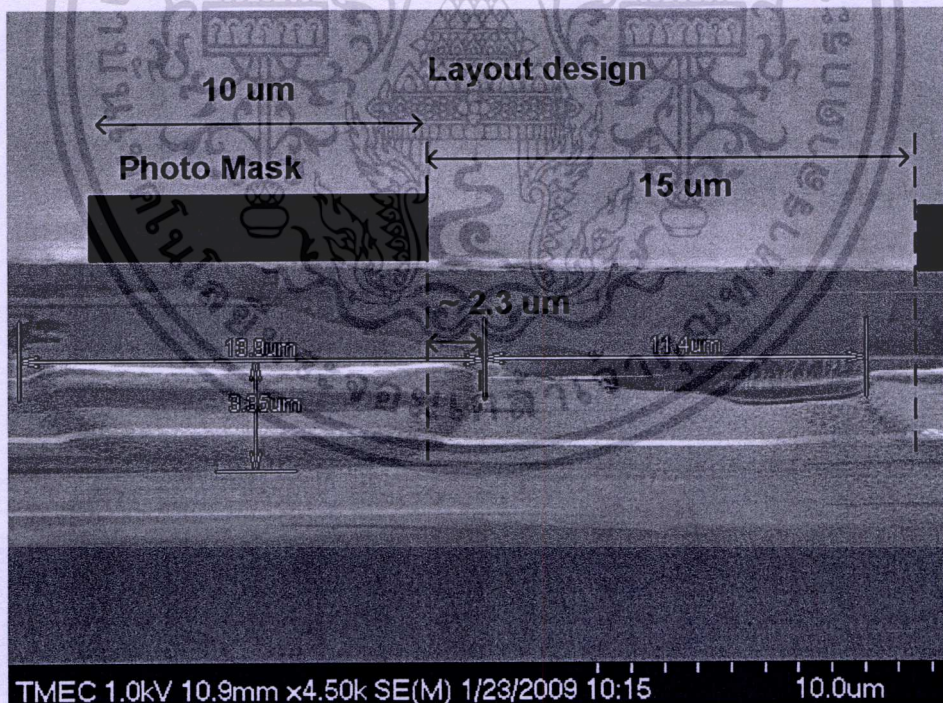


รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลาย (VB) กับระยะห่าง FFR

จากรูปที่ 4.28 พบว่าที่ระยะห่างที่ 15 μm มีค่าที่เหมาะสมในการสร้างไดโอดให้มีค่าแรงดันพังทลายที่มากกว่า 850 V โดยมีค่าแรงดันพังทลายที่ 956 V จากนั้นนำไดโอดดังกล่าวมาทำการวัดค่ากระแสไปข้างหน้าเปรียบเทียบกับไม่มี FFR แสดงดังรูปที่ 4.29 และนำไดโอดดังกล่าวไปทำการส่องกลาดด้วยเครื่อง FE-SEM ภาพถ่ายแสดงดังรูปที่ 4.30 จากภาพพบว่า การออกแบบระยะห่างบนมาสก์ที่ 15 μm เมื่อทำกระบวนการเจือสารแล้วเสร็จจะแพร่ออกไปด้านข้างประมาณ 2.3 μm ดังนั้นทำให้เหลือระยะห่างจริงประมาณ 11.4 μm จากการหาบริเวณปลอดพาหะ (รูปที่ 4.6) พบว่าที่ 0 V มีบริเวณปลอดพาหะเท่ากับ 4 μm ดังนั้นระยะห่าง 11.4 μm จึงไม่ทำให้บริเวณปลอดพาหะของ FFR ขยายเข้าไปชนกับรอยต่อหลัก ดังนั้นกระแสการเกิดและรวมตัวใหม่จึงมีค่าประมาณเท่ากับไม่มี FFR เนื่องจากขนาดของพื้นที่แอคทีฟและบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อหลักเท่ากัน กราฟระหว่างกระแสไปข้างหน้าและแรงดันไบอัสตรงแสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 กราฟกระแสไปข้างหน้า (I_F) ต่อแรงดัน ไบอัสตรง (V_F) ที่ไม่มี FFR และมี FFR จำนวน 8 อัน ที่ระยะห่าง 15 μ m โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 0.6 V



รูปที่ 4.30 ภาพตัดขวางระยะห่างระหว่าง FFR ในการออกแบบมาส์กที่ระยะห่าง 15 μ m ด้านบนคือ ระยะห่าง layout design และด้านล่างคือภาพถ่ายด้วย FE-SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการสร้างไดโอดกำลังโครงสร้าง P^+-N-N^+ แบบมี FFR เพื่อทำการศึกษาผลของ FFR ต่อค่าแรงดันพังทลาย เพื่อสร้าง ไดโอดกำลังที่สามารถทนแรงดันพังทลายได้มากกว่า 850 V

จากการสร้างไดโอดแบบทรงสี่เหลี่ยมไม่มี FFR ที่ความลึกในการเจือสารประมาณ $4 \mu\text{m}$ มีค่าศักย์ภายใน (V_{bi}) เท่ากับ 0.6 V และคำนวณหา N_D ของฐานรองมีค่าเท่ากับ $4.19 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ โดยที่บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 V มีค่าประมาณ $4 \mu\text{m}$ และมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเพิ่มมากขึ้น

การเพิ่มจำนวน FFR ทำให้แรงดันพังทลายเพิ่มมากขึ้น แต่ก็ทำให้กระแสรั่วเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อทำการเพิ่มโลหะบน FFR ทำให้สามารถลดปริมาณกระแสรั่วได้ แต่ยังมีค่าที่มากกว่ากรณีไม่มี FFR

เงื่อนไขการเจือสาร โบรอน โดยวิธียิงฝูประจุที่พลังงาน 120 keV ปริมาณสารเจือ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ แล้วทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 600 นาที พบว่ามีความลึกในการเจือสารประมาณ $4 \mu\text{m}$ มีการแพร่ด้านข้างประมาณ $2.4 \mu\text{m}$ และมีความเข้มข้นสารเจือบริเวณผิวหน้าประมาณ $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR มีผลต่อค่าแรงดันพังทลาย ในการทดลองดังกล่าว ระยะห่างที่เหมาะสมคือ $15 \mu\text{m}$ ในการออกแบบมาส์ก

รูปทรงการสร้างไดโอดมีผลต่อค่าแรงดันพังทลาย โดยที่การสร้างไดโอดที่มีพื้นที่แอคทีฟและ FFR รูปทรงกลม จะมีค่าแรงดันพังทลายมากกว่าทรงสี่เหลี่ยม 225 V

การสร้างไดโอดกำลังโครงสร้าง P^+-N-N^+ แบบมี FFR บนแผ่นเวเฟอร์ขนาด 6 นิ้ว ความเข้มข้นฐานรองมีค่า $4.19 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ทำการสร้างรอยต่อพี-เอ็น ที่ความลึกด้านข้างแอโนดมีค่าประมาณ $4 \mu\text{m}$ ขนาดของ FFR มีค่า $10 \mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่างรอยต่อหลักกับ FFR และระยะห่างระหว่าง FFR มีค่า $15 \mu\text{m}$ ในพื้นที่แอคทีฟทรงกลม จำนวน FFR เท่ากับ 8 อัน มีค่าแรงดันพังทลายเท่ากับ 956 V ที่กระแสรั่ว 20 nA

ดังนั้นการสร้างไดโอดที่เงื่อนไขดังกล่าวสามารถที่จะไดโอดที่มีแรงดันพังทลายที่มากกว่า 850 V ได้ โดยมีกระแสรั่วเพียง 20 nA และยังพบว่าสามารถควบคุมการพังทลายของไดโอดได้จากการสร้าง FFR ได้

งานวิจัยฉบับนี้เป็นพื้นฐานในการสร้างอุปกรณ์กำลังชนิดอื่นๆ ต่อไป ซึ่งการสร้างไดโอดกำลังยังมีพารามิเตอร์ที่น่าสนใจอีก เช่น ถ้าให้ระยะห่างระหว่างแต่ละ FFR ไม่เท่ากัน จะมีผลต่อแรงดันพังทลายอย่างไรและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะเป็นอย่างไร ถ้าทำการสร้างโลหะให้เกินรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งเป็นรอยต่อหลัก จะมีผลต่อค่าสนามไฟฟ้าและแรงดันพังทลายอย่างไร ถ้าสามารถ

หาตำแหน่งที่เกิดการพังทลายก่อนได้ แล้วเพิ่มโลหะให้ห่างจาก FFR ออกมา จะมีผลทำให้เกิดการพังทลายน้อยลงหรือไม่อย่างไร และถ้าขนาดของโพลติ่งฟิล์วริงต่างกันจะมีผลต่อแรงดันพังทลายและกระแสรั่วอย่างไร เป็นต้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้น่าจะเป็นพื้นฐานที่ดีในการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ไดโอดกำลัง รวมไปถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Stefan Spännare. 2008. **Digital PWM-drivers and PI-regulator software for electric DC motors**. [Online]. <http://www.spaennare.se/pwmdig.html>.
- [2] Akira Kawahashi. 2004. **A New-Generation Hybrid Electric Vehicle and Its Supporting Power Semiconductor Devices**. Proceedings of 2004 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Kitakyushu.
- [3] Anucha Ruangphanit, Sarayuth Wisawaswansuk, Pawadee Mesappawong. 2004. **“The development of CMOS Fabrication Technology by TSUPREM-4 & MEDICI”**. The International Conference on Smart materials., Imperial Mae Ping, Chiangmai, Thailand.
- [4] มนตรี แสนละมุด การุณ แซ่จอก ชาญเดช หรุอนันต์ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง และ อัมพร โพธิ์โย. 2550. **“ความลึกในการเจือสารและความต้านทานเชิงแผ่น ในการยิงฝังประจุอาร์ซินิกต์ เพื่อสร้างซอส-เดรน สำหรับซีมอสขนาดเกท 0.8 ไมครอน”** หน้า 945-948. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] การุณ แซ่จอก, มนตรี แสนละมุด, อนุชา เรืองพานิช, สุวัฒน์ โสภิตพันธ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์โย. 2548. **“การศึกษาการยิงฝังประจุในการสร้างบ่อเอ็น สำหรับวงจรรวม 0.8 μm CMOS.”** หน้า 1073-1077. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [6] มนตรี แสนละมุด การุณ แซ่จอก อัมพร โพธิ์โย ภาวิน สยามชัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์. 2547. **“เทคนิคการยิงฝังประจุปริมาณสารเจือสูงด้วยเครื่องยิงฝังประจุกระแสขนาดกลาง”** หน้า 257-260. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [7] Heiner Ryssel and Ingolf Ruge. 1986. **Ion Implantation**. New York: John Wiley & Sons Inc.
- [8] Stanley Wolf and Richard N. Tauber. 1986. **SILICON PROCESSING FOR THE VLSI ERA Volume 1**. process technology. Lattice Press.
- [9] Varian Ion Implantation Systems. 1990. **Ion Implantation Process Handbook**. ME115024001 Revision 5.
- [10] R. Simonton and L. Rubin. 2000. **“Channeling Effects in Ion Implantation into Silicon.”** pp. 303-340. in **Ion Implantation Technology**. J. Ziegler, ed., Ion Implantation Technology Co.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Kunihiro Suzuki and Yuji Kataoka. 2004. **“High-Tilt-Angle Boron Implantation Into Polycrystalline Si Gates”**. pp. 136-140. **IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES**, VOL. 51, NO. 1.
- [12] T. Hadfersi, N. Boussaa, M. Zilabdi and C. Benazzouz. 2002. **“Study of phosphorus implanted and annealed silicon by electrical measurement and ion channeling technique.”** pp. 336-340. in **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 193**.
- [13] Amporn Poyai. 2002. **“DEFECT ASSESSMENT IN ADVANCED SEMICONDUCTOR MATERIALS AND DEVICE.”** Ph.D thesis of Interuniverditair Micro-Elektronica Centrum vzw Kapeldreef 75 B-3001 Leuven. Belgium.
- [14] รศ. ดร. สมเกียรติ สุกเดช, **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, พิมพ์ครั้งที่ 2, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สิงหาคม 2547.
- [15] B. JAYANT BALIGA. 1995. **POWER SEMICONDUCTOR DEVICES**. North Carolina State University. Carolina. PWS Publishing company.
- [16] Adler MS, Temple VAK, Ferro AP, Rustay RC. **Theory and breakdown voltage for planar devices with a single field limiting ring**. IEEE Trans Electron Dev 1977; 24(2): 107-13.
- [17] Chun-yen chang and C.T. Sune. **An Analytic Approach for Optimal Field Ring Spacing of a Diode Under Punchthrough Operation**. IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS. VOL. EDL-7, NO.1, JANUARY 1986.
- [18] V. BOISSON, M. LE HELLEY, and J.P. CHANTE. **Analytical Expression for the Potential of Guard Rings of Diodes Operating in the Punchthrough Mode**. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTON DEVICES, VOL. ED-32, NO. 4, APRIL 1985.
- [19] V. PATRICK O'NEIL and PAUL G. ALONAS. **Relation Between Oxide Thickness and the Breakdown Voltage of a Planar Junction with Field Relief Electrode**. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTON DEVICES, VOL. ED-26, NO. 7, JULY 1979.
- [20] H. G. Nam and etch. 2006. **Fabrication of a Silicon PIN Diode for Radiation Detection**. Journal of the Korean Physical Society. Vol. 48. No. 6. June 2006. pp. 1514-1519
- [21] Wang and Hongbo. 2002. **Silicon X-ray smart sensor micromodule and microsystem Department of Electrical Engineering and Infotech Oulu**. University of Oulu. P.O.Box 4500. FIN-90014 University of Oulu. Finland Oulu. Finland 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ถ้กษที่ทางฟิสิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า/หน่วย
ความเร็วแสงในสุญญากาศ (Velocity of light)	c_0	2.998×10^8 m/sec
ประจุอิเล็กตรอน (Electron charge)	q	1.602×10^{-19} C
มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (Rest mass of an electron)	m_e	9.109×10^{-31} kg
ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)	k	1.381×10^{-23} j/K 8.617×10^{-5} eV/K
ค่าเปอร์มิตติวิตีของซิลิคอน (Permittivity of Silicon)	ϵ_s	$11.8 \times 8.85 \times 10^{-14}$ F
ความหนาแน่นอินทรินซิกของซิลิคอนที่ 300 K	n_i	1.5×10^{10} cm ⁻³



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



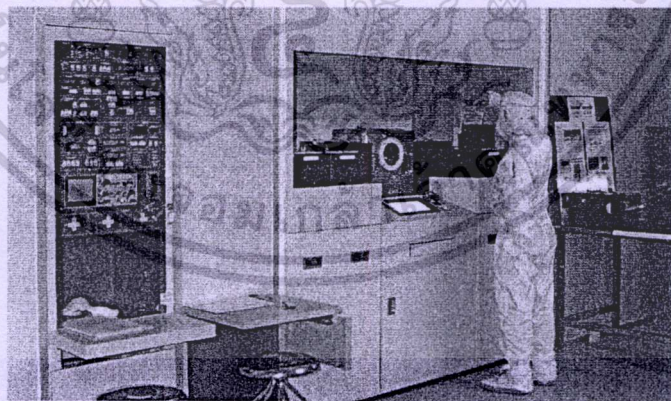
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจักรที่ใช้ในการสร้างไดโอดกึ่งตัวนำ (Diode Fabricated by Machines)

กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอดจะประกอบไปด้วยหลายๆ กระบวนการ ซึ่งแต่ละกระบวนการจะใช้เครื่องจักรเฉพาะในการสร้างและทำการสร้างในห้องสะอาด (Cleanroom) เพื่อควบคุมปริมาณของสิ่งสกปรก (Particle) ที่ไม่ต้องการ เครื่องจักรเฉพาะที่ใช้ประกอบไปด้วยเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ (Ion Implanter), Automatic Wet Bench (ออร์โตเมตริกเวทเบนซ์), Furnace (เฟอร์แนซ), Lithography (ลิโทกราฟี), Sputter (สปัตเตอร์), Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition: PECVD (พีอีซีวีดี) และ Etcher (เครื่องกัด) เพื่อทำกระบวนการต่างๆ

ไอออนอิมพลานเตอร์ (Ion Implanter)

ไอออนอิมพลานเตอร์เป็นเครื่องยิงฝังประจุที่ใช้ในกระบวนการเจือสาร การยิงฝังประจุเป็นวิธีการทางกายภาพจะมีผลให้ผลึกซิลิคอนมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Amorphous) ไอออนที่ถูกยิงฝังในผลึกซิลิคอนจะกลายรูปเป็นวัสดุผลึกเดี่ยว (Single Crystal Material) อยู่ในซิลิคอนอะตอมแบบ Amorphous เมื่อผ่านกระบวนการ Anneal บริเวณที่มีการเจือสารจะกลายสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) หรือเอ็น (N-type) ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ เช่น ประจุฟอสฟอรัส (P^+) เจือสารให้ผลึกซิลิคอนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N-type และประจุโบรอน (B^+) เจือสารให้ผลึกซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P-type เป็นต้น

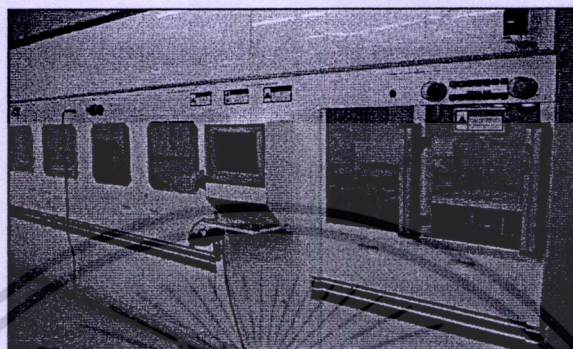


รูปที่ ข.1 เครื่อง Ion Implanter ที่อยู่ในห้องสะอาดบริเวณ Class 100

ออร์โตเมตริกเวทเบนซ์ (Automatic wet bench)

ออร์โตเมตริกเวทเบนซ์เป็นเครื่องทำความสะอาดด้วยสารเคมี เพื่อใช้ในการทำความสะอาด Particle ต่างๆ สารเคมีในการทำความสะอาดที่ใช้ ได้แก่ HF (Hydrofluoric Acid) ใช้กำจัดสาร
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

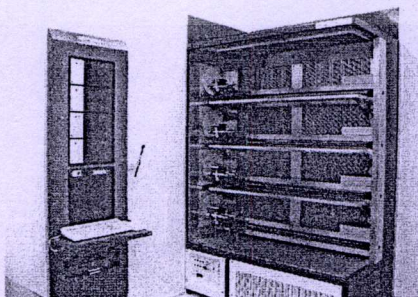
ปนเปื้อนโลหะออกไซด์ Piranha ($H_2SO_4 + H_2O_2$ ในอัตราส่วน 3:1 ใช้กำจัดสารปนเปื้อนสารอินทรีย์ Hot Phos (Hot Phosphoric Acid) ใช้กำจัดสารปนเปื้อนซิลิคอนไนไตรด์ SC-1 ($H_2O:H_2O_2:NH_4OH$) ใช้กำจัดสารปนเปื้อนฟลูออโร โลหะ BHF (Buffer Hydrofluoric) ใช้กำจัดสารปนเปื้อนซิลิคอนไดออกไซด์ และน้ำปอดประจุ UDI ใช้กำจัดสารเคมีปนเปื้อน



รูปที่ ข.2 เครื่อง Automatic wet bench อยู่ในห้องสะอาดบริเวณ Class 100

เตาเผา (Furnace)

เตาเผาเป็นเครื่องที่ใช้ในการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และทำการอบด้วยอุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศในโตรเจนหรือ Anneal (แอนนัล) การแอนนัลคือ การให้อุณหภูมิสูงเพื่อการจับพันธะระหว่างสารเจือและฐานรอง โดยจะแบ่งการแอนนัลในผลิตภัณฑ์ออกเป็นสามช่วงหลักๆ คือ ช่วงคืนโครงสร้างผลึก (Crystal regrow), ช่วงกระตุ้นการเกิดพันธะ (Activate) และช่วงขับลิแกนด์สารเจือ (Drive in) กระบวนการแอนนัลจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการเจือสารด้วยวิธียิงฝัประจุ เพราะการยิงฝัประจุเป็นวิธีทางกายภาพไม่สามารถทำให้เกิดพาหะนำไฟฟ้าได้ ต้องอาศัยความร้อนจากกระบวนการแอนนัลทำให้เกิดพาหะนำไฟฟ้าขึ้นมาได้ เตาเผาที่ใช้สามารถทำอุณหภูมิสูงถึง 1100 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.3 เครื่อง SVG TMX 2604 Diffusion Furnace อยู่ในห้องสะอาดบริเวณ Class 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิโทกราฟี (Lithography)

กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรในการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit) เป็นกระบวนการที่กำหนดลวดลายวงจรก่อนเข้าสู่กระบวนการกัดสาร (Etching) หรือกระบวนการยิงฝังประจุ (Ion Implantation) หลักการของกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรคือ ทำการฉายแสงจากเครื่องกำเนิดแสงผ่านกระจกต้นแบบ (Mask) ลงบนแผ่นเวเฟอร์ที่เคลือบด้วยน้ำยาไวแสง (Resist) แล้วนำแผ่นเวเฟอร์ไปล้างด้วยน้ำยาล้างลาย (Developer) फिल्मไวแสงเฉพาะส่วนที่โดนแสงจะหลุดออก ทำให้เวเฟอร์บางบริเวณมีฟิล์มปิด บางบริเวณไม่มีฟิล์มปิด ส่วนที่มี/ไม่มี ฟิล์มปิดนี้คือลวดลายชั่วคราวเหนือผิวเวเฟอร์ เมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตขั้นถัดไป เช่นการกัดสาร บริเวณที่ไม่มีฟิล์มปิดจะถูกสารเคมีกัดเนื้อของเวเฟอร์ออก แต่ผิวของเวเฟอร์ที่มีฟิล์มปกป้องจะคงอยู่ หลังจากขจัดฟิล์มไวแสงทั้งหมดออก (Stripping) เกิดเป็นลายถาวรบนเวเฟอร์

Lithography process ประกอบไปด้วยเครื่อง Coater, Mask aligner และ Developer ซึ่ง

Coater

เครื่องเคลือบน้ำยาไวแสงใช้ในการเคลือบน้ำยาไวแสง ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการกัดหรือกระบวนการยิงฝังประจุ

Mask aligner

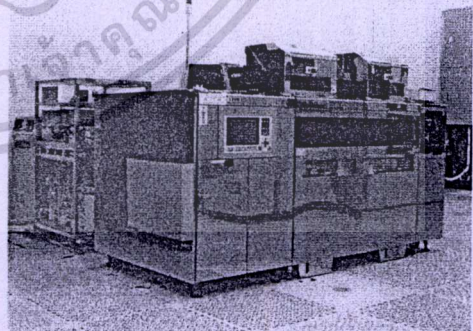
เครื่องถ่ายแบบลายวงจรโดยใช้แสง UV

Developer

เครื่องล้างน้ำยาไวแสง ในการล้างน้ำยาไวแสงฟิล์มไวแสงเฉพาะส่วนที่โดนแสงจะหลุดออก (น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Resist)) ทำให้เกิดเป็นลวดลายบนแผ่นเวเฟอร์



(a)



(b)

รูปที่ ข.4 a) แสดงเครื่อง Mask aligner b) แสดงเครื่อง TEL Mk V Coater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สปัตเตอร์ (Sputter)

เครื่องสปัตเตอร์คือเครื่องปลูกโลหะ โดยการเคลือบโลหะบนชิ้นงาน โลหะเกิดจากการถูกชนด้วยไอออนก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Argon) เป็นต้น โลหะที่ใช้เป็นส่วนผสมของ SiCuAl เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับตัวของโลหะและสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

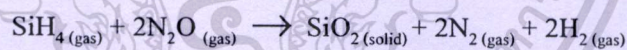


รูปที่ ข.5 เครื่องสปัตเตอร์

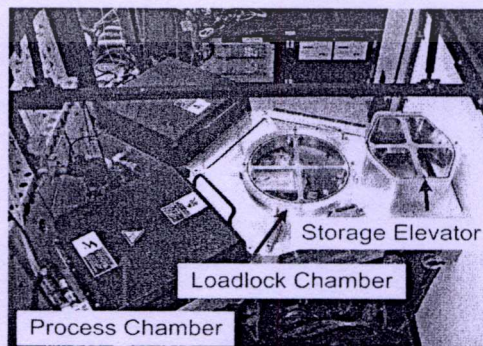
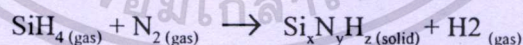
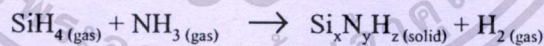
พีอีซีวีดี (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition)

เครื่องพีอีซีวีดี คือเครื่องปลูกชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์และซิลิคอนไนไตรด์ เป็นการปลูกแบบทับถม โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซแล้วทับลงบนชิ้นงาน

ปฏิกิริยาการสร้างฟิล์มซิลิคอน ไดออกไซด์



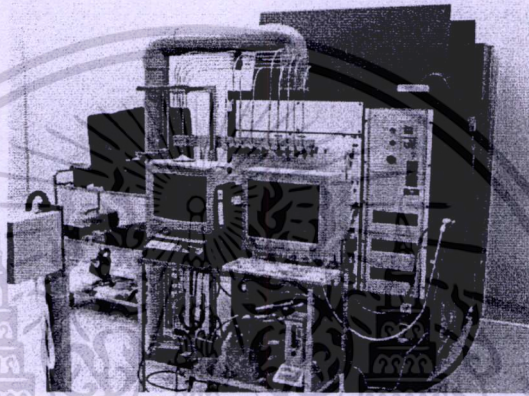
ปฏิกิริยาการสร้างฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **รูปที่ ข.6 เครื่องพีอีซีวีดี** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกัด (Etcher)

กระบวนการกัดของเครื่องกัดชนิดนี้ ใช้ก๊าซที่เป็นสารประกอบของคาร์บอน (Carbon) กับฟลูออไรด์ (Fluorine) สำหรับกัดฟิล์ม ซิลิกอนไดออกไซด์ และ ซิลิกอนไนไตรด์ ในกระบวนการกัดก๊าซดังกล่าวจะถูกป้อนเข้าไปยังห้องสุญญากาศ และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของฟลูออไรด์หลายชนิดที่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ไอออนดังกล่าวจะไปทำปฏิกิริยากับชั้นฟิล์มเกิดเป็นสารประกอบที่อยู่ในสถานะก๊าซ ซึ่งสารดังกล่าวเป็นของเสียที่ดูดออกจากห้องสุญญากาศ โดยปั๊มดูดอากาศ

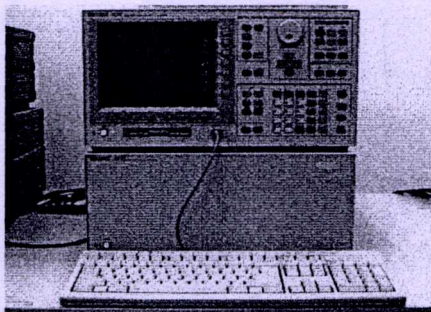


รูปที่ ข.7 เครื่องกัด (Applied Material P5000 Mark II Dry Etcher)

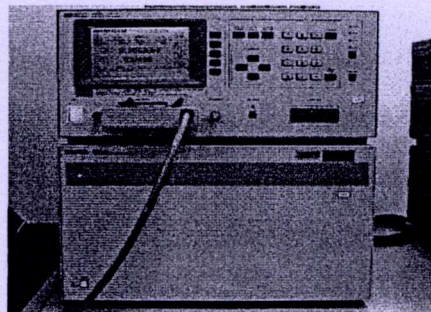
เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Analysis Tools)

โพลสแตชัน (Probe Station)

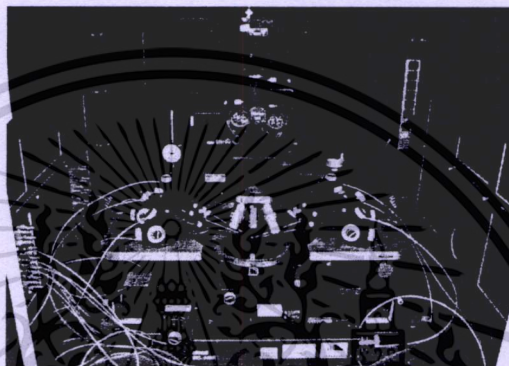
ระบบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าใช้วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรวม (Integrated Circuit) หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Device) โดยระบบเครื่องมือวัดประกอบด้วย HP4156B Precision Semiconductor Parameter Analyzer, HP4284A Precision LCR Meter และ HP E5250A Low Leakage Switch Mainframe ระบบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับวงจรรวม หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยผ่าน Alessi REL-6100 Semi-Automatic Probe Station โดย HP4156B ทำหน้าที่เกี่ยวกับการวัดกระแสและแรงดัน, HP4284A ทำหน้าที่วัดค่าความจุไฟฟ้า และ HP E5250A เป็น Metric Switch สลับหน้าที่การทำงานระหว่าง HP4156B และ HP4284A โดยระบบเครื่องมือวัดทั้งหมดได้รับการควบคุมทางคอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม Interactive Characteristics Software (ICS)



(a)



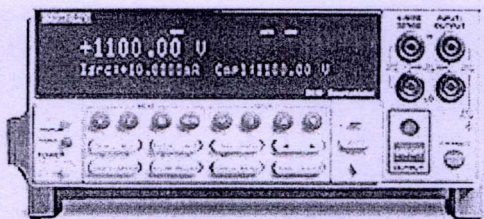
(b)



(c)

รูปที่ ข.8 a) แสดงเครื่องมือวัด HP4156B Precision Semiconductor Parameter Analyzer
 b) เครื่องมือวัด HP4284A Precision LCR Meter และ HP E5250A Low Leakage Switch Mainframe และ c) เครื่องมือวัด Alessi REL-6100 Semi-Automatic Probe Station

เครื่องมือวัด High voltage ของ Keithley รุ่น 2410 วัดคุณสมบัติกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics) สามารถป้อนแรงดันไฟฟ้าได้ +/- 1100 โวลต์ ป้อนกระแสสูงสุด 1 แอมแปร์ วัดค่ากระแสต่ำสุด 100 พิโคแอมแปร์



รูปที่ ข.9 แสดงเครื่องมือวัด Keithley 2410

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟรพอร์ยโพรบ (Four Point Probe)

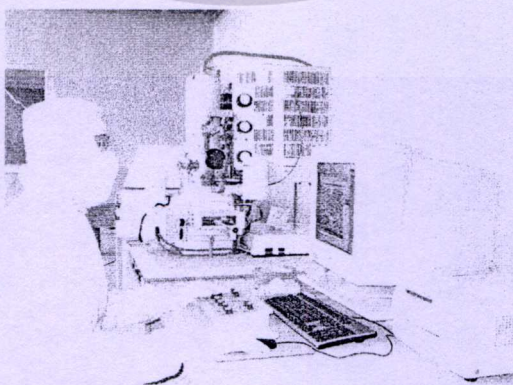
เครื่องโฟรพอร์ยโพรบเป็นเครื่องมือวัดคุณสมบัติความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet Resistance: R_s) ในการเจือสาร สามารถวัดค่าความต้านทานได้ตั้งแต่ระดับมิลลิโอมห์ ($m\Omega$) จนกระทั่งล้านโอมห์ ($M\Omega$)



รูปที่ ข.10 แสดงเครื่องมือวัด Four point probe รุ่น RS-30 Omnimap

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM)

เครื่องถ่ายภาพขยายแบบส่องกราด หรือ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) อาศัยอิเล็กตรอนในการทำปฏิกิริยาที่วัสดุต่างๆ ทำให้เกิดภาพขึ้นมา กล้องนี้สามารถขยายสูงสุดได้ 500,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ลำอิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็กมาก ส่องกราด (scan) ไปบนผิวของวัตถุ และทำการตรวจจับปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ที่กระเจิงออกมาจากวัตถุนั้น แล้วนำมาประมวลเป็นภาพต่อไป

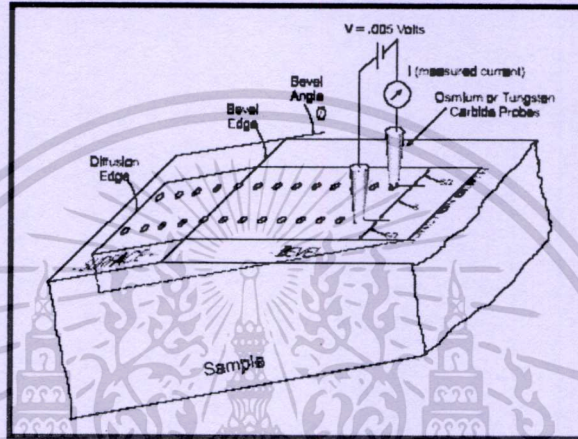


รูปที่ ข.11 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอสอาร์พี (Spreading Resistance Profiling: SRP)

เครื่องวัดคุณสมบัติความต้านทานชิ้นงาน ในการวัดค่าความต้านทานจะทำการวัดให้ชิ้นงานมีมุมเอียงประมาณ 1 องศา ดังนั้นหากมีการเจือสารต่างชนิดกันหรือความเข้มข้นสารเจือต่างกัน จะทำให้มีค่าความต้านทานที่ต่างกันออกไป กรณีการเจือสารต่างชนิดกันจะสามารถวัดค่าเพื่อหา รอยต่อหรือความลึกในการเจือสารนั้นๆ ได้



รูปที่ ข.12 เทคนิคการวัดค่าความลึกในการเจือสาร โดยเอสอาร์พี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

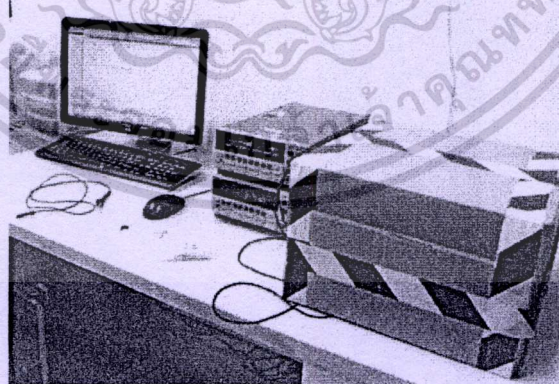
การวัดค่าคุณสมบัติของไดโอด

เมื่อทำการสร้างอุปกรณ์ไดโอดภายในห้องสะอาดเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำแผ่นมาทำการวัดค่าคุณสมบัติ I-V และ C-V ที่แรงดันไบอัสต่ำ แล้วนำแผ่นไปตัดแบ่งตัวอุปกรณ์ จากนั้นนำไปวัดค่า I-V ที่ปริมาณแรงดันไบอัสสูงในสถานะไบอัสย้อนกลับ แล้วนำไปทำการบรรจุภัณฑ์และวัดคุณสมบัติ I-V อีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติก่อนและหลังทำการบรรจุภัณฑ์

การวัดค่าคุณสมบัติ I-V และ C-V ที่แรงดันไบอัสต่ำ

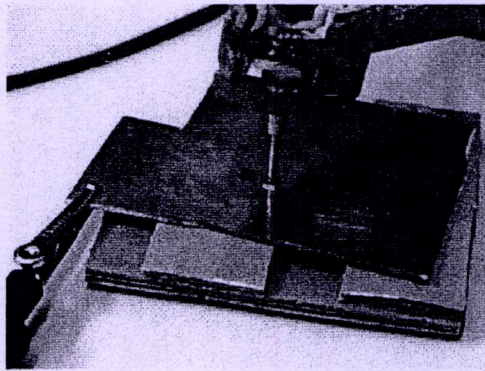
การวัดค่าคุณสมบัติ I-V และ C-V ที่แรงดันไบอัสต่ำจะทำการวัดบนแผ่นเวเฟอร์ขนาดหกนิ้ว หลังการสร้างไดโอดจากห้องสะอาดเสร็จ โดยจะใช้เครื่องโพลบสเตชัน (Probe Station) ดังรูปที่ ก.8 ทำการวัดค่า I-V ขณะไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับโดยป้อนแรงดันที่ 2 ถึง -15 โวลต์ ทำการป้อนครั้งละ 10 mV ผลการวัดค่าแสดงดังรูปที่ 4.1 และการวัดค่า C-V โดยทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 15 โวลต์ ที่ความถี่ 1 MHz ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.3

จากนั้นทำการวัดค่า I-V โดยป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ เพื่อหากระแสรั่วต่อแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่ได้ออกแบบไว้ โดยทำการย้อนค่า 0 ถึง 40 โวลต์ ทำการป้อนครั้งละ 10 mV ผลการวัดค่าแสดงดังรูปที่ 4.6 เป็นต้น จากนั้นนำแผ่นไปทำการตัดแบ่งไดโอดแต่ละตัวโดยเครื่องตัด (SAW) แล้วนำมาทำการวัดคุณสมบัติการทนแรงดันพังทลายโดยเครื่อง Keithley รุ่น 2410 ดังรูปที่ ก.9 ขณะทำการวัดค่าแสดงดังรูปที่ ข.1

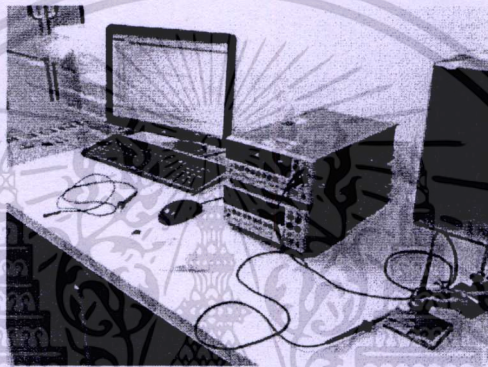


รูปที่ ก.1 แสดงรูปขณะการใช้เครื่อง Keithley รุ่น 2410 ในการวัดชิ้นงาน โดยใช้กล่องบังแสงสว่างจากข้างนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 แสดงชิ้นงานไดโอด โดยใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนด



รูปที่ ค.3 แสดงชุดเครื่องมือวัดก่อนการปิดแสง โดยกล่อง

จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการชุบนิเกิลโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless Nickel) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และทำการบัดกรีด้วยตะกั่ว แล้วทำการบรรจุภัณฑ์ด้วยอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกครั้ง ซึ่งผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับก่อนทำการบรรจุภัณฑ์



รูปที่ ค.4 แสดงไดโอดหลังการหุ้มด้วยอีพอกซีเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. **มนตรี แสนละมุด การุณ แซ่จอก ชาญเดช หรุอนันต์ วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง และ อัมพร โพธิ์ไย,** “ความลึกในการเจาะสารและความต้านทานเชิงแผ่น ในการยิงฝังประจุการ์บอนิกส์เพื่อสร้างซอส-เดรน สำหรับซีมอสขนาดเกท 0.8 ไมครอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30, 25-26 ต.ค. 2550, Volume II หน้า 945-948.
2. **มนตรี แสนละมุด การุณ แซ่จอก ชาญเดช หรุอนันต์ วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง และ อัมพร โพธิ์ไย,** “การศึกษาค่าความต้านทานเชิงแผ่นและความลึกการเจาะสาร ในการยิงฝังประจุการ์บอน ไอออนจากพลาสมา BF₃” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30, 25-26 ต.ค. 2550, Volume II หน้า 969-972.



The EECON-30 Conference Joins the Eightieth Birthday Anniversary

Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

30th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทความที่น่าสนใจในการประชุม เล่ม 2

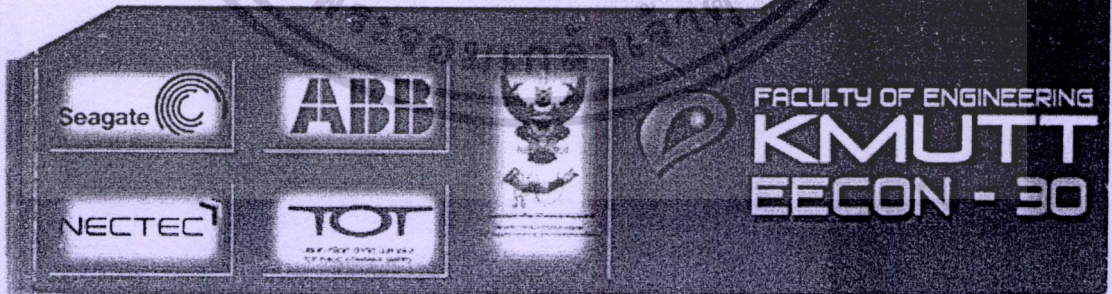
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

Volume II

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

โดย
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
 ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี
 25 - 26 ตุลาคม 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ความลึกในการเจือสารและความต้านทานเชิงแผ่น ในการยิงฝังประจุอาร์ซีนิกส์
เพื่อสร้างซอส-เดรน สำหรับซีมอสขนาดเกต 0.8 ไมครอน**
**Junction Depth and Sheet Resistance of Source-Drain Arsenic Ion Implantation for 0.8 μm
CMOS Fabrication**

มนตรี แสนละมุล¹ กาฐน แซ่จอก¹ ชาญเดช หรูนันต์¹ วิภาณี อธิติรุ่งเรือง² และ อัมพร โพธิ์โย²

¹ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)
51/4 หมู่ 1 ต.วังตะเคียน อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9 ต่อ 130 Email: montree.saelamool@nectec.or.th
²ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอค่าความต้านทานเชิงแผ่น (R_s) และค่าความลึกในการเจือสาร (X_j) ไอออนอาร์ซีนิกส์ (^{75}As) ด้วยวิธีการยิงฝังประจุ ^{75}As ที่พลังงาน 30 ถึง 70 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ปริมาณสารเจือ 4.5×10^{17} ถึง $6.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ บนแผ่นเวเฟอร์ จากนั้นแอนนัลที่อุณหภูมิสูง 900°C เป็นเวลา 40 นาที นำผลที่ได้จากการวัดค่า มาทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบการสร้างโดยโปรแกรม TSUPREM-4 จากผลการจำลองแบบการสร้างพบว่า การเจือสาร ^{75}As ที่เหมาะสมในการสร้างซอส-เดรนสำหรับซีมอสขนาดเกต 0.8 ไมครอน คือค่า R_s ประมาณ $61 \Omega/\square$ และ X_j ประมาณ $0.44 \mu\text{m}$ ซึ่งจากการสร้างจริงพบว่า มีค่า R_s ประมาณ $59.42 \Omega/\square$ และ X_j ประมาณ $0.42 \mu\text{m}$ ซึ่งค่า R_s ในการสร้างจริงมีค่าน้อยกว่าการจำลองแบบการสร้างประมาณ 2.59% และ X_j มีค่าน้อยกว่าประมาณ 4.55% และพบว่าที่เงื่อนไขต่างๆ มีค่า R_s และค่า X_j ที่แตกต่างกันไป แต่ค่าที่ได้มีค่าแตกต่างกันในระดับที่น้อยมาก ดังนั้นเราสามารถสร้างเอ็นซอส-เดรน สำหรับซีมอสขนาดเกต 0.8 μm ได้

คำสำคัญ: การยิงฝังประจุอาร์ซีนิกส์, เอ็นซอส-เดรน, การเจือสาร, ซีมอส, เอ็นมอส

Abstract

This paper presents the characteristics of Sheet Resistance (R_s) and Junction Depth (X_j) of Arsenic (^{75}As) doped using ion implantation technique. This experiment varies implantation energy of 30 to 70 keV and dose of 4.5×10^{17} to $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ on 150 mm diameter crystalline silicon (wafer) and annealed in nitrogen atmosphere at 900°C temperature for 40 minutes. R_s and X_j is then measured. In addition to the experiment, the program, TSUPREM-4, was used to simulate and

find the suitable condition. The result of simulation for R_s is $61 \Omega/\square$ and X_j is $0.44 \mu\text{m}$, whereas the result of experiment of R_s is $59.42 \Omega/\square$ and X_j is $0.42 \mu\text{m}$. The result of experiment closely matches the simulation which showed that average of percentage error between experiment and simulation of R_{sh} is 2.59% and 4.55% for Junction depth (X_j). Although the values from simulation and the experiment are different, the differences are relatively small. This result are fabricate 0.8 CMOS's N_{s/d} (N-type Source-Drain) using ion implantation technique.

Key word: Arsenic ion implantation, N source-drain, Doping process, CMOS, NMOS

1. บทนำ

ในกระบวนการสร้างวงจรรวม (Integration Circuit: IC) บนสารกึ่งตัวนำผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystal Silicon Wafer) โดยใช้เทคโนโลยีเกต 0.8 ไมครอน (μm) ปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาขึ้นที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ซึ่งมีความพร้อมในการสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดหลายวงจรรในระดับต่ำกว่า 1 ไมครอน บนแผ่นวงจรรวมขนาด 6 นิ้ว [1] คุณสมบัติการนำไฟฟ้าในกระบวนการเจือสาร ถือได้ว่ามีส่วนสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้น ซึ่งพบว่าวิธีการยิงฝังประจุ (Implantation) เป็นวิธีการเจือสาร (Doping) ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน [2] การเจือสารด้วยวิธียิงฝังประจุ จำเป็นต้องทำการอบด้วยความร้อนสูงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (แอนนัล) เพื่อคืนโครง สร้างพันธะอะตอมระหว่างอะตอมเป้าหมาย (Target Atoms) กับ อะตอมสารเจือ (Impurity Atoms) ให้เกิดพาหะนำไฟฟ้าอิเล็กตรอน (Electron) หรือโฮล (Hole) ขึ้นกับชนิดของอะตอมสารเจือ [3] ปัจจัยหลัก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการความคุมค่า R_s และ X_j คือปริมาณสารเจือและหลังงาน ในกระบวนการยิงฟิงประจุ พร้อมทั้งอุณหภูมิ และเวลา ในการแอนนัล ค่า R_s สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 [4]

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (\Omega/\square) \quad (1)$$

โดยที่ t คือความหนาของชั้นงาน หรือ X_j ในการเจือสาร ρ คือสภาพต้านทาน ($\Omega \cdot \text{cm}$)

ค่าสภาพต้านทานเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุหรือเนื้อสารที่ทำการเจือสาร ไม่ขึ้นกับขนาดกว้าง-ยาว ดังนั้นถ้าเราสามารถทราบค่า R_s และ t หรือ X_j ได้ก็จะทราบค่า ρ แล้วนำค่านี้ไปทำการออกแบบตัวต้านทานที่ต้องการ

ค่า X_j สามารถหาได้จากสมการที่ 2 รวมกับ 3 จะได้ค่า X_j หลังการแอนนัล[4]

$$R = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{Sn(E) + Se(E)} \quad (2)$$

โดยที่ R คือระยะเฉลี่ยที่ไอออนเข้าไปในเนื้อซิลิกอนมีหน่วยเป็น m E คือพลังงานในการยิงประจุ มีหน่วยเป็น (eV)

$Sn(E)$ คือ Nuclear Stopping เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการชนกับอะตอมต่อระยะทาง มีหน่วยเป็น eV/m

$Se(E)$ คือ Electronic Stopping เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการ interaction กับอิเล็กตรอนต่อระยะทาง มีหน่วยเป็น eV/m

N คือ Atomic number ของไอออนที่เข้าไปในเนื้อซิลิกอน

$$X_j = \left\{ 4Dt \ln \frac{Q_0}{C_{sub} \sqrt{\pi Dt}} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

โดยที่ X_j คือ ความลึกในการแพร่

Dt คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ต่อเวลา

Q_0 คือ ปริมาณสารเจือ (Dose)

C_{sub} คือ ความเข้มข้นสารเจือฐานรอง

ดังนั้นหลังการยิงฟิงประจุและแอนนัลจะมีค่าความลึกรวมในการเจือสาร คือ $X_{j_{total}} = R + X_j \quad \mu\text{m}$

พิจารณาสมการกระแสเดรน (Drain Current: I_d) ในช่วงการทำงานย่านเชิงเส้น (Linear region) ดังสมการที่ 4 [7]

$$I_d = \mu_{eff} \frac{C_{ox} V_{eff}}{L_{eff}} (V_{gs}^* - V_{th} - \frac{\alpha}{2} V_{ds}^*) V_{ds}^* \quad (4)$$

โดยที่ $V_{ds}^* = V_{ds} - I_d (R_d + R_s)$, $V_{gs}^* = V_{gs} - I_d R_s$ และ

$V_{th} = V_{th0} + \gamma \cdot (\sqrt{2\phi_f + V_{sb}^*} - \sqrt{2\phi_f}) \cdot \alpha$, $V_{sb}^* = -I_d R_s$,

R_s คือความต้านทานซอส, R_d คือความต้านทานเดรน

จากสมการที่ 4 พบว่าค่า R_s และ R_d จะมีค่าเกี่ยวข้องกับ

I_d และ V_{th} (Threshold voltage: V_{th}) ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการทดลองสร้างเอ็นซอส-เดรน (Nsd) โดยการทดลองยิงฟิงประจุ $^{135}\text{As}^+$ เพื่อสร้าง Nsd ที่มีค่า R_s ประมาณ $61 \Omega/\square$ และ X_j ประมาณ $0.44 \mu\text{m}$ [8] เพื่อป้องกัน Punch through ที่ความลึก N-well ประมาณ $1.8 \mu\text{m}$ [9] เพื่อใช้ในการสร้างทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟสขนาดเกต $0.8 \mu\text{m}$ ที่ TMEC ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

เริ่มจากการ simulation เงื่อนไขที่ต้องการในการสร้าง Nsd เพื่อหาค่า R_s และ X_j ที่เหมาะสมในการสร้าง จากนั้นทำการทดลองยิงฟิงประจุ $^{135}\text{As}^+$ เพื่อหาค่า R_s และ X_j คือ เครื่องแผ่แนวเฟอร์ P-type ระบาย 100 สกาทันทาน $3-4 \Omega \cdot \text{cm}$ สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา 15 นาโนเมตร เพื่อป้องกันความเสียหายที่ผิวหน้าในการยิงฟิงประจุ จากนั้นทำการยิงฟิงประจุ $^{135}\text{As}^+$ ที่พลังงาน 30, 50, 70 keV และปริมาณสารเจือ $4.5, 5.0, 5.5$ และ $6.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ตามคุณสมบัติของเครื่อง [5], [6] จากนั้นนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ $900 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 40 นาที วัดค่า R_s โดยเครื่องวัด Omnimap RS-30 four point probe และวัดค่า X_j ด้วยเครื่อง Spreading Resistance Profiling (SRP) นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบการสร้าง

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

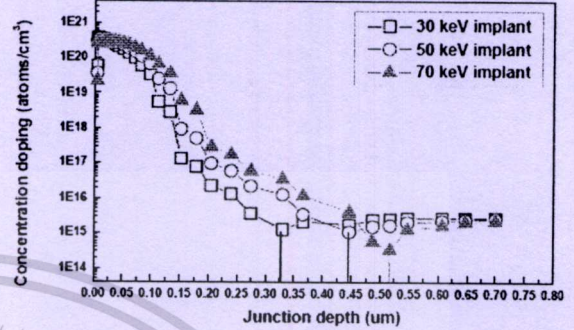
ผลการวัดค่า R_s และ X_j โดยเครื่อง Omnimap RS-30 four point probe และ SRP ในการยิงฟิงประจุ $^{135}\text{As}^+$ แอนนัลที่ อุณหภูมิ $900 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 40 นาที และค่าในการ จำลองแบบการสร้าง ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลการวัดค่า R_s และ X_j ในการยิงฟิงประจุ $^{135}\text{As}^+$ ที่พลังงาน 30, 50, 70 keV และปริมาณสารเจือ $4.5, 5.0, 5.5$ และ $6.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ และแอนนัลที่ อุณหภูมิ $900 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 40 นาที ในการสร้างจริง และการจำลองแบบการสร้าง

Energy (keV)	Dose (ions/cm ²)	Implantation		Simulation	
		R _s (Ω/□)	X _j (μm)	R _s (Ω/□)	X _j (μm)
30	4.5E15	69.39	0.31	76	0.33
	5.0E15	67.89	0.32	74	0.33
	5.5E15	66.74	0.33	72	0.34
	6.0E15	65.44	0.34	72	0.34
50	4.5E15	61.12	0.41	63	0.44
	5.0E15	59.42	0.42	61	0.44
	5.5E15	58.41	0.45	60	0.45
	6.0E15	57.49	0.46	58	0.45
70	4.5E15	52.58	0.5	53	0.5
	5.0E15	52.32	0.52	52	0.51
	5.5E15	51.51	0.5	50	0.51
	6.0E15	50.71	0.52	49	0.52

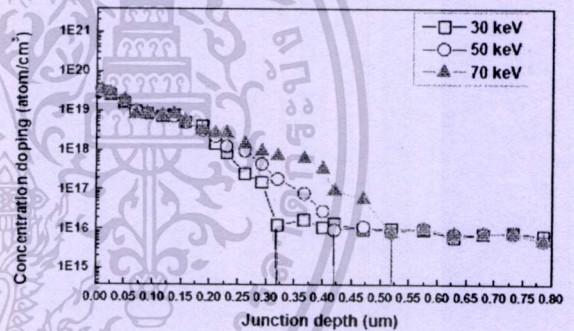
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกในการแพร่ และ ปริมาณสารเจือ ในกรณีจำลองแบบการสร้างและการยิงฝังประจุจริง ที่ปริมาณสารเจือ 4.5 x10¹⁵, 5.0 x10¹⁵, 5.5 x10¹⁵ และ 6.0 x10¹⁵ cm⁻² หลังงานในการยิง 30, 50 และ 70 keV

implantation As dose 5.0E15 ions/cm², Anneal 900 C 40 min



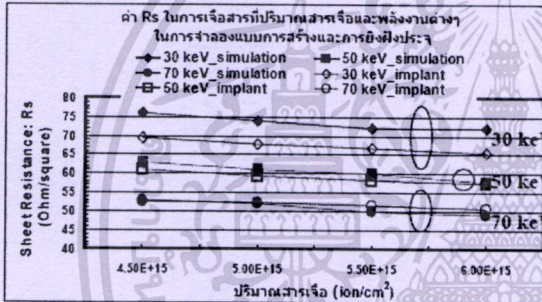
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสารเจือ และความลึกในการแพร่ ในการ simulation ที่ปริมาณสารเจือ 5.0 x10¹⁵ cm⁻² หลังงานในการยิง 30, 50 และ 70 keV

Implantation As, dose 5.0E15 ions/cm², anneal 900 C 40 min

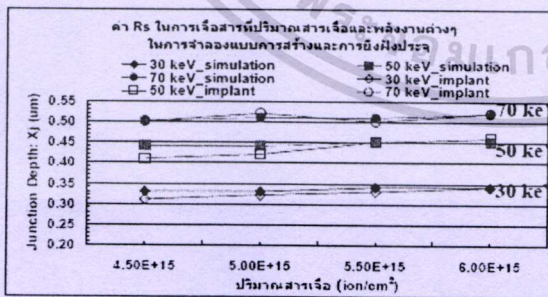


รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสารเจือ และ ความลึกในการแพร่ ในการยิงฝังประจุโดยเครื่อง SRP ที่ปริมาณสารเจือ 5.0 x10¹⁵ cm⁻² หลังงานในการยิง 30, 50 และ 70 keV

จากตารางที่ 1 พบว่าการยิงฝังประจุ As⁻ ที่พลังงานและปริมาณสารเจือที่ต่างกัน ได้ค่า R_s และ X_j ที่ต่างกันไป โดยที่พลังงาน 30 keV ที่ปริมาณสารเจือ 4.5 x10¹⁵ - 6.0 x10¹⁵ cm⁻² ได้ค่า R_s ตั้งแต่ 69.39 - 65.44 Ω/□ ได้ค่า X_j ตั้งแต่ 0.31 - 0.34 μm ตามลำดับ โดยที่การ simulation มีค่า R_s ตั้งแต่ 76.00 - 72.00 Ω/□ และมีค่า X_j ตั้งแต่ 0.33 - 0.34 μm ที่พลังงาน 50 keV ที่ปริมาณสารเจือ 4.5 x10¹⁵ - 6.0 x10¹⁵ cm⁻² ได้ค่า R_s ตั้งแต่ 61.12 - 57.49 Ω/□ ได้ค่า X_j ตั้งแต่ 0.41 - 0.46 μm โดยที่การ simulation มีค่า R_s ตั้งแต่ 63.00 - 58.00 Ω/□ และมีค่า X_j ตั้งแต่ 0.44 -



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเชิงแผ่น และ ปริมาณสารเจือในการจำลองแบบการสร้างและการยิงฝังประจุจริง ที่ปริมาณสารเจือ 4.5 x10¹⁵, 5.0 x10¹⁵, 5.5 x10¹⁵ และ 6.0x10¹⁵ cm⁻² หลังงานในการยิง 30, 50 และ 70 keV



0.45 μm และที่พลังงาน 70 keV ที่ปริมาณสารเจือ $4.5 \times 10^{17} - 6.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ได้ค่า R_s ตั้งแต่ 52.58 – 50.71 Ω/\square และได้ค่า X_j ตั้งแต่ 0.50 - 0.52 μm โดยที่การ simulation มีค่า R_s ตั้งแต่ 53.00 – 49.00 Ω/\square และมีค่า X_j ตั้งแต่ 0.50 - 0.52 μm

จากรูปที่ 1 พบว่าค่า R_s มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารเจือและพลังงานเพิ่มมากขึ้นคล้ายกับ [4] โดยกระบวนการสร้างจริงและการ simulation มีแนวโน้มคล้ายกัน ซึ่งในแต่ละพลังงานผลการวัดค่าโดยกระบวนการสร้างจริงและการ simulation จะมีค่าที่ต่างกันน้อยลงเมื่อพลังงานเพิ่มมากขึ้นคือ ที่พลังงาน 30, 50 และ 70 keV มีค่า R_s เฉลี่ยต่างกัน 8.34%, 2.28% และ 1.58% ตามลำดับ

จากรูปที่ 2 พบว่าค่า X_j มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณสารเจือและพลังงานเพิ่มมากขึ้นคล้ายกับ [3] โดยกระบวนการสร้างจริงและการ simulation มีแนวโน้มคล้ายกัน ที่พลังงานต่างกันพบว่าค่าความลึกในการสร้างจริงและการ simulation มีค่าต่างกันน้อยลง มีค่า X_j ต่างกันเฉลี่ยประมาณ 3.01%, 2.29% และ 1.00% ตามลำดับ

จากรูปที่ 3 พบว่าค่า X_j จากการ simulation ที่พลังงานต่างกันคือ 30, 50 และ 70 keV ปริมาณสารเจือ $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ แอนนัลที่ 900 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 40 นาที ได้ค่าความลึกที่ 0.33, 0.44 และ 0.51 μm ตามลำดับ ซึ่งแสดงผลเปรียบเทียบระหว่าง ความเข้มข้นสารเจือ (Concentration doping: atom/cm³) และความลึกในการเจือสาร (Junction depth: X_j) มีความเข้มข้นสารเจือบริเวณผิวหน้าประมาณ $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

จากรูปที่ 4 พบว่าค่า X_j ซึ่งวัดด้วยเครื่อง SRP ที่พลังงานต่างกันคือ 30, 50 และ 70 keV ปริมาณสารเจือ $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ แอนนัลที่ 900 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 40 นาที ได้ค่าความลึกที่ 0.32, 0.42 และ 0.52 μm ตามลำดับ ซึ่งแสดงผลเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นสารเจือ และความลึกในการเจือสาร (X_j) ความเข้มข้นสารเจือบริเวณผิวหน้าประมาณ $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ แต่เมื่อพิจารณาความต้านทานพบว่าทั้งสร้างจริง และ simulation มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากบริเวณใต้กราฟรวมมีค่าใกล้เคียงกัน

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าการยิงประจุ $^{75}\text{As}^-$ ที่พลังงาน 30 ถึง 70 keV ที่ปริมาณสารเจือตั้งแต่ 4.0×10^{17} ถึง $6.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ มีค่า R_s อยู่ในช่วง 76 ถึง 49 Ω/\square และ X_j ที่ 0.33 ถึง 0.52 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการ simulation พบว่า ค่า R_s มีแนวโน้มต่างกันลดลงเมื่อพลังงานเพิ่มมากขึ้นคือ ที่พลังงาน 30, 50 และ 70 keV มีค่า R_s เฉลี่ยต่างกัน 8.34%, 2.28% และ 1.58% ตามลำดับ และมีค่า X_j ต่างกันเฉลี่ยประมาณ 3.01%, 2.29% และ 1.00% ตามลำดับ พบว่าเมื่อพลังงานมากขึ้นเปอร์เซ็นต์ความต่างของค่า R_s และ X_j เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงและการ simulation มีค่าลดลง ดังนั้นในกระบวนการสร้างเซ็นเซอร์สำหรับ 0.8 μm CMOS ที่ต้องการความลึก 0.44

ไมครอนเมตร และค่า R_s เท่ากับ 61 Ω/\square ของ IMEC จึงเลือกใช้การยิงประจุ $^{75}\text{As}^-$ ที่พลังงาน 50 keV ปริมาณสารเจือ $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ซึ่งมีค่า R_s เท่ากับ 59.42 Ω/\square และ X_j เท่ากับ 0.42 ไมครอนเมตร เพื่อใช้ในการผลิต 0.8 μm CMOS ที่ IMEC ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพนักงาน IMEC, NECTEC ที่ให้ความร่วมมือในการทดลองและ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ KMUTL ในการอนุเคราะห์เครื่องมือวัด SRP

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กาวิน สยามชัย, อธิธิ อุทธาภรณ์ และ Kzuo Imai, "การพัฒนากระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์ซิลิคอนระดับต่ำกว่าไมครอน สำหรับวงจรรวมต้นแบบในประเทศไทย," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 11-12 พ.ย. 2547, Volume II หน้า 217-220.
- [2] มนตรี แสนละมุล และคณะ, "เทคนิคการยิงประจุปริมาณสารเจือสูงด้วยเครื่องยิงประจุกระแสขนาดกลาง," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 11-12 พ.ย. 2547, Volume II, หน้า 257-260.
- [3] มนตรี แสนละมุล, การุณ แซ่จ็อก และคณะ, "การศึกษาคูมาสมบัติในการยิงไอออนโบรอนไดฟลูออไรด์ในกระบวนการสร้างซิลิคอนสำหรับ 0.8 μm CMOS," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, 20- 21 พ.ย. 2548, Volume II, หน้า 1081-1048.
- [4] มนตรี แสนละมุล, และคณะ, "ความลึกในการเจือสารโบรอนโดยวิธียิงประจุหลายครั้ง," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, 09- 10 พ.ย. 2549, Volume II, หน้า 681-684.
- [5] SH-20SR Medium Ion Implanter Operation Manual, Nissin Electric Co., Ltd. Japan.
- [6] Eaton, "Ion Implantation Process Issues Workbook," Eaton Corporation, 1994, pp Appendix -12.
- [7] Choon-Leong Lou, Wai-Kin Chim, Daniel Siu-Hung Chan and Yang Pan, "A Novel Single-Device DC Method for Extraction of the Effective Mobility and Source-Drain Resistances of Fresh and Hot-Carrier Degraded Drain-Engineered MOSFET's," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 45, NO. 6, JUNE 1998.
- [8] Anucha Ruangphani, Sarayuth Wisawaswansuk, Pawadee Metappawong, "The development of CMOS Fabrication Technology by TSUPREM-4 & MEDICI" The International Conference on Smart materials, 1-3 December 2004, Imperial Mae Ping, Chiangmai, Thailand.
- [9] Stanley Wolf, "Silicon Processing for VLSI Vol. 1: Process Technology", Lattice Press, 1995.

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

การศึกษาค่าความต้านทานเชิงแผ่นและความลึกการเจือสาร ในการยิงฝังประจุโบรอนไอออนจากพลาสมา BF_3

The Study of Sheet Resistance and Junction Depth of Boron Ion Implantation from BF_3 Plasma

มนตรี แสนละมุล^{1,2} การ์ม แซ่จอก¹ ซาญเคซ หรูอนันต์ วิสุทธ์ จูติรุ่งเรือง¹ และ อัมพร โพธิ์ไย¹

¹ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

51/4 หมู่ 1 ต.วังตะเคียน อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9 ต่อ 130 Email: montree.saenlamool@nectec.or.th

²ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาชนิดอะตอมมวลสัมพัทธ์ไอออน (Atomic Mass Unit: AMU) โบรอน (^{10}B) จากคาร์บอกไซด์เป็นพลาสมา โดยปฏิบัติระหว่างก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF_3) กับอิเล็กตรอน จากนั้นคัดเลือกไอออนโบรอนมาทำการยิงฝังประจุ เพื่อศึกษาค่าความต้านทานเชิงแผ่นและความลึกในการเจือสาร โดยทำการปรับเปลี่ยนพลังงานในการยิงฝังประจุในช่วง 45-140 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ลงบนแผ่นเวเฟอร์ จากนั้นทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ผลการทดลองทำให้ทราบว่าค่าการยิงฝังประจุที่มี AMU มากทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นมากขึ้น เนื่องจากมีระคายเคืองในการเจือสารขึ้น ในขณะที่พลังงานมากขึ้น ค่าความต้านทานเชิงแผ่นน้อยลง เนื่องจากมีความลึกมากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นในการเลือกไอออนโบรอนในการยิงฝังประจุจึงเลือกยิงฝังประจุไอออน " $(BF_3)^+$ " เมื่อต้องการความลึกตื้น และ " B^+ " เมื่อต้องการความลึกมาก การทดลองดังกล่าวจะนำมาใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ TMEC ต่อไป

คำสำคัญ: การยิงฝังประจุ, ไอออนอิมพลานเตอร์, ความต้านทานเชิงแผ่น, ความลึกในการยิงฝังประจุ

Abstract

This paper shows the study of boron ions with different Atomic Mass Unit (AMU) from BF_3 plasma. Afterwards we selected ions from plasma for implantation to studies of Sheet Resistance and Junction depth by implantation using energy range from 45 to 140 keV and Annealing at 900 °C for 30 minutes on silicon wafer. The experiment showed that Sheet resistance increased when implanting with high AMU, but decreased when increasing the implantation energy, because high energy implantation increased Xj. Therefore, " $(BF_3)^+$ " will be chosen when shallow junction is needed, and

vice versa for " B^+ ". The results can be used to adjust the conductivity for the fabrication of semiconductor devices at TMEC.

Keyword: ion implantation, ion implanter, sheet resistance, junction depth.

1. บทนำ

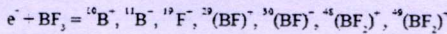
เทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในประเทศไทย มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ทีเมค) นับได้ว่ามีความพร้อมในการสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงในระดัปดาห์กว่า 1 ไมครอน บนแผ่นวงจรรวมขนาด 6 นิ้ว [1]

ทีเมคปัจจุบันพัฒนาการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหลากหลายชนิด เช่น ทรานซิสเตอร์มอสเฟตชนิดซีเอ็มอส (CMOS: Complementary Metal - Oxide - Semiconductor) หัววัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH-Sensor) อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic transistor sensor) อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Sensor) และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronic) การสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบไปด้วยกระบวนการเจือสารหลายๆ ขั้นตอน เช่น การสร้างบ่อเอ็น (N-well) การสร้างซอร์ส-เดรน (Source-Drain) และการสร้างโพลีเกต (Polycrystalline Gate) ในการสร้าง CMOS ซึ่งแต่ละขั้นตอนการสร้างมีเงื่อนไขการสร้างที่แตกต่างกันได้แก่ ปริมาณสารเจือ (Dose) พลังงานการยิง (Energy) และชนิดอะตอมสารเจือ (Impurity atom) ขึ้นอยู่กับกระบวนการนั้นๆ การเจือสารในปัจจุบันนิยมใช้วิธียิงฝังประจุ [2] ซึ่งค่า R_s และ X_j เป็นตัวกำหนดที่สำคัญในการสร้าง เช่น N-well มี R_s ประมาณ $2400 \Omega/\square$ และ X_j ประมาณ $1.8 \mu\text{m}$ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องยิงฝังประจุที่พลังงานสูงที่ 140,000 โวลต์ ที่ปริมาณสารเจือค่าที่ $4.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ [3] ซึ่งต่างจากการสร้างซอร์ส-เดรน ที่ต้องการค่า R_s น้อยประมาณ $50 \Omega/\square$ และ X_j ประมาณ $0.44 \mu\text{m}$ ยิงฝังประจุที่พลังงานค่าที่ 40,000 โวลต์ ที่ปริมาณสารเจือสูงที่ $3.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ [4] เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่า N-well มีความลึกมากกว่า P-Source-Drain เป็นจำนวน $1.36 \mu\text{m}$ เพื่อป้องกัน Punch through

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ion Implantation เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับเจือสาร (Doping) โดยวิธียิงฝังประจุตามหลักการทํางานของเครื่อง [2] ประจุที่ใช้เป็นประจุบวก เกิดจากการแยกสลายก๊าซให้เป็นพลาสมา (Plasma) ในบริเวณแหล่งกำเนิดไอออน (Ion Source) [5] เช่น ใช้ก๊าซ Phosphin (PH₃) ในการสร้างประจุฟอสฟอรัส ("P") เพื่อเจือสารให้ผลึกซิลิคอนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และใช้ก๊าซ Boron trifluoride (BF₃) เพื่อสร้างประจุโบรอน ("B") ในการเจือซิลิคอนให้เป็นชนิดพี (p-type) เป็นต้น ประจุ "B" ที่ได้ เกิดจากการแตกตัวเป็น plasma ระหว่าง BF₃ กับอิเล็กตรอนจากฟิลาเมนต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว [6]



ซึ่งแต่ละชนิดจะมี AMU และปริมาณการแตกตัวที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับกระแสบีม (Beam Current) ในการยิงฝังประจุ [4] ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการยิงฝังประจุโบรอนที่มี AMU ต่างๆ เพื่อศึกษาค่า R_s และ X_j เพื่อใช้ในการศึกษาเลือกชนิดของไอออนในการยิงฝังประจุที่เหมาะสมกับกระบวนการสร้างนั้นๆ

2. ทฤษฎี

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ (x) ของอะตอมสารเจือในผลึกของแข็งและพลังงาน (E) ที่จําเป็นได้จากสมการที่ 1 [7]

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z_1^2 q^4 N Z_2}{m_e v^2} \left[\ln \frac{1.123 M_1 m_e v^3}{\pi Z_1 q^2 (M_1 + m_e)} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 พบว่าไอออนที่ใช้ในการยิงฝังประจุมีมวล (M₁) ต่างกัน ระยะในการยิงฝังประจุในฐานรองก็จะมีความลึกที่ต่างกันด้วย ระยะการเคลื่อนที่ของไอออนสารเจือจะอาศัยพลังงานจลน์จากพลังงานในการยิง และเกิดการชนกับอะตอมฐานรองเมื่อเข้าไปในผลึกฐานรอง ทำให้ระยะการเคลื่อนที่ของอะตอมสารเจือขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างพลังงานต่อระยะทาง ดังสมการที่ 2

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{-E} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad (2)$$

การเจือสารโดยวิธียิงฝังประจุจำเป็นต้องทำการแอนนีส (Anneal) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนสารเจือกับอะตอมฐานรอง แบบสมบูรณ์ (Activation) โดยขั้นระหว่างสารเจือและฐานรองเกิดการจับคู่และให้พาหะนำไฟฟ้าซึ่งความร้อนดังกล่าวทำให้สารเจือเกิดการแพร่(Diffusion) ค่าความลึกในการแพร่ (X_j) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3 [8]

$$X_j = \left\{ 4Dt \ln \frac{Q_0}{C_{sub} \sqrt{\pi Dt}} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

ดังนั้นหลังการยิงฝังประจุและแอนนีสจะมีค่าความลึกรวมในการเจือสารคือ X_{j total} = R + X_j การเจือสารเพื่อลดหรือเพิ่มความต้านทานของฐานรองจำเป็นต้องทราบค่าสภาพต้านทาน (Resistivity: ρ) ในการเจือ โดยที่ค่าสภาพต้านทานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4 [7]

$$\rho = \frac{1}{q(u_n n + u_p p)} \text{ (ohm-cm)} \quad (4)$$

ค่าความต้านทานเชิงแผ่น (R_s) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$R_s = \frac{\rho}{t} \text{ (}\Omega/\square\text{)} \quad (5)$$

โดยที่ t คือความหนาของวัสดุ หรือประมาณได้ว่าเป็นค่าความลึกในการเจือสาร

สำหรับการวัดโดยเทคนิค Four Point Probe โดยทั่วไปที่มีค่าระยะห่างระหว่างหัวเข็ม (probe spacing: s) มากกว่าความหนาเป็นจำนวนมาก (>>t) สามารถคำนวณดังสมการที่ 6

$$\bar{\rho} = \frac{\pi V}{\ln 2 I} (X_j) = 4.532 \frac{V}{I} (X_j) \quad (6)$$

- โดยที่ $\bar{\rho}$ คือ R_s ที่มีค่าน้อยกว่า s มากๆ
- X_j คือความลึกในการเจือสาร
- V คือความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt)
- I คือกระแสไฟฟ้า (Ampere)

ดังนั้นพบว่าความต้านทานเชิงแผ่นที่ต้องการจะเกี่ยวข้องกับความลึกในการเจือสาร ดังสมการที่ 5

3. วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1
ศึกษาการเกิดอะตอมหนักสํานั้มโบรอนไอออน (Atomic Mass Unit: AMU) โบรอน (¹⁰B) จากการแตกตัวเป็นพลาสมา โดยปฏิกิริยาระหว่างก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF₃) กับอิเล็กตรอน ภายใน Arc chamber ในส่วน Ion Source ของเครื่องไอออนอิมพแลนเตอร์ [5] โดยการปล่อยก๊าซ BF₃ ที่ gas flow 0.5 cc/min, Filament current 170 A, Arc volt 100 volt และ Arc current 1.05 A ที่พลังงาน 100 keV ภายใต้สุญญากาศ 1.0x10⁻⁴ Torr แล้วทำการปรับเปลี่ยน AMU ที่ 10 ถึง 57 แล้วทำการวัดปริมาณกระแส (Beam current) ด้วยเครื่อง plotter

ขั้นตอนที่ 2

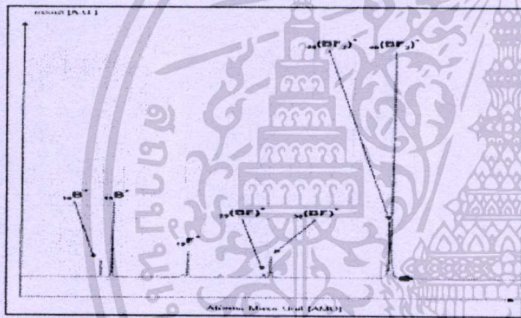
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเลือกไอออน $^{11}\text{B}^-$ และ $^{10}(\text{BF}_2)^-$ เพื่อทำการยิงฝังประจุ เพื่อศึกษาคุณสมบัติความต้านทานเชิงผิวและความลึกในการเจือสาร โดยเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอนขนาด 6 นิ้ว N-type ระบาย 100 สภาทางด้านหน้า $10 \Omega\text{-cm}$ (เวเฟอร์) จากนั้นสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา 225 อังสตรอม จากนั้นทำการยิงฝังประจุ $^{11}\text{B}^-$ และ $^{10}(\text{BF}_2)^-$ ที่พลังงาน 45, 75, 100, 120 และ 140 keV ปริมาณสารเจือ $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ จากนั้นนำไปแอนนัล ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที วัดค่า Rs โดยเครื่องวัด Omnimip R5-30 four point probe และทำการวัดค่า Xj โดยเครื่อง SRP (Spreading Resistance Profiling) จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูล

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองตอนที่ 1

ทำการวัด Spectrum Mass Ions ในการแตกตัวเป็น plasma ของ BF_3 เพื่อศึกษาชนิดของไอออนที่เกิดขึ้น และจำนวนไอออน หรือ กระแสเบีม (Beam Current) ที่พลังงาน 100 keV ผลการวัดกระแสแก่ Spectrum Mass Ions ในการแตกตัวเป็น plasma ของ BF_3 แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1. ผลการวัด Spectrum Mass Ions ดักรับการแตกตัวเป็น plasma ของ BF_3 ภายในบริเวณ Ion Source ของเครื่องยิงฝังประจุ ด้วยเครื่อง plotter ที่พลังงาน 100 keV

จากรูปที่ 1 พบว่าไอออนที่เกิดจากผลสภาวะระหว่างก๊าซ BF_3 และ อิเล็กตรอน ประกอบไปด้วย $^{11}\text{B}^-$, $^{10}\text{B}^-$, $^{19}\text{F}^-$, $^{10}(\text{BF})^-$, $^{11}(\text{BF})^-$, $^{12}(\text{BF}_2)^-$ และ $^{10}(\text{BF}_2)^-$ โดยที่ปริมาณของไอออน ถูกวัดออกมาในรูปกระแสเบีมมีค่า 2.05, 8.22, 3.14, 0.53, 2.21, 7.53 และ 23.54 μA ตามลำดับ ที่ปริมาณก๊าซเดียวกัน กระแสเบีมจะเกี่ยวข้องกับเวลาในการยิงฝังประจุดังสมการ [7]

$$Q = \frac{It}{nqA}$$

โดยที่ Q คือ ปริมาณสารเจือ (cm^{-2}), I คือกระแสเบีม (A), t คือเวลาในการยิง (sec), n คือจำนวนประจุต่อไอออน, q คือประจุอิเล็กตรอนมีค่า 1.6×10^{-19} Coulomb และ A คือพื้นที่ในการยิง (cm^2) เมื่อ มีค่าคงที่ $Q.n.q.A$

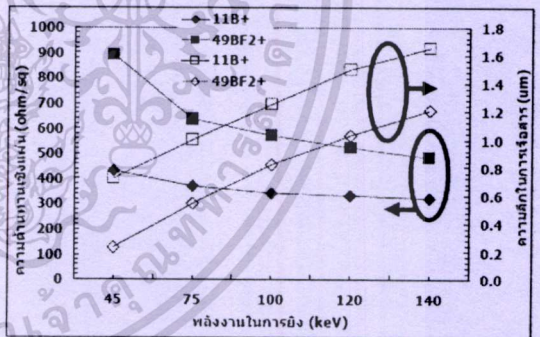
ดังนั้นเวลาในการยิงจะแปรผกผันกับกระแสเบีม จากการทดลองพบว่า กระแสเบีมจากไอออน $^{11}\text{B}^-$ และ $^{10}(\text{BF}_2)^-$ มีค่ามาก และ ไอออนทั้งสองมี AMU ที่ต่างกัน จึงนำไอออนทั้งสองมาทำการยิงฝังประจุ เพื่อลดเวลาในการยิงต่อไป

ผลการทดลองตอนที่ 2

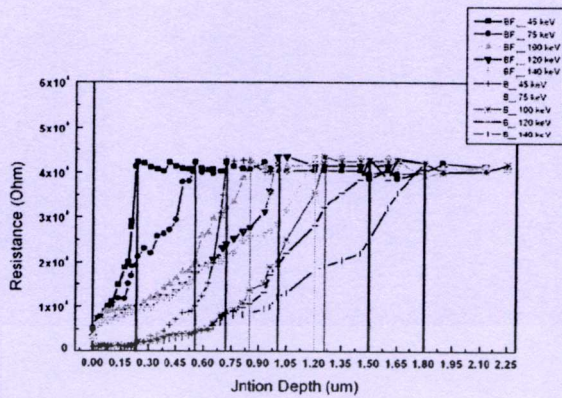
เมื่อทำการวัดชนิดของไอออนแล้ว ทำการเลือกไอออน $^{11}\text{B}^-$ และ $^{10}(\text{BF}_2)^-$ เพื่อทำการยิงฝังประจุ โดยทำการปรับเปลี่ยนพลังงานในการยิงคือ 45, 75, 100, 120 และ 140 keV แล้วแอนนัล ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการวัดค่า Rs และ Xj โดยเครื่อง four point probe และ SRP ตามลำดับ ผลการวัดค่า Rs และ Xj แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Rs) และ ค่าความลึก (Xj) ในการยิงฝังประจุ $^{11}\text{B}^-$ และ $^{10}(\text{BF}_2)^-$ พลังงาน 45 ถึง 140 keV และแอนนัลที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที

Energy (keV)	Rs ($\Omega\text{-cm}$)		Xj (μm)	
	$^{11}\text{B}^-$	$^{10}(\text{BF}_2)^-$	$^{11}\text{B}^-$	$^{10}(\text{BF}_2)^-$
45	430	889	0.72	0.23
75	370	638	1.00	0.54
100	343	572	1.25	0.82
120	333	523	1.50	1.03



รูปที่ 2. กราฟแสดงผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น และ ความลึกในการเจือสารประจุ $^{11}\text{B}^-$ และ $^{10}(\text{BF}_2)^-$ พลังงาน 45 ถึง 140 keV และแอนนัลที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3. กราฟแสดงผลการวัดค่าความลึกในการเจือสารประจุ "B" และ "(BF)" หลังงาน 45 ถึง 140 keV และแอนนัลที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่อง SRP โดยแกน X แสดงค่าความลึก และแกน Y แสดงค่าความต้านทาน

จากตารางที่ 1 พบว่า การยิงฝังประจุไอออน "B" และ "(BF)" ที่พลังงานในการยิงฝังประจุในช่วง 45 ถึง 140 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และแอนนัลที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีความต้านทานเชิงเส้นในช่วง 430 ถึง 322 และ 889 ถึง 482 Ω-cm ตามลำดับ และมีค่าความลึกในการเจือสารไอออน "B" และ "(BF)" ประมาณ 0.42 ถึง 1.62 และ 0.23 ถึง 1.21 μm ตามลำดับ

พิจารณาจากรูปที่ 2 พบว่าค่าความต้านทานเชิงเส้นในการยิงฝังประจุที่พลังงานมากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าความต้านทานเชิงเส้นน้อยลง โดยพบว่าเมื่อพลังงานสูงมากขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเชิงเส้นจะลดลง เนื่องจากเมื่อพลังงานมากขึ้น ระยะความลึกในการฝังตัวของไอออนสารเจือจะมากขึ้น ดังรูปที่ 3 เมื่อมีความลึกมากขึ้นส่งผลให้ค่า I จากสมการที่ 5 มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงเส้นลดลง เช่นเดียวกันกับเมื่อพลังงานในการยิงฝังประจุน้อยลง ระยะความลึกในการฝังตัวของไอออนสารเจือจะสั้นดังรูปที่ 3 เมื่อมีความลึกที่สั้นส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงเส้นมากขึ้นดังสมการเดียวกัน

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซ BF₃ กับอิเล็กตรอน เกิดไอออนโบรอนชนิดต่างๆ คือ "B", "B⁺", "F", "(BF)", "(BF)⁺", "(BF)²⁺" และ "(BF)³⁺" โดยที่กระแสของแต่ละไอออนจะแตกต่างกันไป ในการเจือสารโดยวิธียิงฝังประจุพบว่า ไอออนที่มี AMU มาก ทำให้ค่าความต้านทานเชิงเส้นมากขึ้น เมื่อพลังงานทำให้ค่าความต้านทานเชิงเส้นลดลง เนื่องจากมีความลึกในการเจือสารมาก ดังนั้นในการยิงฝังประจุโบรอนจึงเลือกใช้ "B" เมื่อต้องการความลึกมาก เช่นการ

สร้างบอที และ "(BF)⁺" เมื่อต้องการความลึกสั้น เช่นการสร้างที่สร้างของส-เครน เป็นต้น เพื่อลดเวลาในการยิงฝังประจุและลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพนักงาน TMEC, NECTEC ที่ให้ความร่วมมือในการทดลองและ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ KMUTL ในการอนุเคราะห์ เครื่องมือวัด SRP

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กาวาน สยามชัย, อิทชิ อุทราภรณ์ และ Kzuo Imai, "การพัฒนากระบวนการผลิตตั้งประดิษฐ์ซิลิคอนระดับต่ำว่าไมครอน สำหรับการผลิตวงจรรวมต้นแบบในประเทศไทย," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 11-12 พ.ย. 2547, Volume II, หน้า 217-220.
 [2] มนต์วี แสนละมุล, และคณะ, "เทคนิคการยิงฝังประจุปริมาณสารเจือสูงด้วยเครื่องยิงฝังประจุกระแสปานกลาง," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 11-12 พ.ย. 2547, Volume II หน้า 257-260.
 [3] การุณ แซ่จอก, และคณะ, "การศึกษาการยิงฝังประจุในการสร้างบอทีน สำหรับวงจรรวม 0.8 um CMOS," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, 20-21 ค.ย. 2548, Volume II, หน้า 1073-1076.
 [4] มนต์วี แสนละมุล, และคณะ, "การศึกษาคุณสมบัติในการยิงฝังโบรอนโคฟลูออไรด์ในกระบวนการสร้างของสเครนสำหรับ 0.8 um CMOS," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, 20-21 ค.ย. 2548, Volume II, หน้า 1081-1083.
 [5] การุณ แซ่จอก และคณะ, "การศึกษาอุปกรณ์กำเนิดประจุชนิดเบรอนนาสในเครื่องยิงฝังประจุสำหรับกระบวนการผลิตวงจรรวม," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 11-12 พ.ย. 2547, Volume II, หน้า 269-272.
 [6] Heiner Ryssel and Ingolf Ruge, "Ion Implantation," John Wiley & Sons Ltd., 1986.
 [7] Varian ion implantation systems, "Acceptance Test Model E500HP Mid-Current Ion Implanter," 1994.
 [8] มนต์วี แสนละมุล, และคณะ, "ความลึกในการเจือสารโบรอนโดยวิธียิงฝังประจุหลายครั้ง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, 09- 10 พ.ย. 2549, Volume II, หน้า 681-684.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายมนตรี แสนละมุล เกิดเมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ.2524 ที่จังหวัดเชียงราย เป็นบุตรคนที่สองของคุณพ่อหนุ่ม แสนละมุล และคุณแม่สุณี แสนละมุล มีพี่น้องทั้งหมดสองคน สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ (อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์) จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2549 โดยในปี พ.ศ. 2547 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) จนถึงปัจจุบัน ผลงานตีพิมพ์ได้แก่

1. มนตรี แสนละมุล การุณ แซ่จอก อัมพร โพธิ์โย ภาวิน สยามชัย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์. 2547. “เทคนิคการยิงฝังประจุปริมาณสารเจือสูงด้วยเครื่องยิงฝังประจุกระแสขนาดกลาง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 11-12 พ.ย. 2547, Volume II หน้า 257-260.
2. มนตรี แสนละมุล การุณ แซ่จอก อนุชา เรืองพานิช โอภาส ศรีทวีศักดิ์ อัมพร โพธิ์โย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์. 2548. “การศึกษาคุณสมบัติในการยิงฝังโบรอนไดฟลูออไรต์ในกระบวนการสร้างขอสเตรนสำหรับ 0.8 μm CMOS.” หน้า 1081-1083. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
3. มนตรี แสนละมุล การุณ แซ่จอก นพพล พงษ์พันธุ์จันทร์กรรณิกา อูประ โศตร โกวิท ไชวสุวรรณ เจริญมิตร วรเดช อัมพร โพธิ์โย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์. 2548. “ศึกษาการยิงฝังประจุโบรอนอะตอมมิกส์นัมเบอร์ต่างๆ ของทลาสมา BF₃ ต่อค่าความต้านทานเชิงผิว,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, 20-21 ต.ค. 2548, Volume II หน้า 1177-1180.
4. มนตรี แสนละมุล การุณ แซ่จอก ชาญเดช หุรอนันต์ อนุชา เรืองพานิช และอัมพร โพธิ์โย. 2549. “ความลึกในการเจือสารโบรอนโดยวิธียิงฝังประจุหลายครั้ง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, 09- 10 พ.ย. 2549, Volume II, หน้า 681-684.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

5. มนตรี แสนละมุล การุณ แซ่จอก ชาญเดช หรอนันต์ วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง และ อัมพร โพธิ์ไย. 2550. “ความลึกในการเจือสารและความต้านทานเชิงแผ่น ในการยิงฝังประจุกอาร์ซินิกส์เพื่อสร้างขอส-เดรน สำหรับซีมอสขนาดเกต 0.8 ไมครอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30, 25-26 ต.ค. 2550, Volume II หน้า 945-948.
6. มนตรี แสนละมุล การุณ แซ่จอก ชาญเดช หรอนันต์ วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง และ อัมพร โพธิ์ไย. 2550. “การศึกษาค่าความต้านทานเชิงแผ่นและความลึกการเจือสาร ในการยิงฝังประจุกโบรอนไอออนจากพลาสมา BF_3 ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30, 25-26 ต.ค. 2550, Volume II หน้า 969-972.
7. Montree Saenlamool, Karoon Saejok, Charndet Hruanun, et. al. “FACTORS AFFECTING THE SHEET RESISTANCE OF POLYRESISTOR FOR SURFACE MICROMACHINING PRESSURE SENSORS” 8th National Grad Research Conference. 7-8 September 2007. Mahidol University, Salaya. pp. 119.
8. Amporn poyai, Anucha Ruangphanit, Karoon Saejok, Montree Saenlamool, Win Bunjongpru and Itti Rittaporn. “The Effect of Fabrication Techniques to the Threshold Voltage of Submicron CMOS Technology” Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2006) Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand. 25-26 January 2006.
9. มนตรี แสนละมุล การุณ แซ่จอก สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ ชาญเดช หรอนันต์ และ อัมพร โพธิ์ไย. “กระบวนการเจือสารในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ด้วยเทคนิคการยิงฝังประจุกไอออนสารเจือ” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 13 (ฉบับที่ 2) กรกฎาคม-ธันวาคม 2551. หน้า 3-9