

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า
ด้วยวิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอน

DEVELOPMENT OF ELECTRICAL PROPERTIES FOR MESA DIODE BY ELECTRON
BEAM IRRADIATION



จพ.

พ 291 ก

2558

เลขหมู่..... 139856

เลขทะเบียน.....

วันเดือนปี... 19 11 2558

๖.12๙๒๕๖๓๘



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KMITL-2015-EN-M-043-153
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF ELECTRICAL PROPERTIES FOR MESA DIODE BY
ELECTRON BEAM IRRADIATION



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
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมซ่าไดโอดโดยการฉายรังสีอิเล็กตรอน
Thesis Title Development of Electrical Properties for Mesa Diode by Electron Beam Irradiation
นักศึกษา นางสาวพรหมพักตร์ ดาวัลต์
รหัสประจำตัว 56601185
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ์ รุติรุ่งเรือง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-043-153

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ศศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ	
ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง	
ดร.อัมพร โพธิ์ไย	
ดร.โยธิน วงศ์ประเสริฐ	
รศ.ดร.วิสุทธิ์ รุติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-305

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมฆาไดโอดด้วยวิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอน
นักศึกษา	นางสาวพรหมพัทธ์ ดาวัลต์
รหัสประจำตัว	56601185
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง



ในการพัฒนาซิลิคอนพินไดโอดโครงสร้างแบบเมฆา ให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี โดยงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการฉายลำรังสีอิเล็กตรอนมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากการฉายลำรังสีอิเล็กตรอนเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของไดโอดแบบพินตัวเร็วเพื่อให้ได้คุณสมบัติการสวิตชิง หรือค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ตามที่ต้องการ ซึ่งอาศัยหลักการสร้างจุดบกพร่อง (Defect) ในเนื้อซิลิคอน การศึกษานี้ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดกึ่งชนิด-PIN โครงสร้างแบบเมฆา ที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณ 50,75 และ 100 kGy พบว่าค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ที่วัดได้อยู่ในช่วง 310-330, 245-255 และ 180-190 ns ตามลำดับ และการฉายรังสีที่มากจะทำให้ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ที่ได้อยู่ในช่วงที่แคบมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลของการฉายรังสีได้ทำให้เกิดการถดถอยในคุณสมบัติไฟตรงคือ แรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าเพิ่มขึ้น ถือเป็นอาการถดถอยของไดโอดที่มีความสำคัญต่อการพิจารณาและการฉายลำรังสีอิเล็กตรอนเพื่อลดค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Development of Electrical Properties for Mesa Diode by
ElectronBeam Irradiation

Student Miss Promphak Dawan

Student ID. 56601185

Degree Master of Engineering

Program Microelectronics Engineering

Year 2015

Thesis Advisor Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

Abstract

Electron beam irradiation, a method for improve the fast diodes to controlling reverse recovery time (t_{rr}) by creating the bulk defects. Power Silicon PIN diodes, mesa structure were fabricated in production line of semiconductor manufacturer. Then were irradiated with electron beam at dose 50, 75, 100 kGy, reverse recovery time (t_{rr}) can measure in range of 310-330, 245-255 and 180-190 ns, respectively. And more irradiation dose, reverse recovery time (t_{rr}) will be in more narrow range. However effect of irradiation cause regression in electrical properties is forward voltage drop (V_f) which is importance point to consider electron beam irradiation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้เป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ. ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับแนวความคิด การแก้ไขปัญหาที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าอย่างสูง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ , ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , ดร.โยธิน วงศ์ประเสริฐ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทความรู้ ตลอดจนให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณนักวิจัย ผู้ช่วยนักวิจัย และพนักงาน บริษัท อุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด (มหาชน). ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนด้านกระบวนการสร้าง เครื่องมือวัดตัวอุปกรณ์ ตลอดจนให้ข้อชี้แนะต่างๆ แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสถาบันนิเวศศิษฐ์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) สทพ.ที่เอื้อเฟื้อเครื่องเร่งอนุภาค อิเล็กตรอนพลังงานสูงแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณนายวิวัฒน์ จิงชนศิริกุล และนายอชิโรจน์ มโน นักศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ที่คอยให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณคณาจารย์โรงเรียนอุดรพิชัยรักษ์พิทยา อ.เมือง จ.อุดรธานี ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันเป็นพื้นฐานที่ดีในวันนี้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ โรงเรียนอุดรพิชัยรักษ์พิทยา อ.เมือง จ.อุดรธานี ที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ คุณพ่อ บัวเพ็ชร ดาวัลด์ และคุณแม่สีแพร ดาวัลด์ และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในด้านการเรียน การเงิน และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดในทุกๆ ด้าน มาโดยตลอดจนถึงวันนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

พรหมพัทธ์ ดาวัลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 หลักการทางทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยและสมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	7
2.1 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิลีกทรอนิกส์กำลัง.....	7
2.1.1 ประวัติทางอิลีกทรอนิกส์กำลัง.....	8
2.1.2 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง.....	11
2.1.3 ชนิดและคุณสมบัติของไดโอดกำลัง.....	13
2.1.4 โครงสร้างของไดโอดกำลังความเร็วสูง.....	14
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N.....	15
2.2.1 โครงสร้างของไดโอดกำลังความเร็วสูง.....	16
2.2.2 กระแสการรวมตัว.....	16
2.2.3 กระแสที่การฉีดระดับต่ำ.....	18
2.2.4 กระแสที่การฉีดพาหะระดับสูง.....	20
2.2.5 คุณสมบัติการนำกระแสขณะไป้อัสตรง.....	30
2.3 คุณสมบัติการสวิชิ่ง.....	31
2.3.1 การฟื้นตัวไปข้างหน้า.....	32
2.3.2 การฟื้นตัวย้อนกลับ.....	37
2.4 เทรดออฟของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N.....	44
2.5 การควบคุมอายุพาหะ.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ผลกระทบและความเสียหายจากการฉายรังสี.....	46
2.6.1 เทคนิคการฉายรังสี.....	46
2.6.2 การแตกตัวเป็นไอออนของรังสี.....	48
2.6.3 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูง.....	49
2.6.4 การปรับค่าอายุพายุหะด้วยวิธีการฉายลำรังสีอิเล็กทรอนิกส์.....	50
บทที่ 3 เทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้าง และการทดลอง.....	53
3.1 เทคโนโลยีการสร้าง.....	53
3.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process).....	53
3.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process).....	55
3.1.3 กระบวนการกัด (etching Process).....	59
3.1.4 กระบวนการโด๊ป (Doping Process).....	60
3.1.5 กระบวนการยิงไอออน (Ion-Implantation Process).....	64
3.1.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process).....	64
3.1.7 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sinter Process).....	65
3.2 ขั้นตอนการสร้างซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า.....	65
3.2.1 กระบวนการแพร่สารเจือเพื่อสร้างชั้น N^+ และ P^+	66
3.2.2 กระบวนการออกซิเดชัน.....	67
3.2.3 กระบวนการกัดเพื่อสร้างเป็นไดโอดโครงสร้างแบบเมซ่า.....	73
3.2.4 กระบวนการสร้างชั้นฉนวน SIPOS.....	75
3.2.5 กระบวนการสร้างชั้นโลหะ.....	78
3.2.6 กระบวนการฉายลำรังสีอิเล็กทรอนิกส์.....	83
3.3 วิธีการทดลอง.....	91
3.3.1 การวัดค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse recovery time).....	91
3.3.2 การวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	92
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	94
4.1 การศึกษาค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse recovery time).....	94
4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของซิลิคอนพินไดโอดโครงสร้างเมซ่า.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	106
เอกสารอ้างอิง.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	110
ภาคผนวก ข. ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	133



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของรังสีชนิดต่างๆ.....	53
3.1 จุดหลอมเหลว (Melting Points) และสภาพต้านทาน(Resistivities).....	70
4.1 ค่าความต้านทานของไดโอดที่ได้รับการฉายรังสีที่ปริมาณ 50 ,75 และ 100 kGy	114



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การประยุกต์ใช้ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	3
2.1 แหล่งจ่ายไฟในคอมพิวเตอร์ทั่วไปซึ่งเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังในเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน	10
2.2 โครงสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังที่สามารถทนแรงดันสูง	16
2.3 แสดงการกระจายตัวของพาหะและการไหลของกระแสภายใต้การฉีดระดับต่ำของซิลิคอนไดโอด โครงสร้าง P-i-N	18
2.4 แสดงการกระจายตัวของพาหะและศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูงของซิลิคอน ไดโอดกำลังชนิด P-i-N	23
2.5 การกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N กับค่าอายุพาหะระดับสูง	26
2.6 แรงดันตกคร่อมภายในบริเวณดริฟท์ (ตรงกลาง) ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN	29
2.7 ฟังก์ชัน $F\left(\frac{d}{L_a}\right)$ ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N	32
2.8 แรงดันตกคร่อมขณะ On-State ของซิลิคอนไดโอดกำลัง P-i-N	33
2.9 คุณสมบัติขณะ On-State ของซิลิคอนพินไดโอดกำลัง	34
2.10 ความเข้มข้นอิเล็กตรอนในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวกลับ ไปข้างหน้า	37
2.11 ความเข้มข้นอิเล็กตรอนในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวกลับ ย้อนกลับ	38
2.12 ระยะเวลาของบริเวณ Conductivity-Modulated ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า	39
2.13 การลดลงของค่าความต้านทานบริเวณดริฟท์ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า ..	39
2.14 แรงดันตกคร่อมซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวย้อน ไปข้างหน้า	40
2.15 ลักษณะกระแสและแรงดัน ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวย้อนกลับ	41
2.16 รูปแบบการกระจายตัวของพาหะในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N การฟื้นตัวย้อนกลับ	42
2.17 ประจุสะสมภายในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N หลังจากสิ้นสุดเฟสที่สาม	46
2.18 กราฟกระแสฟื้นตัวย้อนกลับ ขณะเวลาปิด	48
2.19 กราฟเทรตออฟของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ได้รับการควบคุมอายุ พาหะในวิธีต่างๆ	49
2.20 ลักษณะตัวอย่างของโครงสร้างแบบเมฆา	50
2.21 ลักษณะความเสียหายจากโครงสร้างผลึกในแบบต่างๆ	50
2.22 ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในแถบช่องว่างพลังงานของซิลิคอนที่เหมาะสมการลด อายุของพาหะ	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 แผนผังความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงร่างผลึก กับความลึกหลังจากการฉายรังสีอนุภาคสูง.....	51
2.24 ลักษณะการทะลุผ่านของรังสีชนิดต่างๆ	52
2.25 ลักษณะโครงสร้างเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนแบบเชิงเส้น	54
3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้น SO ₂ ที่ได้จากการอบการออกซิเดชันแบบแห้ง	58
3.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)	58
3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้น SO ₂ ที่ได้จากการอบการออกซิเดชันแบบเปียก.....	59
3.4 การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์.....	60
3.5 การเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสง (Photoresist).....	61
3.6 การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านโฟโตมาสก์	62
3.7 (ก) Negative resist developed, (ข) Positive resist developed	62
3.8 ส่วนของแผ่นเวเฟอร์ที่ทำการลอกชั้นของออกไซด์ออก.....	64
3.9 ส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่บนซับสเตรท.....	64
3.10 หลักการแพร่กระจายของหมึกในน้ำ.....	65
3.11 การแพร่สารเจือ (Diffusion) เกิดเป็นรอยต่อ P-N	66
3.12 เตาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นของแข็ง (Solid Source).....	67
3.13 เตาเผาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นของเหลว (Liquid Source).....	68
3.14 เตาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นแก๊ส (Gas Source)	68
3.15 ไดอะแกรมการทำงานของ Ion-implantation.....	69
3.16 แผนภาพไดอะแกรมการดำเนินงาน.....	71
3.17 ภาพภาคตัดขวางแสดงชั้นงานเริ่มต้น	72
3.18 ภาพภาคตัดขวางแสดงชั้นงานเมื่อทำการแพร่สารเจือ Boron และ Phosphorus เพื่อสร้างชั้น N ⁺ และชั้น P ⁺	73
3.19 การจัดเรียงแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) และแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส(Phosphorus).....	73
3.20 ลักษณะการจัดเรียงแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) และแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus) เรียบร้อยแล้ว.....	74
3.21 ลักษณะโบ๊ทที่ใช้วางแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) และแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus).....	75
3.22 ชั้นงานที่ทำการแพร่สารเรียบร้อยแล้ว.....	75
3.23 นำชั้นงานแช่ในกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 49%	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
IX
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.24	แผ่นซิลิคอนเกิดคราบสิ่งสกปรกหลังจากทำการแพร่สารเจือ	76
3.25	ลักษณะการขัดชิ้นงาน.....	77
3.26	เมื่อนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการเป่าทราย.....	77
3.27	ชิ้นงานแผ่นซิลิคอนที่ทำการเป่าทรายเรียบร้อยแล้ว	78
3.28	ลักษณะพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ที่เข้าสู่กระบวนการขัดและเป่าทรายเรียบร้อยแล้ว	78
3.29	ภาคตัดขวางของชิ้นงานเมื่อทำการออกซิเดชัน.....	79
3.30	ลักษณะโบ้ท์ที่ใช่วางเมื่อเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชัน.....	80
3.31	ลักษณะโบ้ท์ที่ใช่วางเมื่อเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชัน.....	81
3.32	เตาที่ทำการกระบวนการออกซิเดชัน	81
3.33	ภาคตัดขวางของชิ้นงานเมื่อเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	82
3.34	แสดงการวางชิ้นงานเพื่อทำการสปิน (Spin Coating).....	83
3.35	แผ่นที่เคลือบสารไวแสงไปอบ (Cure) ในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 100 °C.....	83
3.36	แผ่นมาสค์ (mask).....	84
3.37	เครื่องที่ใช้ในการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet).....	84
3.38	ภาคตัดขวางของชิ้นงานเมื่อเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	85
3.39	วิธีการวัดความลึกของแผ่นเวเฟอร์.....	86
3.40	จอแสดงผลระดับความลึกของเวเฟอร์.....	86
3.41	แผ่นเวเฟอร์ที่จุ่มในบ่อ ซึ่งมีส่วนผสมของ $\text{HFNO}_3 \cdot \text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	87
3.42	ภาคตัดขวางเมื่อเข้าสู่กระบวนการกัด (Etching) ให้เป็นโครงสร้างเมฆา.....	87
3.43	เตาที่ใช้เผาแผ่นเวเฟอร์ ทำการลอกน้ำยาไวแสง	88
3.44	ลักษณะอ่างที่ทำการแช่สารละลาย BOE (Buffer of etching).....	89
3.45	แผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการกัด (Etching) เรียบร้อยแล้ว	89
3.46	ภาคตัดขวางแผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการกัด (Etching) เรียบร้อยแล้ว	90
3.47	ภาคตัดขวางของแผ่นเวเฟอร์เมื่อกักฉนวนที่ไม่ต้องการออกเรียบร้อยแล้ว	90
3.48	การส่องกล้องก่อนทำการเคลือบน้ำยาไวแสง.....	91
3.49	รูปภาคตัดขวางชิ้นงานที่ทำการสร้างชั้นโลหะเรียบร้อยแล้ว	92
3.50	การเก็บบรรจุชิ้นงานก่อนนำไปประกอบตัวถัง (Packaging).....	92
3.51	ซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมฆาที่ประกอบตัวถังสมบูรณ์แล้ว.....	93
3.52	ภาคตัดขวางของชิ้นงานเมื่อนำไปฉายรังสี	93
3.53	ลักษณะของภาคบรรจุชิ้นงาน และระบบลำเลียง.....	94
3.54	เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Genesys 20	95
3.55	ห้องควบคุมระบบเครื่องฉายรังสีด้วยโปรแกรมการสั่งอัตโนมัติ.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 X
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.56 Spectrophotometer รุ่น Genesys 20.....	96
3.57 แผ่นฟิล์มสำหรับวัดปริมาณรังสี พร้อมแถบบาร์โค้ดเพื่อบันทึกข้อมูล.....	96
3.58 การติดตั้งแผ่นฟิล์มสำหรับวัดปริมาณรังสี	97
3.59 แสดงพิกัดการวางแผ่นฟิล์มวัดปริมาณรังสี และลักษณะมิติของภาคบรรจุชิ้นงาน.....	97
3.60 ลักษณะ Profile ปริมาณรังสีในภาคบรรจุชิ้นงานหลังฉายรังสีด้วยพลังงาน 12 MeV	98
3.61 ลักษณะการจับชิ้นงานเพื่อทำการวัดค่า t_r ของเครื่อง TVR 6000.....	99
3.62 ลักษณะการหิ้ววัดชิ้นงานเพื่อทำการวัดค่า t_r ของแผ่นเวเฟอร์ ด้วยเครื่อง TVR6000	99
3.63 ลักษณะการจับชิ้นงานเพื่อทำการวัดค่า t_{tr} ของไดโอด ที่ประกอบตัวถึงแล้ว ด้วยเครื่อง TVR6000.....	100
3.64 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A.....	100
3.65 หัววัด Cascade Microtech Model M150	101
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_r) ต่อปริมาณของการฉาย รังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสี 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 kGy บนแผ่นผลึกซิลิคอน.....	102
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_r) ต่อปริมาณของการฉายรังสี อิเล็กตรอน ที่ปริมาณรังสี 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 kGy ของไดโอด หลังประกอบตัวถึง.....	103
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_r) ต่อปริมาณของการฉายรังสี อิเล็กตรอน ที่ปริมาณรังสี 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 kGy ของไดโอด บนแผ่นผลึกซิลิคอน, หลังการประกอบตัวถึง และหลังจากการแอนนัล.....	104
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ t_r ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 kGy บนแผ่นผลึกซิลิคอน	105
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ t_r ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 kGy ของไดโอดหลังประกอบตัวถึง.....	106
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_r) ต่อปริมาณของการฉายรังสี อิเล็กตรอน ที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 kGy ของไดโอดบนแผ่นผลึกซิลิคอน , หลังการประกอบตัวถึง และหลังจากการแอนนัล.....	107
4.7 การกระจายตัวของค่าค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_r) ของไดโอดที่ประกอบเข้ากับตัวถึงหลังการ ฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณต่างๆ	108
4.8 ผลกระทบของปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่อค่าแรงดันพังทลาย (V_B) หลังการประกอบเข้าตัวถึง ที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 kGy.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 XI
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลกระทบของปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่อค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ I _R หลังการประกอบเข้าตัวถึงที่ปริมาณรังสี 50,75 และ 100 KGy.....	110
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า (V _F) ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ของไดโอดหลังการประกอบตัวถึง ที่ปริมาณรังสี 50,75 และ 100 KGy	111
4.11 ผลกระทบของปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่อค่ากระแสอิ่มตัว (I ₀) หลังการประกอบเข้าตัวถึงที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 KGy.....	112
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน (V) และค่ากระแส (I) ของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ของไดโอดหลังการประกอบตัวถึงที่ปริมาณรังสี 50,75 และ 100 KGy.....	114



รายการสัญลักษณ์

A	คือ พื้นที่รอยสัมผัสรอยต่อพี-เอ็น
C_j	คือ ความจุไฟฟ้ารอยต่อ
C_A	คือ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าบริเวณพื้นที่หน้าตัด
C_p	คือ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าบริเวณขอบ
K	คือ ค่าคงที่โบลซ์มันน์
I_0	คือ กระแสอิ่มตัว
I_d	คือ กระแสที่เกิดจากการแพร่
I_{Gen}	คือ กระแสการเกิด
J_R	คือ ความหนาแน่นกระแสย้อนกลับ
J_A	คือ ความหนาแน่นกระแสบริเวณพื้นที่หน้าตัด
J_p	คือ ความหนาแน่นกระแสบริเวณขอบ
n	คือ ความหนาแน่นโฮล
p	คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอน
N_A	คือ ความหนาแน่นอะตอมผู้รับ
N_D	คือ ความหนาแน่นอะตอมผู้ให้
n_0	คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในภาวะสมดุล
n_{po}	คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี
n_{no}	คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
p_0	คือ ความหนาแน่นของโฮลในภาวะสมดุล
p_{po}	คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี
p_{no}	คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
T	คือ อุณหภูมิ
V_A	คือ แรงดันไบอัส
V_R	คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ
W	คือ เขตปลอดพาหะ
W_A	คือ เขตปลอดพาหะที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อพื้นที่หน้าตัด
W_R	คือ เขตปลอดพาหะที่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบด้านข้าง
\mathcal{E}	คือ สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ
\mathcal{E}_{si}	คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน
τ_g	คือ อายุการเกิดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันเรากำลังอาศัยอยู่ในโลกอิเล็กทรอนิกส์และดิจิทัลคอมพิวเตอร์ ศาสตร์ของอิเล็กทรอนิกส์ทำให้มนุษย์เราสรรสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกขึ้นมามากมาย และดูเหมือนไม่ว่าเราจะมองไป ณ ที่แห่งใดก็ตามที่อารยธรรมของมนุษย์แผ่ไปถึง เราก็จะพบสิ่งประดิษฐ์ของมนุษย์ ที่มีส่วนของอิเล็กทรอนิกส์เป็นองค์ประกอบอยู่แทบทั้งสิ้น จนอาจกล่าวได้ว่าอิเล็กทรอนิกส์เป็นพื้นฐานของอารยธรรมสมัยใหม่ งานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีในตอนนี้ จึงมุ่งไปที่เทคโนโลยีที่การปรับเปลี่ยนทิศทาง และพัฒนาศาสตร์ของอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อปี ค.ศ.1950 ยุคอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) ได้เริ่มต้นขึ้น เป็นการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ในการควบคุมพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังหมายถึงเรื่องของกรวิจัยในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ, การควบคุม, การคำนวณ, และการบูรณาการของระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการประมวลผลพลังงานตามเวลาที่เปลี่ยนไม่เชิงเส้น ที่เป็นพลวัตของความเร็ว

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงตัวแรกคือวาล์วปรอทอาร์ก (mercury-arc valve) ในระบบสมัยใหม่ การแปลงระบบไฟฟ้าจะดำเนินการด้วยอุปกรณ์สวิตช์เซมิคอนดักเตอร์เช่นไดโอด, ทายริสเตอร์ (thyristors), และทรานซิสเตอร์ซึ่งถูกบุกเบิกโดย RD Middlebrook และอื่น ๆ เริ่มต้นหลังปี 1950 ทำงานตรงกันข้ามกับระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการส่งและการประมวลผลของสัญญาณและข้อมูล, อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำงานกับพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากเช่น AC to DC converter (วงจรเรียงกระแส หรือ rectifier เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่พบมากที่สุดในการนำเอาพลังงานไฟฟ้ามาใช้) อิเล็กทรอนิกส์สำหรับผู้บริโภคหลายชนิดเช่น โทรทัศน์, เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล, เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ ฯลฯ ซึ่งกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีตั้งแต่หลายสิบลวัตต์จนถึงหลายร้อยวัตต์ การประยุกต์ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมคือ Variable Speed Drive (VSD) หรือไดรฟ์ความเร็วแปรได้ โดยใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ กำลังไฟฟ้าของ VSDs เริ่มต้นจากไม่กี่ร้อยวัตต์จนถึงหลายสิบลวัตต์ อุปกรณ์พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์อาจถูกใช้เป็นตัวสวิตช์หรือเป็นแอมพลิฟายเออร์ สวิตช์ในอุดมคติคือทำงานเปิดหรือปิดวงจรและไม่กระจายความร้อน มันทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และส่งผ่านกระแสทั้งหมดโดยไม่มีแรงดันตกคร่อม นั่นคือต้องไม่มีการสูญเสียพลังงานในสวิตช์เลย ในทางตรงกันข้าม ในกรณีของแอมพลิฟายเออร์ กระแสที่ไหลผ่านตัวมันแปรผันอย่างต่อเนื่องตามอินพุตที่มีควบคุมมันอยู่ แรงดันและกระแสที่เข้าอุปกรณ์เป็นไปตามโหลดและพลังงานที่กระจายในตัวอุปกรณ์มีมากกว่าพลังงานที่ส่งไปยังโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะหลายประการเป็นตัวกำหนดวิธีการนำอุปกรณ์ที่ใช้ เช่น ไดโอดจะทำงานเมื่อมีแรงดันระหว่างขั้วทั้งสองและไม่สามารถควบคุมจุดเริ่มต้นของการไหลของกระแสได้ อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น SCR และ thyristors (เช่นเดียวกับวาล์วปรอทและอดีต thyatron) สามารถควบคุมจุดเริ่มต้นของการไหลของกระแสได้ แต่ขึ้นอยู่กับกรลับขั้วของขาควบคุมเพื่อหยุดการทำงาน อุปกรณ์อื่น เช่น ประตูปิด thyristors , bipolar ทรานซิสเตอร์, (BJT) และ MOSFET ควบคุมการเปิดปิดได้ดีกว่า โดยไม่คำนึงถึงทิศทางกระแสควบคุม อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ยังช่วยในการขยายสัญญาณ แต่ไม่ค่อยถูกนำมาใช้กับระบบที่ใช้พลังงานไม่กักร้อยวัตต์ ลักษณะการควบคุมของอินพุทของอุปกรณ์ส่งผลกระทบต่อกรออกแบบ, บางครั้งอินพุทควบคุมมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากเมื่อเทียบกับดินและต้องหามาจากแหล่งต่างหาก เนื่องจากประสิทธิภาพเป็นที่ต้องการอย่างสูงในการแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง, การสูญเสียที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องทำให้ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

อุปกรณ์ทั้งหลายมีความแตกต่างกันที่ความเร็วในการเปิดปิด บางไดโอดและบาง thyristors จะเหมาะสำหรับความเร็วค่อนข้างช้าและมีประโยชน์สำหรับการสวิตช์และการควบคุมความถี่ thyristors บางตัวเป็นประโยชน์ที่ไม่กิโลเฮิรตซ์ อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น MOSFETS และ BJTs สามารถสวิตช์ที่หมื่นกิโลเฮิรตซ์จนถึงไม่กี่เมกะเฮิรตซ์ แต่ระดับพลังงานลดน้อยลง พลังงานที่สูงมาก (ร้อยๆ กิโลวัตต์) ที่ความถี่สูงมาก ๆ (ร้อยหรือหลายพันเมกะเฮิรตซ์) ยังคงเป็นพื้นที่ที่อุปกรณ์หลอดสุญญากาศครอบครองอยู่ กรใช้อุปกรณ์สวิตซ์ที่เร็วขึ้นช่วยลดการสูญเสียพลังงานในการปิดเปิด กลับไปกลับมา แต่อาจสร้างปัญหาเกี่ยวกับการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา วงจรไดรฟ์ประตูปิด (หรือเทียบเท่า) ต้องถูกออกแบบให้จ่ายกระแสไดรฟ์เพียงพอเพื่อให้อุปกรณ์ทำหน้าที่สวิตช์ได้อย่างเต็มที่ อุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการไดรฟ์เพียงพอที่จะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วอาจจะถูกทำลายด้วยความร้อนส่วนเกิน

อุปกรณ์ที่ใช้งานได้จริงมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระจายพลังงาน (รวมทั้งความร้อน) เมื่อเปิดและใช้เวลาในการทำงานจนกว่าจะถึงสถานะ "ปิด" ความสูญเสียเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของการสูญเสียของ converter

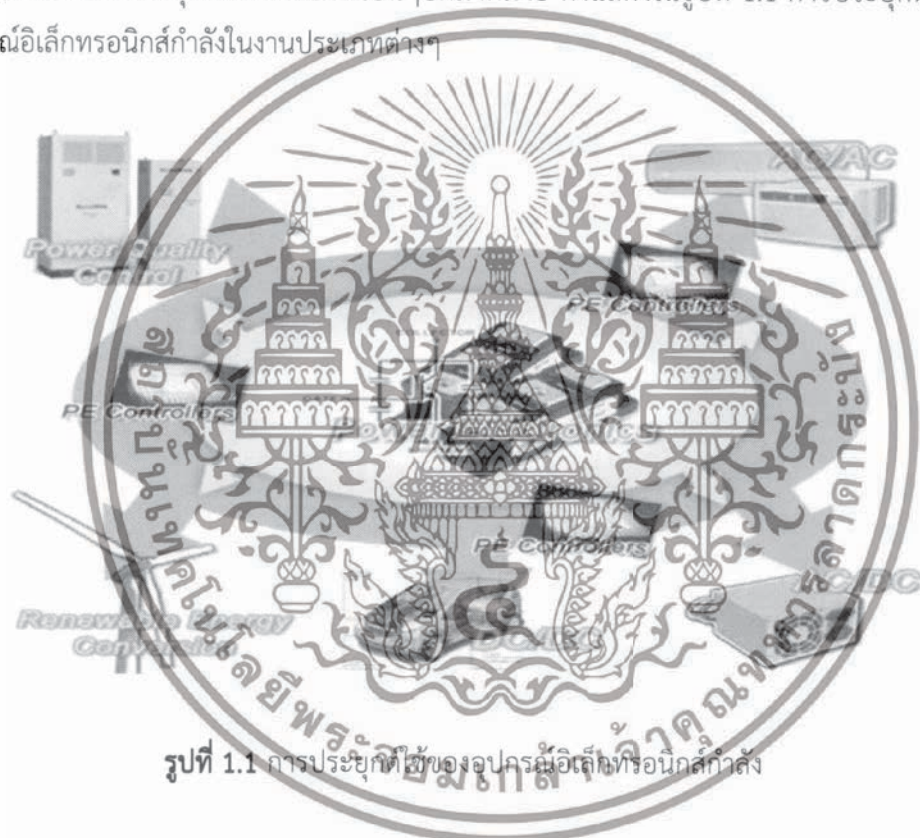
การจัดการพลังงานและการกระจายความร้อนของอุปกรณ์ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พาวเวอร์อาจจะต้องกระจายความร้อนทั้งไปหลายสิบหรือหลายร้อยวัตต์ แม้กรสวิตช์จะมีประสิทธิภาพเท่าที่เป็นไปได้ระหว่างสภาวะการนำกระแสและไม่นำกระแส ในโหมดสวิตซ์ พลังงานที่เอาท์พุทมีขนาดใหญ่มากกว่าพลังงานความร้อนที่กระจายไปในสวิตช์ เซมิคอนดักเตอร์พลังงานสูงจำเป็นต้องมี heat sink หรือระบบระบายความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิของ junction ไม่ให้สูงเกินไป เซมิคอนดักเตอร์ที่แปลกใหม่เช่นซิลิกอนคาร์ไบด์มีข้อได้เปรียบเหนือซิลิกอนธรรมดาในแง่นี้และเหนือเจอร์เมเนียม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ solid-state ในปัจจุบันอาจถูกใช้บ่อยลง เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เอื้ออำนวยที่อุณหภูมิสูง

อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ที่มีอยู่ทำงานที่ไม่กิโลโวลต์ในตัวเดียวๆ ในกรณีที่จะต้องทำงานกับแรงดันไฟฟ้าที่สูงๆ ต้องใช้อุปกรณ์หลายๆตัวต่อกันแบบอนุกรม อีกครั้งที่ความเร็วในการสวิตช์เป็นปัจจัยสำคัญเนื่องจากอุปกรณ์ตัวที่สวิตซ์ช้าที่สุด จะต้องทนต่อแรงดันไฟฟารวม วาล์วปรอทในอดีตทำงานได้ถึง 100 กิโลโวลต์ในเครื่องเดียว ทำให้เป็นการง่ายในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสายส่ง

เอกรสารที่มีประจุบวกหรือลบที่เคลื่อนที่ผ่านในทิศทางหนึ่งหรือสองทิศทางในขณะเดียวกันนั้น มีอยู่ทั่วไปในระบบอิเล็กทรอนิกส์ การนำไฟฟ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสตรงความดันสูง หรือ HVDC อัตรากระแสที่ใช้งานของอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์จะถูกจำกัดโดย ความร้อนที่เกิดภายใน dies และความร้อนที่เกิดขึ้นในความต้านทานของจุดเชื่อมต่อของสายไฟ(ลีด) อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์จะต้องได้รับการออกแบบเพื่อให้กระแสมีการกระจายอย่างเท่าเทียมกันข้าม รอยต่อภายในของตน (หรือช่อง); เมื่อ "hot spot" เกิดขึ้น breakdown effect สามารถทำลาย อุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็ว SCRs บางตัวในปัจจุบันมีอัตรากระแสถึง 3000 แอมแปร์ในเครื่องเดียว

โดยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังสูงนั้นเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากในการประยุกต์ใช้งาน แปลงไฟฟ้าแรงสูงแทบทุกประเภท ไม่ว่าจะใช้งานในด้านสวิตชิงเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า จากรูปแบบหนึ่ง ไปยังรูปแบบหนึ่ง เช่น ใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์ วงจรจ่ายไฟแรงสูงกระแสตรง ระบบเหนี่ยวนำ ความร้อนและยังประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ อีกมากมาย ดังแสดงในรูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งาน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในงานประเภทต่างๆ



รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญมากต่อการใช้งานหลาย ประเภท โดยนำมาประยุกต์ใช้กับวิทยาศาสตร์แขนงต่างๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์และสามารถ ตอบสนองการใช้งานได้อย่างเหมาะสม ซึ่งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกได้ว่าเป็นอุปกรณ์เบื้องต้น ที่มีความสำคัญและมีการใช้งานมากที่สุด

ไดโอดกำลัง เป็นไดโอดที่ออกแบบให้บริเวณรอยต่อมีช่วงกว้างมากกว่าไดโอดทั่วไป เพื่อนำไปใช้กับงานที่มีกำลังไฟฟ้าสูง กระแสสูงและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ เช่น ประกอบเป็นวงจรเรียง กระแส ในอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อพิกัดกระแสไฟฟ้ามีค่าหลายร้อยแอมแปร์ ทำให้ไดโอดมีอุณหภูมิขณะทำงานสูง โดยทั่วไปจึงนิยมใช้ร่วมกับตัวระบายความร้อน (Heat Sinks) เพื่อเพิ่มพื้นที่ระบายความร้อนภายในตัวไดโอดกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากไดโอดกำลังโดยส่วนใหญ่มักจะทำงานภายใต้เงื่อนไขที่สภาวะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่สูงมาก ซึ่งในทางทฤษฎีนั้น เมื่อไดโอดกำลังทำงานอยู่ในช่วงไบอัสย้อนกลับจะก่อให้เกิดกระแสรั่วไหลส่วนหนึ่งเกิดขึ้น และปริมาณน้อยมาก แต่การใช้งานทางปฏิบัติกลับพบว่า กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นนี้อาจมีปริมาณมากโดยเปลี่ยนแปลงขึ้นตามแรงดันไบอัสกลับโดยเฉพาะในช่วงที่ได้รับแรงดันไบอัสกลับค่าสูงๆซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารเจือ และส่วนหนึ่งยังเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของอุปกรณ์เป็นส่วนสำคัญมากที่ทำให้การทำงานของไดโอดผิดเพี้ยนและอาจส่งผลให้วงจรหรือระบบไฟฟ้าเสียหายได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดกำลัง โครงสร้างแบบเมซ่า

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างซิลิคอนไดโอดกำลัง ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อเมซ่าที่สร้างบนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นความต้านทานแผ่นที่ 19-22 Ω -cm ความหนาประมาณ 250 μ m พื้นที่ประสิทธิผลของไดโอดคือ 1.27x1.27 mm² ไปฉายลำรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสีต่างๆ เพื่อศึกษาผลของการฉายลำรังสีอิเล็กตรอน โดยปริมาณรังสีที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 50,75,100,150,200,250 และ 300 kGy แต่ละปริมาณรังสีจะทดสอบกับไดโอดจำนวน 50 ตัวทั้งนี้ เพื่อดูการกระจายตัวของคุณสมบัติหลังการฉายรังสีเพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมหลังการฉายรังสี ไดโอดเหล่านี้จะถูกวัดค่า I_s ทั้งก่อนและหลังการนำไปประกอบกับตัวถัง (Diode Assembly) เพื่อการทดลองใช้งานจริงและตรวจสอบการกระจายของคุณสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ อันได้แก่ ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (T_{rr}) ค่าแรงดันไฟฟ้ตกคร่อม (V_F) ค่าแรงดันพังทลาย (V_B) ค่ากระแสอิ่มตัว (I_0) ค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_r) และค่าความต้านทาน (R)

ทั้งนี้ในการศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีผลต่อซิลิคอนพินไดโอดกำลัง โครงสร้างแบบเมซ่า ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี ในด้านสวิตซิ่ง มีการตอบสนองที่รวดเร็ว สามารถทนแรงดันสูงได้ รวมไปถึงช่วยลดการสูญเสียพลังงานของตัวอุปกรณ์อีกด้วย

1.3 สมมติฐานของปัญหา

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีผลต่อซิลิคอนพินไดโอดกำลัง โครงสร้างแบบเมซ่า รังสีอิเล็กตรอนจะเข้าไปสร้างจุดบกพร่องภายในตัวอุปกรณ์ ซึ่งอาจเกิดจุดบกพร่องได้หลายสาเหตุ อาทิ การเกิดการบิดเบี้ยวของโครงร่างอะตอมตั้งแต่เริ่มสร้าง (Self Interstitial Atom), การเกิดช่องว่างภายในโครงร่าง (Vacancy), การที่อนุภาคอื่นเข้าไปแทนที่อนุภาคเดิม (Substitution Impurity Atom) หรือการที่อนุภาคอื่นเข้าไปแทรกอยู่ในตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่าง (Interstitial Impurity Atom) นั้น จะไปทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของกระแสซึ่งเป็นศูนย์กลางการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนน้อยซึ่งจะส่งผลต่อคุณลักษณะไฟตรง

เอกภพเป็นเอกภพหนึ่งที่มีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่เว้นกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยงานวิจัยนี้จะนำเสนอผลกระทบต่างๆทางคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนฟิโนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่พลังงาน 12 MeV ปริมาณของรังสี 7 รังสีคือ 50,75,100,150,200,250 และ 300 kGy ตามลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานด้านสวิตชิงและลดการสูญเสียพลังงานของตัวอุปกรณ์ได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในการเพิ่มประสิทธิภาพความเร็วในการทำงาน หรือมีสวิตชิงในการทำงานสูง ของตัวอุปกรณ์ซิลิคอนฟิโนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า ให้มีประสิทธิภาพสูงและลดการสูญเสียพลังงานของตัวอุปกรณ์นั้นมีหลายวิธี อาทิเช่น เทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือ [6] โดยใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการแพร่ ซึ่งกระบวนการแพร่เป็นเป็นเทคนิคที่ไม่สามารถทำซ้ำได้และโดยปกติแล้วจะทำการขึ้นตอนท้ายสุดของกระบวนการสร้างภายในห้องสะอาด และอีกเทคนิคหนึ่งคือเทคนิคการฉายรังสี โดยอนุภาคพลังงานสูงจะผ่านเข้าไปในโครงสร้างผลึก พลังงานเหล่านั้นเกิดการสูญเสียเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับโครงสร้างอะตอมซึ่งทำให้เกิดการย้ายตำแหน่งจากที่เดิมที่เคยอยู่ และเกิดเป็นตำหนิหรือจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึก โดยความเสียหายของโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงท้ายสุดของอนุภาค ส่งผลทำให้เกิดศูนย์กลางการรวมตัวในซิลิคอนได้ โดยรังสีที่สามารถนำมาใช้ในเทคนิคนี้ ที่มีผลต่อค่าอายุของพาหะ ได้แก่ รังสีอิเล็กตรอน รังสีแกมมา รังสีอัลฟา และรังสีโปรตอน [4-5]

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างซิลิคอนฟิโนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า จากนั้นก็นำมาฉายรังสีอิเล็กตรอนที่พลังงาน 12-MeV ที่ปริมาณ 7 รังสีคือ 50, 75, 100, 150, 200, 250 และ 300 kGy ตามลำดับ โดยได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบและเปรียบเทียบผลของการฉายรังสีที่มีผลต่อการปรับปรุงซิลิคอนฟิโนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า แล้วทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- 1) ค่าเวลาที่ฟื้นตัวย้อนกลับ (t_r)
- 2) ค่าแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้า (V_F)
- 3) ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (V_R)
- 4) ค่าแรงดันพังทลาย (V_B)
- 5) ค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R)
- 6) ค่ากระแสอิ่มตัว (I_0)
- 7) ค่าความต้านทาน (R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1) ศึกษาค่าเวลาพื้นตัวย้อนกลับของซิลิคอนฟีนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า ที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน

2) ศึกษาผลของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีผลต่อค่าเวลาพื้นตัวย้อนกลับของซิลิคอนฟีนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณ ต่างๆดังนี้ 50, 75, 100, 150, 200, 250 และ 300 kGy ตามลำดับ

3) ศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของซิลิคอนฟีนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า ที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน

4) ศึกษาผลของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่อลักษณะคุณสมบัติของซิลิคอนฟีนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า รวมทั้งวัดและวิเคราะห์ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณ ต่างๆดังนี้ 50, 75 และ 100 kGy ตามลำดับ

5) นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อสรุปผลหาแนวทางปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบและกระบวนการผลิตซิลิคอนฟีนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า ต่อไป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท ประกอบไปด้วย

บทที่ 1 บทนำ บทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญ ปัญหา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวคิดและวิธีการแก้ไขปัญหาที่ใช้ในภาพรวมของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎี บทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการทำงานของซิลิคอนฟีนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า และคุณสมบัติของรังสีอิเล็กตรอน

บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด บทนี้จะกล่าวถึงหลักการใช้และคุณสมบัติต่างๆของเครื่องมือที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และการวัด ในการทดลองครั้งนี้

บทที่ 4 การออกแบบและการสร้างบทนี้จะกล่าวถึง ขั้นตอนการสร้างซิลิคอนฟีนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า และขั้นตอนการเตรียมการฉายรังสีอิเล็กตรอน

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง บทนี้จะกล่าวถึง ขั้นตอนการฉายรังสีอิเล็กตรอน การวัดค่าเวลาพื้นตัวย้อนกลับ วัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของตัวอุปกรณ์

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ไดโอดกำลัง (Power Diode) เป็นไดโอดที่ออกแบบให้บริเวณรอยต่อมีช่วงกว้างมากกว่า ไดโอดทั่วไป เพื่อนำไปใช้กับงานที่มีกำลังไฟฟ้าสูง กระแสสูงและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ เช่น ประกอบเป็นวงจรเรียงกระแส ในอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อพิกัดกระแสไฟฟ้ามียค่าหลายร้อยแอมป์ ทำให้ไดโอดมีอุณหภูมิขณะทำงานสูง โดยทั่วไปจึงนิยมใช้ร่วมกับตัวระบายความร้อน (Heat Sinks) เพื่อเพิ่มพื้นที่ระบายความร้อนภายในตัวไดโอดกำลัง

ไดโอดกำลังแบบซิลิคอน ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวเรียงกระแสไฟฟ้ากำลัง (power rectifier) เริ่มถูกนำมาใช้งานในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronic system) ตั้งแต่ช่วงทศวรรษที่ 1950 กระทั่งทศวรรษ 1980 สามารถผลิตจำหน่ายในเชิงการค้าได้ โดยไดโอดกำลังในขณะนั้นเป็นแบบกึ่งพวงศักร์ยซิลิคอน หรือแบบ PIN โดยที่ไดโอดกำลังแบบซิลิคอนจะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงแรงดันต่ำกว่า 100 V เนื่องจากแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำกว่า และมีความเร็วสวิตชิ่งสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับไดโอดกำลัง PIN แต่เนื่องจากมีความต้านทานอนุกรมสูงจากบริเวณการดริฟท์ (เป็นบริเวณที่ประจุพาหะเคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้า) ซึ่งเกิดจากผลการออกแบบไดโอดกำลังแบบซิลิคอนให้สามารถทนแรงดันได้มากขึ้น อีกทั้งมีค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับค่อนข้างสูงโดยเฉพาะในช่วงได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าสูงๆ ด้วยเหตุนี้โดยทั่วไปแล้วไดโอดกำลังแบบ PIN จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในกรณีที่ต้องการให้ไดโอดกำลังสามารถทนแรงดันได้มากกว่า 100 V โดยออกแบบให้ตัวอุปกรณ์มีสมรรถนะที่สูงขึ้นจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.1 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

นิยามของอิเล็กทรอนิกส์กำลังอาจกล่าวได้ว่าเป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังสำหรับการควบคุม และการแปลงผัน (Conversion) กำลังไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นสาขาวิชาที่ประยุกต์ใช้ และนำความรู้ทางด้านกำลังไฟฟ้า (Power), อิเล็กทรอนิกส์ และระบบควบคุม (Control System) มาใช้ในการแปลงผัน หรือควบคุมกำลังไฟฟ้า ในการควบคุมจะอาศัยวิชาทางระบบควบคุม มาใช้ในการวิเคราะห์ และแก้ปัญหาเกี่ยวกับคุณลักษณะทั้งสภาวะการคงตัว (Steady-State) และสภาวะทางพลศาสตร์ (Dynamic) ของการควบคุมระบบแบบปิด (Close Loop Control) ความรู้ทางด้านระบบไฟฟ้ากำลังจะเกี่ยวข้องกับวิชานี้ในด้านของอุปกรณ์ทางไฟฟ้ากำลังทั้งอุปกรณ์ที่ไม่มีกระแสเคลื่อนที่ และอุปกรณ์ที่มีการหมุน เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น อีกส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องคือ คุณลักษณะการส่งผ่าน และจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ส่วนสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์จะเกี่ยวข้องกับวิชานี้ในเรื่องของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และวงจรสำหรับทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมพื้นฐานของวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์จะเกี่ยวข้องกับการสวิทช์ของอุปกรณ์กึ่งตัวนำกำลัง (Power semiconductor)

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก ทำให้พิกัดของอุปกรณ์เหล่านี้ในด้านความเร็วในการสวิทช์ และพิกัดกำลังของอุปกรณ์สูงขึ้น ซึ่งทำให้สามารถลดข้อจำกัดในอดีต และขยายประสิทธิภาพในการใช้งานวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านไมโครโปรเซสเซอร์ และไมโครคอมพิวเตอร์เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ส่งผลให้การควบคุมและการสังเคราะห์วิธีการควบคุมอุปกรณ์ และวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำได้ดีขึ้นเช่นกัน เป็นที่รู้กันโดยทั่วไปแล้วว่า วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นวงจรที่สำคัญ และใช้ในอุปกรณ์ทางไฟฟ้ากำลังหลายชนิด อาทิเช่น ระบบควบคุมความร้อน, ระบบควบคุมแสงสว่าง, ระบบควบคุมมอเตอร์, แหล่งจ่ายไฟ, รถยนต์ไฟฟ้า, ระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (HVDC) ฯลฯ สาขาวิชานี้มีการประยุกต์ใช้ความรู้ของหลายสาขาวิชาเข้าด้วยกัน เพื่อให้เข้าใจถึงการนำไปใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

2.1.1 ประวัติทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) เป็นการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ในการควบคุมพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังหมายถึง เรื่องของการวิจัยในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ, การควบคุม, การคำนวณ, และการบูรณาการของระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการประมวลผลพลังงานตามเวลาที่เปลี่ยนไม่เชิงเส้น ที่เป็นผลวัดของความเร็ว

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงตัวแรกคือวาล์วปรอทอาร์ก (mercury-arc valve). ในระบบสมัยใหม่ การแปลงระบบไฟฟ้าจะดำเนินการด้วยอุปกรณ์สวิทช์เซมิคอนดักเตอร์เช่น ไดโอด, ทายริสเตอร์ (thyristors), และทรานซิสเตอร์ซึ่งถูกบุกเบิกโดย RD Middlebrook และอื่นๆ เริ่มต้นหลังปี 1950. ทำงานตรงกันข้ามกับระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการส่งและการประมวลผลของสัญญาณและข้อมูล, อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำงานกับพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากเช่น AC to DC converter (วงจรเรียงกระแส หรือ rectifier เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่พบมากที่สุดในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับผู้บริโภคหลายชนิดเช่น โทรทัศน์, เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล, เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ ฯลฯ ซึ่งกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีตั้งแต่หลายสิบลวัตต์จนถึงหลายร้อยวัตต์ การประยุกต์ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมคือ Variable Speed Drive (VSD) หรือไดรฟ์ความเร็วแปรได้ โดยการใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ กำลังไฟฟ้าของ VSDs เริ่มต้นจากไม่กี่ร้อยวัตต์จนถึงหลายสิบลวัตต์ ระบบการแปลงพลังงานสามารถจำแนกตามชนิดของอินพุทและเอาต์พุทของกำลังได้แก่

- AC to DC (rectifier)
- DC to AC (inverter)
- (DC-DC converter)
- (AC-AC converter)

อิเล็กทรอนิกส์กำลังเริ่มต้นด้วยการพัฒนาของตัวเรียงกระแสปรอทอาร์ก (Mercury Arc Valve Rectifier) ที่ถูกประดิษฐ์คิดค้นโดยปีเตอร์ คูเปอร์ เฮวิตต์ในปี ค.ศ.1902 ปรอทอาร์ก rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การขโมยหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) แรงดันสูง. หลังปี 1920 มีการวิจัยต่อเนื่องโดยการใช้ thyratrons และปรอททาล์วอาร์กแบบกริดควบคุมในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power transmission) จากนั้น Uno Lamm ได้พัฒนาทาล์วทำด้วยขั้วไฟฟ้าเป็นชั้นๆมาแทนที่ทาล์วปรอทในระบบสายส่งกระแสตรงความดันสูง. ในปี ค.ศ.1933 วงจรเรียงกระแสด้วยซิลิเนียมก็ถูกประดิษฐ์ขึ้น

ในปี ค.ศ.1947 ทรานซิสเตอร์สองขั้วแบบ point contact ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยวอลเตอร์ เอช Brattain และจอห์น Bardeen ภายใต้การดูแลของวิลเลียม Shockley ที่ห้องปฏิบัติการโทรศัพท์เบลล์. ในปี ค.ศ.1948 การประดิษฐ์ของทรานซิสเตอร์สองขั้วแบบ junction (BJT) โดย Shockley ได้ปรับปรุงเสถียรภาพและประสิทธิภาพการทำงานของทรานซิสเตอร์และช่วยลดต้นทุนในการผลิต หลังปี 1950, พาวเวอร์ไดโอดสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าเริ่มถูกนำมาใช้แทนที่หลอดสุญญากาศ จากนั้นในปี ค.ศ.1956 ตัวเรียงกระแสควบคุมชนิดซิลิคอน หรือ Silicon-Controlled Rectifier (SCR) ถูกนำมาใช้โดย บริษัท General Electric ซึ่งทำให้มีการประยุกต์ใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพิ่มขึ้นอย่างมาก

ในทศวรรษที่ 1960 ความเร็วในการสวิตช์ของ BJTs ถูกใช้สำหรับการแปลง AC ความถี่สูงให้เป็น DC. ในปี ค.ศ.1976 power MOSFET ออกสู่ตลาด และในปี ค.ศ.1982 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) ถูกแนะนำในตลาด



รูปที่ 2.1 แหล่งจ่ายไฟในคอมพิวเตอร์ทั่วไปซึ่งเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังในเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านทั่วไป

อุปกรณ์พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์อาจถูกใช้เป็นสวิตช์หรือเป็นแอมพลิฟายเออร์[3] สวิตช์ในอุดมคติคือทำงานเปิดหรือปิดวงจรและไม่กระจายความร้อน มันทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และส่งผ่านกระแสทั้งหมดโดยไม่มีแรงดันตกคร่อม นั่นคือต้องไม่มีการสูญเสียพลังงานในสวิตช์เลย ในทางตรงกันข้าม ในกรณีของแอมพลิฟายเออร์ กระแสที่ไหลผ่านตัวมันแปรผันอย่างต่อเนื่องตามอินพุตที่ควบคุมมันอยู่ แรงดันและกระแสที่ขั้วอุปกรณ์เป็นไปตามโหลดและพลังงานที่กระจายในตัวอุปกรณ์มีมากกว่าพลังงานที่ส่งไปยังโหลด คุณลักษณะหลายประการเป็นตัวกำหนดวิธีการนำอุปกรณ์ที่ใช้ อุปกรณ์ เช่นไดโอดจะทำงานเมื่อมีแรงดันระหว่างขั้วทั้งสอง และไม่สามารถควบคุมจุดเริ่มต้นของการไหลของกระแสได้ อุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น SCR และ thyristors (เช่นเดียวกับทาล์วปรอทและอดีต thyatron) สามารถควบคุมจุดเริ่มต้นของการไหลของกระแสได้ แต่ขึ้นอยู่กับกรลกลับขั้วของขา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมเพื่อหยุดการทำงาน อุปกรณ์อื่น เช่นประตูปิด thyristors , bipolar ทรานซิสเตอร์, (BJT) และ MOSFET ควบคุมการเปิดปิดได้ดีกว่าโดยไม่คำนึงถึงทิศทางกระแสควบคุม อุปกรณ์ ทรานซิสเตอร์ยังช่วยในการขยายสัญญาณ แต่ไม่ค่อยถูกนำมาใช้กับระบบที่ใช้พลังงานไม่กี่ร้อยวัตต์ ลักษณะการควบคุมของอินพุทของอุปกรณ์ส่งผลกระทบต่อการทำงาน, บางครั้งอินพุท ควบคุมมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากเมื่อเทียบกับดินและต้องหามาจากแหล่งต่างหาก เนื่องจาก ประสิทธิภาพเป็นที่ต้องการอย่างสูงในการแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง, การสูญเสียที่อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ต้องทำให้ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

อุปกรณ์ทั้งหลายมีความแตกต่างกันที่ความเร็วในการเปิดปิด บางไดโอดและบาง thyristors จะเหมาะสำหรับความเร็วค่อนข้างช้าและมีประโยชน์สำหรับการสวิตช์และการควบคุมความถี่, thyristors บางตัวเป็นประโยชน์ที่ไม่ก็โกลเฮิร์ตซ์ อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น MOSFETS และ BJTs สามารถ สวิตช์ที่หมื่นกิโลเฮิร์ตซ์จนถึงไม่กี่เมกะเฮิร์ตซ์ แต่ระดับพลังงานลดน้อยลง พลังงานที่สูงมาก (ร้อยๆ กิโลวัตต์) ที่ความถี่สูงมาก (ร้อยหรือหลายพันเมกะเฮิร์ตซ์) ยังคงเป็นพื้นที่ที่อุปกรณ์หลอด สูญญากาศครอบครองอยู่ การใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่เร็วขึ้นช่วยลดการสูญเสียพลังงานในการเปิดปิด กลับไปกลับมา แต่อาจสร้างปัญหากับการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา วงจรไดรฟ์ประตู (หรือ เทียบเท่า) ต้องถูกออกแบบให้จ่ายกระแสไดรฟ์ที่พอเพียงเพื่อให้อุปกรณ์ทำหน้าที่สวิตช์ได้อย่างเต็มที่ อุปกรณ์ที่ไม่ได้รับการไดรฟ์เพียงพอที่จะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วอาจจะถูกทำลายด้วยความร้อนส่วนเกิน อุปกรณ์ที่ใช้งานได้จริงมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระจายพลังงาน (รวมทั้งความร้อน) เมื่อเปิดและ ใช้เวลาในการทำงานจนกว่าจะถึงสถานะ "ปิด" ความสูญเสียเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญการสูญเสีย ของ converter การจัดการพลังงานและการกระจายความร้อนของอุปกรณ์ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญใน การออกแบบ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พาวเวอร์อาจจะต้องกระจายความร้อนทิ้งไปหลายสิบหรือหลาย ร้อยวัตต์ แม้การสวิตช์จะมีประสิทธิภาพเท่าที่เป็นไปได้ระหว่างสถานะการนำกระแสและไม่นำกระแส ในโหมดสวิตช์ พลังงานที่เอาท์พุทมีขนาดใหญ่กว่าพลังงานความร้อนที่กระจายไปในสวิตช์ เซมิคอน ดักเตอร์พลังงานสูงจำเป็นต้องมี heat sink หรือระบบระบายความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิของ junction ไม่ให้สูงเกินไป เซมิคอนดักเตอร์ที่แปลกใหม่เช่นซิลิกอนคาร์ไบด์มีข้อได้เปรียบเหนือซิลิกอน ธรรมดาในแง่นี้และเหนือเจอร์เมเนียม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ solid-state ในปัจจุบันอาจถูกใช้ น้อยลงเนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เอื้ออำนวยที่อุณหภูมิสูง อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ที่มีอยู่ทำงานที่ไม่ก็ กิโลโวลต์ในตัวเดียวๆ ในกรณีที่จะต้องทำงานกับแรงดันไฟฟ้าที่สูงๆ ต้องใช้อุปกรณ์หลายๆตัวต่อกัน แบบอนุกรม อีกครั้งที่ความเร็วในการสวิตช์เป็นปัจจัยสำคัญเนื่องจากอุปกรณ์ตัวที่สวิตช์ช้าที่สุด จะต้องทนต่อแรงดันไฟฟารวม วาล์วปรอทในอดีตทำงานได้ถึง 100 กิโลโวลต์ในเครื่องเดียว, ทำให้ เป็นการง่ายในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบสายส่งกระแสตรงความดันสูง หรือ HVDC อัตรากระแสที่ ใช้งานของอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์จะถูกจำกัดโดยความร้อนที่เกิดภายใน dies และความร้อนที่ เกิดขึ้นในความต้านทานของจุดเชื่อมต่อของสายไฟ (ลีด) อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์จะต้องได้รับการ ออกแบบเพื่อให้กระแสมีการกระจายอย่างเท่าเทียมกันข้ามรอยต่อภายในของตน (หรือช่อง); เมื่อ "hot spot" เกิดขึ้น breakdown effect สามารถทำลายอุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็ว SCRs บางตัวใน ปัจจุบันมีอัตรากระแสถึง 3000 แอมแปร์ในเครื่องเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมาอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังอื่นๆนอกจากไทรสเตอร์ได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์มากขึ้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในปัจจุบันอาจแบ่งได้ดังนี้

1. ไดโอดกำลัง
2. ตัวเรียงกระแสควบคุมชนิดซิลิคอน (SCR)
3. ไทรสเตอร์
 - 3.1 ไทรสเตอร์แบบฟอร์ซคอมมิวเตท (forced Commutated Thyristor)
 - 3.2 ไทรสเตอร์แบบไลน์คอมมิวเตท (Line Commutated Thyristor)
 - 3.3 เกตเทรินออฟไทรสเตอร์ (GTO)
 - 3.4 รีเวิร์สคอนดักติ้งไทรสเตอร์ (RCT)
 - 3.5 สเตติกอินดักชั่นไทรสเตอร์ (SITH)
 - 3.6 เกท-แอลไซล์-เทรินออฟไทรสเตอร์ (GATT)
 - 3.7 LASCR
 - 3.8 MCTs
4. มอสเฟสกำลัง (Power MOSFET)
5. Insulated gate bipolar transistor (IGBT)
6. MOS-controlled thyristor (MCT)
7. Integrated gate-commutated thyristor (IGCT)
8. ทรานซิสเตอร์
 - ไดโอดกำลัง

ไดโอดกำลัง (Power Diode) ไดโอดประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นโลหะขนาดใหญ่ เพื่อช่วยในการระบายความร้อนภายในตัว, ซึ่มีขั้วเดียว, ไม่สามารถควบคุมได้, ใช้เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่ใช้ในงานเช่น วงจรเรียงกระแสและวงจรควบคุมทิศทางกระแสไหลของกระแส, การป้องกันแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับโดยการต่ออนุกรมกับโวลเตจซอสทำตัวเป็นสวิตซ์ มีโวลเตจตกคร่อมประมาณ 0.7 VDC (ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ทำไดโอด) ส่วนใหญ่จะใช้ในงานแหล่งจ่ายกำลัง ซึ่งมีกระแสสูง ทำงานได้ถึง 3000 amperes และ 5000 volts ในตัวเดียว ถ้าสูงกว่านี้ ต้องนำไดโอดหลายตัวมาต่ออนุกรมกัน

- ตัวเรียงกระแสควบคุมชนิดซิลิคอน (SCR)

เป็นอุปกรณ์กึ่งควบคุมจะ "เปิด" ให้กระแสไหลเมื่อมีพัลส์มาเปิดประตูและขั้วแอโนดเป็นบวกเมื่อเทียบกับขั้วแคโทด กระแสจะไหลได้ทางเดียวเหมือนกับไดโอด และจะไม่หยุดไหลจนกว่าจะลดหรือตัดความดันที่ขั้วแอโนดออก อุปกรณ์จึงจะ "ปิด" ความดันที่ประตูไม่สามารถ"ปิด"อุปกรณ์ได้ ทำงานได้ถึง 3000 แอมแปร์, 5000 โวลต์ในอุปกรณ์ซิลิคอนเดียว

- ไทรสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอุปกรณ์สามขั้วในเครือเดียวกับ SCRs, GTOs และ MCTs ส่วนใหญ่จะยอมให้กระแสไหลผ่านเมื่อมีพัลส์ที่มีค่าๆหนึ่งมาเปิดประตูและจะปิดประตูเมื่อแรงดันที่แอโนดลดลงถึงจุดหนึ่ง ซึ่งค่าดังกล่าวถูกกำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต เมื่อมัน"Off" มันจะทำตัวเป็นอุปกรณ์ที่ปิดกั้นการไหลของกระแสเนื่องจากมีความดันกลับด้าน

เกตเทรินออฟไทรสเตอร์ (GTO) ไม่เหมือน SCR, gate turn-off thyristor สามารถเปิดและปิดด้วยพัลส์ที่ประตู แต่พัลส์ที่มาปิดประตูจะมีขนาดและกระแสสูงกว่าพัลส์ที่มาเปิดประตูมาก แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ปิดประตูนี้คือแรงดันเชิงลบจากประตูไปยังขอส ซึ่งปกติแล้วจะปรากฏเพียงระยะสั้นๆ แต่มีขนาดประมาณ 1/3 ของกระแสที่แอโนด วงจร snubber จึงจำเป็นต้องมีเพื่อสร้างสัญญาณสวิตช์ที่อุปกรณ์นี้ใช้งาน ถ้าไม่มีวงจร snubber, GTO จะไม่สามารถปิดการทำงานของอินดักทีฟโหลดได้ อุปกรณ์ในตระกูลเดียวกันเหล่านี้ไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลังอีกแล้ว หลังจากที่มีการพัฒนาในด้านเทคโนโลยี IGBT อุปกรณ์เหล่านี้ถูกพิจารณาว่าเป็นตัวบล็อกแรงดันไฟฟ้าแบบขั้วเดียวหรือสองขั้วที่ควบคุมได้

- มอสเฟสกำลัง (Power MOSFET)

ประโยชน์หลักของ Power MOSFET คือกระแสที่เบสสำหรับ BJT สูงมากแต่เมื่อเทียบเกือบกระแสที่ประตูเป็นศูนย์สำหรับ MOSFET เนื่องจาก MOSFET เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้า ไม่ใช่กระแสในการเปิดปิดประตูให้กระแสไหลจากเดรนมาขอส gate ไม่ได้ช่วยอะไรกับกระแสที่เดรนและขอส กระแสที่มาเปิด gate เป็นศูนย์ซึ่งทำให้ความร้อนที่เกิดจะมาจากกรปิดและเปิด ความสูญเสียใน MOSFETs ส่วนใหญ่จะมาจากความต้านทานช่วงที่เปิด, เวลาที่ใช้ในการปิดเปิดมีตั้งแต่ 10 nanosec ไปจนถึง 100 microseconds ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ ความต้านทานที่เดรนของ MOSFET จะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สูงขึ้น ความถี่ที่สูงขึ้นก็เพิ่มความต้านทานนี้เช่นกันนี้ทำให้ BJT น่าสนใจกว่า Power MOSFET สามารถนำมาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มกระแสและกำลังงานโดยรวม อุปกรณ์ใหม่ๆอาจมีคุณสมบัติดีกว่านี้ MOSFET ไม่จ่ายกระแสสองทางและไม่สามารถทำ reverse blocking ได้ โวลเตจที่ทำงานได้จะน้อยกว่า 1000 V เล็กน้อยและกระแสที่ประมาณ 100 A

- Insulated gate bipolar transistor (IGBT)

เป็นอุปกรณ์ที่รวมลักษณะที่ดีที่สุดของ MOSFETs และ BJTs. เช่นเหมือน MOSFET ที่มีความต้านทานที่เกตสูงจึงต้องการกระแสต่ำ และเหมือน BJTs ที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในช่วง"เปิด"ต่ำ ความสูญเสียพลังงานจึงต่ำ และทำงานคล้ายกับ GTO ที่สามารถป้องกันแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งบวกและลบ IGBT มี input capacitance น้อยกว่า MOSFET ซึ่งจะปรับปรุง Miller feedback effect ระหว่างการปิดเปิดที่มี dv/dt สูง กระแสที่ทำงานค่อนข้างสูงกว่า 1500 A และแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 3,000 โวลต์

- MOS-controlled thyristor (MCT)

ทำงานเหมือนทายริสเตอร์ที่สามารถ trigger ให้เปิดหรือปิดด้วยพัลส์ที่เกต เนื่องจากอินพุทเป็นเทคโนโลยีแบบ MOS จึงมีกระแสไหลน้อยมากจึงใช้สัญญาณควบคุมการทำงานที่ต่ำมาก อุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มี MOSFET input 2 ขา และ BJT output 2 ขา อินพุตถูกออกแบบมาให้ทำงานทั้งช่วงบวกและช่วงลบของสัญญาณ เอ้าท์พุทก็ปล่อยให้กระแสไหลได้ 2 ทิศทางเช่นกัน และทำ reverse blocking ได้ด้วย ปิดเปิดได้เร็ว รองรับแรงดันและกระแสสูง ประมาณ 100 A หรือมากกว่า

- Integrated gate-commutated thyristor(IGCT)

คล้ายกับ GTO แต่ไม่ต้องการกระแสสูงเพื่อเปิดหรือปิดเกท IGCT อุปกรณ์มีความต้านทานของอินพุตสูงมากเพราะใช้เกทไดรเวอร์ทำด้วย MOSFET. IGCT มีเอาต์พุตความต้านทานต่ำที่ไม่ต้องเสียพลังงานมากและรวดเร็วมากเหมือนอย่างคู่แข่งเช่น BJTs. บริษัท ABB มีการเผยแพร่เอกสารข้อมูลสำหรับอุปกรณ์ชนิดนี้และให้รายละเอียดของการทำงานภายใน อุปกรณ์ประกอบด้วยเกทที่สามารถเลือกให้แยกออกจากอินพุตได้, เอ้าท์พุทเป็น BJT ความต้านทานต่ำเพื่อให้มีความสูญเสียต่ำที่แรงดันและกระแสสูง สามารถรองรับการทำงานที่มากกว่า 5,000 VAC, 5,000 A ที่ความถี่สูงกว่าที่ GTO ทำได้

- ทรานซิสเตอร์

Bipolar Junction Transistor, BJT หรือทรานซิสเตอร์ทั่วไป ไม่สามารถใช้ที่พลังงานที่สูงๆ ได้ มันทำงานได้ช้ากว่าและมีความสูญเสียเนื่องจากความร้อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ MOSFET. BJTs กับ MOSFETs เป็นแบบ unipolar ไม่สามารถปิดกันแรงดันย้อนกลับได้ดียวกันในกรณีที่ติดตั้งคู่กับไดโอดป้องกัน BJT มี gain ของกระแสต่ำในงานพลังงานสูงๆ, จึงต้อง config ให้เป็นแบบคาร์ลิงตัน เพื่อรับมือกับกระแสที่ใช้โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การ config ให้ใช้ทรานซิสเตอร์หลายๆตัวทำให้ได้ สวิตช์ใหม่ประมาณ 0.1 ถึง 1 microseconds—อุปกรณ์มีเรตติ้งสูงสุดประมาณ 1500 V และเรตติ้งของกระแสค่อนข้างสูง มันสามารถนำมาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มความสามารถในการรองรับกำลังที่สูงขึ้น แต่จำกัดให้ประมาณ 5 ตัวอุปกรณ์สำหรับการแบ่งปันกระแส

2.1.3 ชนิดและคุณสมบัติของไดโอดกำลัง

ไดโอดกำลังสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ตามลักษณะในการกลับคืนตัวและเทคนิคการผลิตได้แก่

1. ไดโอดมาตรฐาน (Standard or General Purpose Diode)

เป็นไดโอดที่ใช้กับงานทั่วไปมีค่า Revert Recovery Time สูงประมาณ 25 μ S ปกติจะใช้กับงานความเร็วต่ำ ซึ่งใช้เวลาในการกลับคืนตัวไม่ใช่สิ่งที่คำนึงถึง ไดโอดชนิดนี้สามารถใช้กับกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ต่ำกว่า 1 แอมแปร์จนถึงหลายพันแอมแปร์ และใช้กับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 50 โวลต์ จนถึง 5 กิโลโวลต์

2. ไดโอดที่มีการกลับคืนตัวเร็ว (Fast Recovery Diode)

ไดโอดชนิด นี้จะมีค่าเวลากลับคืนตัวต่ำ ปกติจะน้อยกว่า 5 μ S สามารถใช้กับกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ต่ำกว่า 1 แอมแปร์จนถึง หลายร้อยแอมแปร์ และใช้กับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 50 โวลต์ จนถึง 3 กิโลโวลต์ จึงถูกนำไปใช้ในวงจรชอปเปอร์ (Chopper) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ทำงานที่ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตช์สูง โดยที่ไดโอดกำลังจะถูกต้องขนานกับอุปกรณ์สวิตช์กำลัง เช่น ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง (BJTs) มอสเฟสกำลัง (MOSFETs) และไอจีบีที (IGBTs) เป็นต้น ซึ่งไดโอดกำลังเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นฟรีวีลลิ่งไดโอด (Free-wheeling diode : FWD) กล่าวคือในกรณีที่อุปกรณ์สวิตช์กำลังจ่ายกระแสให้กับโหลด R-L เมื่ออุปกรณ์สวิตช์กำลังหยุดนำกระแสจะต้องมีกระแสผ่านโหลด เนื่องจากกระแสใน L หยุดไหลทันทีทันใดไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องมี FWD เพื่อทำหน้าที่เป็นเส้นทางให้กระแสไหล นอกจากนี้มีการใช้ FWD ทำหน้าที่หลายอย่าง เช่นในสวิตช์ของ Inverter และวงจรเรียงกระแส เป็นต้น

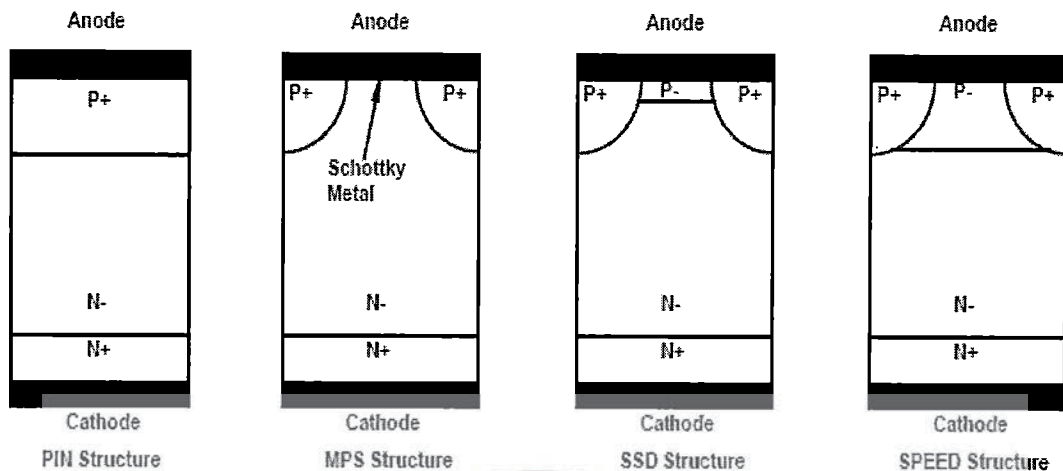
3. ซอตต์กีไดโอด (Schottky Diode)

โครงสร้างของไดโอดชนิดนี้สามารถกำจัดประจุที่สะสมอยู่บริเวณรอยต่อ PN ให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุด ทำให้เวลาในการกลับคืนตัวต่ำลง แต่กระแสนอนกลับจะสูงขึ้น สามารถใช้กับกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ต้น้อยกว่า 1 แอมแปร์จนถึง 30 แอมแปร์ และใช้กับแรงดันไฟฟ้าได้ไม่เกิน 100 โวลต์

2.1.4 โครงสร้างของไดโอดกำลังความเร็วสูง

ในการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง หรือต้องการไดโอดกำลังที่สามารถทนแรงดันพังทลายที่สูงกว่า 200 V ตัวอย่างเช่นการประยุกต์ใช้งานเพื่อควบคุมมอเตอร์นั้น นับว่าซิลิคอนไดโอดแบบ PiN เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากที่สุดที่วางจำหน่ายตามท้องตลาดในปัจจุบันถึงแม้ว่าอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำ แต่มีสมรรถนะด้าน reverse recovery ไม่ดีนัก เนื่องจากมีประจุสะสมเป็นจำนวนมากในบริเวณการดริฟท์ ดังนั้นธรรมดาแล้วจึงต้องการมีการปรับปรุงค่าระหว่าง on-state losses กับ switching losses ซึ่งทำได้โดยวิธีการควบคุมอายุของพาหะ แต่ที่จริงแล้วการปรับปรุงค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวยังสามารถทำได้โดยการปรับค่าประสิทธิภาพการฉีดพาหะ(carrier injection efficiency) ของรอยต่อขั้วบวก (anode junction) โดยใช้โครงสร้างแบบต่างๆได้แก่ โครงสร้างแบบ merged P-i-N/Schottky (MPS) โครงสร้างแบบ self - adjusting p emitter efficiency diode (SPEED) และ โครงสร้างแบบ static shielding diode (SSD) ดังรูปที่ 2.12 โดยโครงสร้างต่างๆเหล่านี้ ทำการทดลองโดยนักวิจัยกลุ่มหนึ่งเพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าที่เหมาะสมระหว่างค่า on-state voltage drop กับค่า reverse recovery ปรากฏว่าทุกโครงสร้างให้ผลระหว่างค่าความสัมพันธ์ทั้งสองที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับไดโอดกำลังแบบ P-i-N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังที่สามารถทนแรงดันสูง

แต่เนื่องจากไดโอดโครงสร้างแบบ MPS มีจำนวนชั้นตอนกระบวนการสร้างที่น้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงมีความเป็นไปได้ว่าซิลิคอนไดโอดโครงสร้างแบบ MPS น่าจะเป็นไดโอดกำลังที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในอนาคต เพราะเป็นไดโอดที่มีการสูญเสียกำลังน้อย และมีความเร็วในการทำงานสูง ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ต้องการลดการสูญเสียพลังงานให้น้อยลง แต่ต้องการความเร็วในการทำงานสูงมากขึ้น ดังเช่นในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าระบบอินเวอร์เตอร์ได้ถูกนำมาใช้งานมากขึ้น ทั้งในการควบคุมกระแสไฟฟ้าในยานยนต์ รถไฟฟ้าความเร็วสูง ระบบสายส่งกำลัง ตลอดจนเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เป็นต้น

2.2 โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N

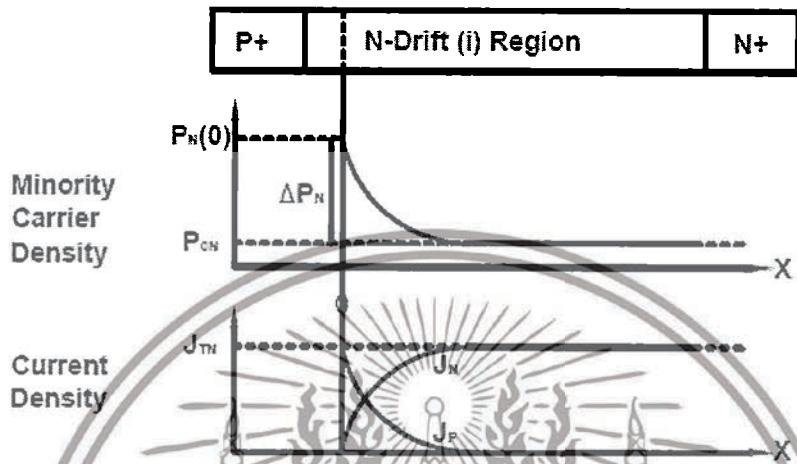
ตัวเรียงกระแสมีความต้องการในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอย่างมากถึงการควบคุมทิศทางไหลของกระแส มีความต้องการป้องกันแรงดันย้อนกลับที่สูงๆ ที่มีมากถึงระดับ 300-5000 V ตัวเรียงกระแสซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N จึงได้มีการพัฒนาขึ้น โดยแรงดันย้อนกลับที่รองรับได้ขึ้นอยู่กับบริเวณปลอดภัย ในรอยต่อโครงสร้างพี-เอ็น ซึ่งแรงดันส่วนใหญ่จะตกอยู่ในชั้นของเอ็นกับคุณสมบัติของชั้นพีที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระแสที่ไหลขณะ On-State โดยการออกแบบด้วยการเติมสารเจือความเข้มข้นต่ำให้แก่ด้านเอ็นซึ่งชั้นนี้เองเรียกว่า ชั้นอินทรินสิค (i-region)

การออกแบบซิลิคอนไดโอดกำลัง P-i-N เพื่อให้รองรับแรงดันสูง ในการฉีกระดับสูงของพหุส่วนน้อยภายในบริเวณปลอดภัย ซึ่งสามารถช่วยลดค่าความต้านทานจากความหนาได้ การเติมสารเจือในปริมาณที่น้อยบริเวณดริฟท์ (Drift-Region) นั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทำให้ทนแรงดันสูงๆได้ ดังนั้นขณะ On-State เมื่อกระแสไหล ปริมาณกระแสก็จะไม่ถูกจำกัดด้วยความเข้มข้นของสารเจือในปริมาณต่ำที่อยู่ภายในบริเวณดริฟท์ การลดลงของความหนาในตัวอุปกรณ์ที่บริเวณดริฟท์ ส่งผลดีสำหรับการออกแบบให้เกิดปรากฏการณ์พังก์ทรู (Punch-Through) ซึ่งเป็นผลดีทำให้แรงดันตกคร่อมขณะ On-State ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N

โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N แสดงดังรูป 2.3 เมื่อแรงดันตกคร่อมภายในโครงสร้าง ขณะ On-State กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของพาหะในบริเวณ ดริฟท์



รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายตัวของพาหะและการไหลของกระแสภายใต้การมีระดับต่ำของซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง P-i-N

ขณะ On-State กระแสที่ไหลภายในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N จะประกอบไปด้วยกระแส 3 กรณี คือ

- ขณะระดับกระแสต่ำๆ กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับการรวมตัวใหม่ภายในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น กล่าวคือกระแสที่เกิดจากการรวมตัว (Recombination Current)
- ขณะระดับกระแสต่ำ กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับการแพร่ของแคริเออร์พาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดภายในบริเวณดริฟท์ กล่าวคือกระแสจากการแพร่ (Diffusion Current)
- ขณะระดับกระแสสูง กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของพาหะทั้งสองนั่นก็คืออิเล็กตรอนและโฮลในบริเวณดริฟท์ กล่าวคือกระแสจากการฉีดระดับสูง (High-Level Injection Current)

2.2.2 กระแสการรวมตัว

เมื่อกระแสไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ในปริมาณที่น้อยมากๆ กระแสที่เกิดจากการรวมตัวใหม่ของพาหะภายในบริเวณปลอดพาหะ ภายในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ สำหรับการให้แรงดันไบอัส (V_A) ตกคร่อมไดโอด ความเข้มข้นพาหะส่วนน้อยบนด้านพีของรอยต่อ นิยามโดยเงื่อนไขของช็อกเคิลีย์(Shockley Boundary) หรือ กฎหมายของรอยต่อ ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_p(0) \frac{n_i}{N_A} e^{qV_A/kT} \quad (2.1)$$

เมื่อ n_i คือ ความเข้มข้นของพาหะอินทรินสิค
 N_A คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้รับ
 K คือ ค่าคงที่ Boltzmann's
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
 ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้บนด้านพี สามารถนิยามได้โดย

$$p_p(0)n_p(0) = n_i^2 e^{qV_A/kT} \quad (2.2)$$

เพราะเนื่องจากว่าความเข้มข้นของพาหะส่วนมาก เท่ากับความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้รับ ($p_p(0) \approx N_A$) นั่นเอง
 โดยอัตราการรวมตัวใหม่ที่เกิดภายในศูนย์กลาง นิยามได้จาก

$$U = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{po}(n+n_i) + \theta(p+p_i)} \quad (2.3)$$

เมื่อ θ คือ อัตราส่วนของอายุพาหะส่วนน้อยบนด้านพี τ_{po} ต่ออายุพาหะส่วนน้อยบนด้านเอ็น τ_{no}

n_1 และ p_1 คือความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ระดับศูนย์กลางการรวมตัว ตามลำดับ หากระดับเฟอร์มิเป็นตำแหน่งที่เกิดการรวมตัวใหม่บริเวณตรงกลาง ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลก็จะมีค่าเข้มข้นเท่ากับพาหะอินทรินสิค (n_i) จากสมการที่ (2.2) โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลเท่ากันภายในบริเวณที่ปลอดพาหะ จะได้

$$n = p = n_i e^{qV_A/2kT} \quad (2.4)$$

แทนสมการ (2.4) ลงในสมการ (2.3) ได้ว่า

$$U = \frac{n_i^2 e^{qV_A/kT} - n_i^2}{\tau_{po}[(n_i e^{qV_A/2kT} + n_i) + \theta(n_i e^{qV_A/2kT} + n_i)]} \quad (2.5)$$

ดังนั้น เมื่อให้แรงดันไบอัสที่มากกว่า kT/q สมการนี้สามารถเขียนได้เป็น

$$U = \frac{n_i}{\tau_{po}(1+\theta)} e^{qV_A/2kT} \quad (2.6)$$

จากนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{sc} = \tau_{po}[1 + \theta] \quad (2.7)$$

ดังนั้นอัตราการรวมตัวใหม่ภายใต้กระแสไหลไปข้างหน้า นิยามได้ว่า

$$U = \frac{n_i}{\tau_{sc}} e^{qV_A/2kT} \quad (2.8)$$

ความหนาแน่นกระแสไหลไปข้างหน้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรวมตัวภายในบริเวณหลอดพาหะ ที่มีความกว้าง w_D สามารถนิยามได้ว่า

$$J_{FR} = qUw_D = \frac{qn_iw_D}{\tau_{sc}} e^{qV_A/2kT} \quad (2.9)$$

ที่กระแสต่ำมากๆขณะ On-State ความหนาแน่นกระแสไหลไปข้างหน้าของซิลิคอนไดโอดกำลังกระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับแรงดันไปข้างหน้าที่ตกคร่อม

2.2.3 กระแสที่การฉีดระดับต่ำ

เมื่อมีแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับกระแสที่การฉีดกระแสซึ่งเกี่ยวข้องกับการฉีดของพาหะส่วนน้อยภายในบริเวณหลอดพาหะทั้งสองข้างของรอยต่อพี-เอ็น รูปแบบของการฉีดพาหะส่วนน้อยบนด้านเอ็นของรอยต่อแสดงดังรูป 2.3 ความเข้มข้นของโฮลที่ขอบของบริเวณที่หลอดพาหะสัมพันธ์กับแรงดันไบอัสที่ให้ความถี่ของรอยต่อจะได้ว่า

$$p_N(0) = p_{oN} e^{qV_A/kT} \quad (2.10)$$

เมื่อ p_{oN} คือ ความเข้มข้นของโฮลในภาวะสมดุลบนด้านเอ็นของรอยต่อ เมื่อกำหนดให้แกน x คือ จุดเริ่มต้นของขอบในบริเวณหลอดพาหะบนด้านเอ็นของรอยต่อ และความหนาแน่นส่วนเกินของพาหะส่วนน้อยที่เพิ่มขึ้น Δp_N ณ ตำแหน่งบริเวณของขอบหลอดพาหะนั้น สามารถนิยามได้โดย

$$\Delta p_N = p_N(0) - p_{oN} (e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1) \quad (2.11)$$

พาหะที่ถูกฉีดแพร่จากบริเวณที่หลอดพาหะที่มีลักษณะเป็นระยะทาง นั่นคือ ระยะการแพร่ของพาหะส่วนน้อย (L_p) ซึ่งมีการลดลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลจากความหนาแน่นส่วนเกินของพาหะส่วนน้อย นิยามได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta p_n(x) = \Delta p_n e^{-x/L_p} \quad (2.12)$$

ที่ขอบของบริเวณที่ปลอดพาหะ ผลรวมของกระแสที่ไหลเนื่องมาจากการฉีดภายในด้านเอ็นของรอยต่อ ทั้งหมดเนื่องมาจาก กระแสการแพร่ นิยามโดย

$$J_{TN} = J_p(0) = qD_p \left(\frac{d\delta p_n}{dx} \right)_{x=0} \quad (2.13)$$

เมื่อ D_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

ใช้สมการ (2.11) และ(2.12)อธิบายส่วนเกินการกระจายตัวของพาหะส่วนน้อย ได้ว่า

$$J_{TN} = \frac{qD_p n_0 D_p}{L_p} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.14)$$

จากรูปที่ 2.3 ด้านล่างสุด กระแสแพร่ของพาหะส่วนน้อยมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจากรอยต่อ เช่นเดียวกับกับกระแสที่ไหลจากสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปลอดพาหะที่จะก่อให้เกิดการดริฟท์ (Drift) ของพาหะส่วนมากที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการดำเนินการออกจากรอยต่อแสดงดังในรูป 2.3 ระหว่างการให้แรงดันไปข้างหน้า การฉีดพาหะส่วนน้อย (อิเล็กตรอน) ที่เกิดขึ้นภายในด้านพีของรอยต่อลดลงอย่างเอ็กโปเนนเชียล กับความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยในด้านพีของรอยต่อ ตามระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน (L_n) กระแสรวมที่ไหลเนื่องมาจากการฉีดพาหะบนด้านพีของรอยต่อ จะสามารถนิยามได้โดย

$$J_{TP} = \frac{q n_{0P} D_n}{L_n} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.15)$$

เมื่อ D_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

n_{0P} คือ ความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยในภาวะสมดุลบนด้านพีของรอยต่อ

ซึ่งซิลิคอนพินไดโอดกำลัง มักจะออกแบบให้มีความเข้มข้นในการเติมสารเจือสูง (N_A) บนด้านพีของรอยต่อเทียบกับค่าความเข้มข้นในการเติมอะตอมสารเจือด้านเอ็น (N_D) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นบริเวณดริฟท์ ดังนั้น

$$p_{0N} = \frac{n_i^2}{N_D} \gg n_{0P} = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.16)$$

บนพื้นฐานความแตกต่างของความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยบนด้านทั้งสองของรอยต่อ กระแส J_{TP} เนื่องมาจากการฉีดภายในด้านพีของรอยต่อสามารถที่จะสมมติให้เป็นลบเมื่อเทียบกับกระแส J_{TN}

เนื่องมาจากการฉีดภายในด้านเอ็นของรอยต่อ กระแสรวมที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น ภายใต้เงื่อนไขการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉีดระดับต่ำจึงกำหนดด้วยสมการ (2.14) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นในกระแสและแรงดันไปข้างหน้าที่คาดการณ์ไว้ด้วยสมการนั้นอย่างรวดเร็วกว่ากระแสการรวมตัว

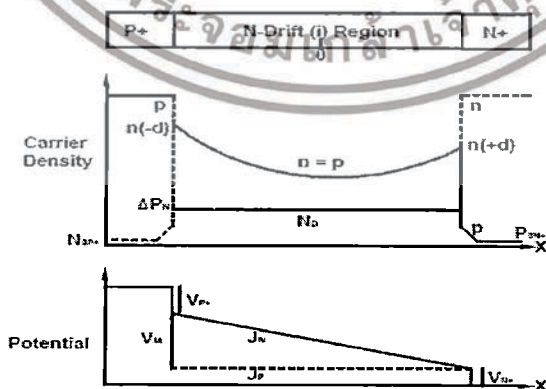
ในความสัมพันธ์ข้างต้น ความกว้างของบริเวณดริฟท์ จะถูกสมมติให้มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับระยะการแพร่ของโฮล ถ้าหากระยะการแพร่ของโฮลมากกว่า การกระจายตัวของพาหะส่วนน้อยในบริเวณดริฟท์ จะมีการเปลี่ยนแปลงเพราะค่าความเข้มข้นที่ลดลงต่อความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยในบริเวณ N^+ ที่ขอบเขตระหว่างบริเวณดริฟท์ และบริเวณ N^+ ดังนั้นความเข้มข้นของสารเจือบริเวณ N^+ ที่มาก ค่าความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยจะสามารถที่จะสมมติให้เป็นศูนย์ได้ การใช้เงื่อนไขขอบเขตสามารถที่จะแสดงกระแสไหลเนื่องมาจากการฉีดภายในด้านเอ็นของรอยต่อโดย

$$J_{TN} = \frac{q n_{op} D_N}{L_p \tanh(W_N/L_p)} (e^{qV_A/kT} - 1) \tag{2.17}$$

2.2.4 กระแสที่การฉีดพาหะระดับสูง

บริเวณด้านเอ็นในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N ต้องมีการเติมสารเจือในบริเวณต่ำมากๆ เพื่อจะสามารถรองรับแรงดันย้อนกลับได้สูงๆเมื่อขณะ On-state แรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นจากการฉีดพาหะส่วนน้อยก็จะเพิ่มขึ้นตามสมการ (2.10) ในที่สุดความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยก็จะมากกว่าความเข้มข้นจากการเติมอะตอมสารเจือเดิม N_D ที่อยู่ในบริเวณดริฟท์ ซึ่ง เรียกว่าการฉีดระดับสูงนั่นเอง เมื่อความเข้มข้นของโฮลไปยังบริเวณดริฟท์ จนมีค่ามากกว่าความเข้มข้นจากการเติมอะตอมสารเจือเดิม ประจุที่เป็นกลางก็จะต้องการความเข้มข้นสำหรับอิเล็กตรอนและโฮล จะทำได้

$$N(x) = p(x) \tag{2.18}$$



รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายตัวของพาหะและศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นที่มากของอิเล็กตรอนอิสระจะลดค่าความต้านทานภายในบริเวณดริฟท์ ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Conductivity Modulation” ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์กับการเคลื่อนที่ผ่านของความหนาแน่นกระแสสูงที่ปริมาณการเติมสารเจือต่ำบริเวณดริฟท์ กับแรงดันตกคร่อมขณะ On – state

การกระจายตัวของพาหะภายในบริเวณดริฟท์ $n(x)$ สามารถที่จะพิสูจน์ได้จากสมการต่อเนื่องสำหรับบริเวณด้านเอ็น ดังสมการ

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n}{\tau_{HL}} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x} (nE) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p}{\tau_{HL}} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \mu_p \frac{\partial}{\partial x} (pE) \quad (2.20)$$

เมื่อ D_n และ D_p คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ และ คือ อายุพาหะระดับสูงในบริเวณดริฟท์ เมื่อรวมสมการนี้ด้วยกันหลังจากการคูณด้วยสมการ (2.19) ด้วย (2.20) และสมการที่ $(\mu_p p)$ ด้วย $(\mu_n n)$ จะได้

$$\frac{\partial n}{\partial t} \frac{n}{\tau_{HL}} + \left(\frac{\mu_p p D_n + \mu_n n D_p}{\mu_p p + \mu_n n} \right) \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (2.21)$$

ในสมการนี้ มีการกำหนดให้การเคลื่อนที่ของพาหะเนื่องจากสนามไฟฟ้าสามารถที่จะไม่พิจารณาเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระแสนิ่งมาจากการแพร่ของพาหะ จากความสัมพันธ์ของไอน์สไตน์ (Einstein) ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการเคลื่อนที่ได้ว่า

$$D = \frac{kT}{q} \mu \quad (2.22)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลก็จะมีค่าตามสมการที่ (2.18) จากสมการที่ (2.21) ก็จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเงื่อนไขภาวะสมดุลได้

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 0 = -\frac{n}{\tau_{HL}} + D_a \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (2.23)$$

เมื่อ τ_{TH} คือ อายุพาหะการฉีดระดับสูงในบริเวณดริฟท์ และ D_a คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ नियาม โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_a = \frac{p+n}{\frac{p}{D_n} + \frac{n}{D_p}} = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p} \quad (2.24)$$

เนื่องจากความเป็นกลางของประจุ สังเกตสมการที่ (2.18) การแก้ปัญหาโดยทั่วไปสำหรับความเข้มข้นของพาหะด้วยสมการที่ (2.23) จะได้

$$N(x) = A \cosh\left(\frac{x}{L_a}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_a}\right) \quad (2.25)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่ ที่กำหนดภายใต้เงื่อนไขขอบเขตบริเวณ N Drift และค่า L_a คือค่า Ambipolar Diffusion Length นิยามโดย

$$L_a = \sqrt{D_a \tau_{HL}} \quad (2.26)$$

ที่บริเวณรอยต่อระหว่าง N Drift และ N^+ - cathode (ตำแหน่ง $x=+d$ ในรูปที่ 2.3 กระแสรวมที่ไหลเกิดขึ้นเฉพาะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน คือ

$$J_T = J_n(+d) \quad (2.27)$$

และ

$$J_p(+d) = 0 \quad (2.28)$$

ซึ่งเหมือนกับบริเวณรอยต่อระหว่าง N Drift และ P^+ - anode (ตำแหน่ง $x=-d$ ในรูปที่ 2.3) กระแสรวมที่ไหลเกิดขึ้นเฉพาะการเคลื่อนที่ของโฮล คือ

$$J_T = J_p(-d) \quad (2.29)$$

และ

$$J_n(-d) = 0 \quad (2.30)$$

ใช้สมการ (2.28) กระแสโฮลเนื่องมาจากการดริฟท์และการแพร่สามารถเขียนได้เป็น

$$J_p(+d) = q\mu_p p(+d) - qD_p \left(\frac{dp}{dx}\right)_{x=+d} = 0 \quad (2.31)$$

รวมเข้ากับสมการที่ (2.18) และจากความสัมพันธ์ของ ไอน์ไตน์ (Einstein) ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E(+d) = \frac{kT}{qn(+d)} \left(\frac{dp}{dx} \right)_{x=+d} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.27) สำหรับกระแสรวมที่ไหลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่มาจากการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอนภายใต้เงื่อนไขขอบเขต สามารถเขียนได้เป็น

$$J_T = q\mu_n n(+d)E(+d) + qD_n \left(\frac{dp}{dx} \right)_{x=+d} \quad (2.33)$$

ใช้สมการที่(2.32)สำหรับกรณีสนามไฟฟ้า $E(+d)$ ได้ว่า

$$J_T = 2qD_n D_n \left(\frac{dp}{dx} \right)_{x=+d} \quad (2.34)$$

ในลักษณะเดียวกัน ก็จะได้

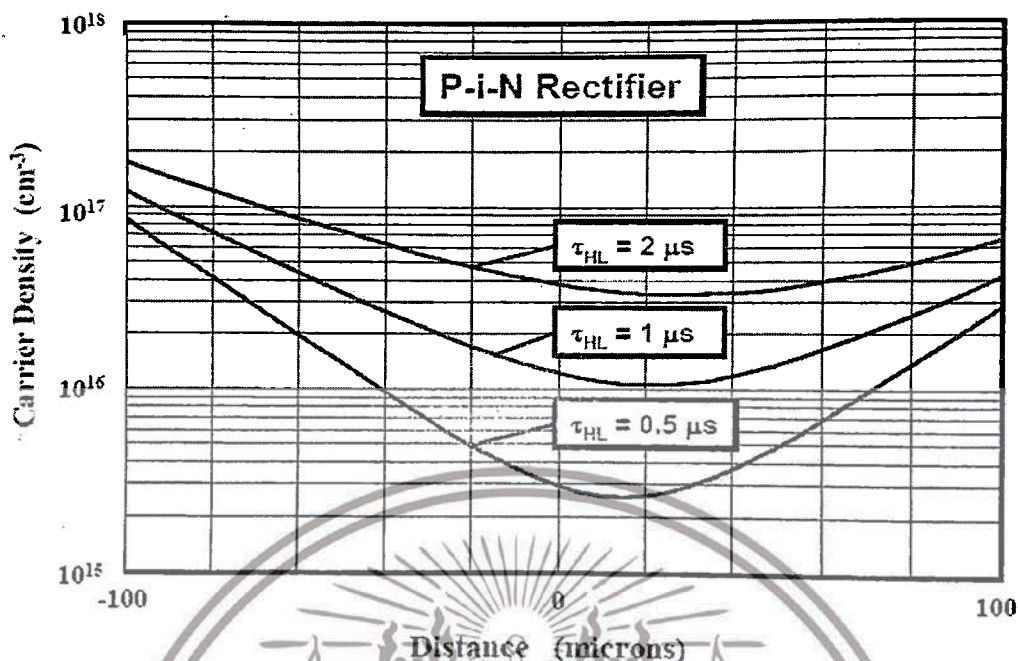
$$J_T = 2qD_p \left(\frac{dp}{dx} \right)_{x=-d} \quad (2.35)$$

ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสมการ

$$\left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=+d} = \frac{J_T}{2qD_n} < \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=-d} = \frac{J_T}{2qD_n} \quad (2.36)$$

ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าความชันของความเข้มข้นพาหะมีค่าน้อยกว่าตรงบริเวณด้านแคโทด เมื่อเปรียบเทียบกับด้านแอนโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N กับค่าอายุพาหะระดับสูง

บนเงื่อนไขขอบเขตสามารถที่คำนวณค่าคงที่ A และ B ในสมการ (2.25) ได้

$$N(x) = p(x) = \frac{\tau_{HL} J_T}{2qL_a} \frac{\cosh\left(\frac{x}{L_a}\right)}{\sinh\left(\frac{d}{L_a}\right)} + \frac{\sinh(x/L_a)}{2\cosh(d/L_a)} \quad (2.37)$$

การกระจายตัวของพาหะถูกอธิบายด้วยสมการที่มีลักษณะเป็นแบบแผนดังแสดงให้เห็นในรูป 2.4 โดยเฉพาะตัวอย่างที่แสดงการกระจายตัวของพาหะถูกคำนวณด้วยสมการที่(2.37) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5 ต่อกรณีของค่าทั้ง 3 สำหรับอายุพาหะการฉีดระดับสูงของไดโอดที่มีบริเวณดริฟท์หนา 200 ไมครอน ความเข้มข้นที่มากของอิเล็กตรอนและโฮลในบริเวณดริฟท์เกิดขึ้นที่ขอบของ P⁺ และ N⁺ ตรงส่วนที่โค้งต่ำลงในความหนาแน่นพาหะบริเวณตรงกลางของบริเวณดริฟท์ นั้นถูกพิจารณาด้วย Ambipolar Diffusion Length และตรงส่วนโค้งมากที่สุดบริเวณความเข้มข้นที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาการแพร่ที่น้อยและความเข้มข้นพาหะเฉลี่ยที่น้อยสังเกตได้เมื่ออายุพาหะมีการลดลง

การลดลงของความหนาแน่นพาหะเฉลี่ยที่ถูกฉีดเข้าไปในบริเวณดริฟท์กับการลดลงของอายุพาหะสามารถที่จะสรุปได้จากการพิจารณาการควบคุมประจุภายใต้เงื่อนไขภาวะสมดุลกระแสที่ไหลในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N สามารถเกี่ยวข้องกับการรวมตัวใหม่ ของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณดริฟท์หากการรวมตัวภายในขอบเขตนั้นไม่น่ามาคิด ดังนั้นจะได้ว่า

$$J_T = \int_{-d}^{+d} qRdx \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ R คืออัตราการรวมตัวใหม่ นิยามโดย

$$R = \frac{n(x)}{\tau_{HL}} \quad (2.39)$$

ใช้ความหนาแน่นพาหะเฉลี่ย (n_a) ภายในบริเวณดริฟท์ สมการนี้สามารถรวมเข้ากับค่า Yield ได้เป็น

$$J_T = \frac{2qn_a d}{\tau_{HL}} \quad (2.40)$$

ความหนาแน่นพาหะเฉลี่ยในบริเวณดริฟท์ นิยามโดย

$$n_a = \frac{J_T \tau_{HL}}{2qd} \quad (2.41)$$

จากความสัมพันธ์นี้ สามารถที่จะสรุปได้ว่าความหนาแน่นพาหะเฉลี่ยในบริเวณดริฟท์ จะเพิ่มขึ้น กับความหนาแน่นกระแส ในขณะที่ On-State และลดลงกับการลดลงของอายุพาหะ พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นจากการกระจายตัวของพาหะในรูปที่ 2.9 สำหรับกรณีความหนาแน่นกระแสขณะ On-State ที่ 100 A cm^{-2} และความหนาของบริเวณดริฟท์ $2d$ ที่ 200 ไมครอน กับค่าอายุพาหะการฉีดที่ระดับ $1 \mu\text{s}$ ความเข้มข้นพาหะเฉลี่ยที่ได้จากการใช้สมการ (2.41) คำนวณ คือ $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของพาหะที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.9

โดยเฉพาะค่าความต้านทานของบริเวณดริฟท์ ก็สามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นพาหะเฉลี่ยกับค่ากระแสที่เคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล

$$R_{i,sp} = \frac{2d}{q(\mu_n + \mu_p)n_a} \quad (2.42)$$

ใช้สมการที่ (2.41) สำหรับหาความหนาแน่นพาหะเฉลี่ย ได้ว่า

$$R_{i,sp} = \frac{4d^2}{(\mu_n + \mu_p)\tau_{HL}} \quad (2.43)$$

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณดริฟท์ (บริเวณตรงกลาง) ได้ว่า

$$V_M = J_T R_{i,sp} = \frac{4d^2}{(\mu_n + \mu_p)\tau_{HL}} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อมตรงบริเวณดริฟท์ นั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่น กระแสที่ไหลผ่าน สิ่งที่เกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการมีความเข้มข้นสูงของพาหะส่วนน้อย ตรงกันข้ามกับกฎของโอห์ม (Ohm's Law) สำหรับบริเวณดริฟท์ ที่ไม่มีการปรับค่าความนำ ดังนั้นปรากฏการณ์ปรับค่าความนำที่การฉีดระดับสูงช่วยให้รักษาระดับแรงดันต่ำที่ตกคร่อมขณะ On-State ในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N

การวิเคราะห์จะแม่นยำมากขึ้นจากแรงดันที่ตกคร่อมในบริเวณดริฟท์ สามารถที่จะถูกดำเนินการด้วยการอินทิเกรตจากค่าสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าในบริเวณดริฟท์ ที่ได้มาจากการกระจายตัวของพาหะในสมการ (2.37) กระแสโฮลและอิเล็กตรอนที่ไหลในบริเวณดริฟท์ เขียนได้ดังนี้

$$J_p = q\mu_p(pE - \frac{kT}{q} \frac{dp}{dx}) \tag{2.45}$$

และ

$$J_n = q\mu_n(nE + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx}) \tag{2.46}$$

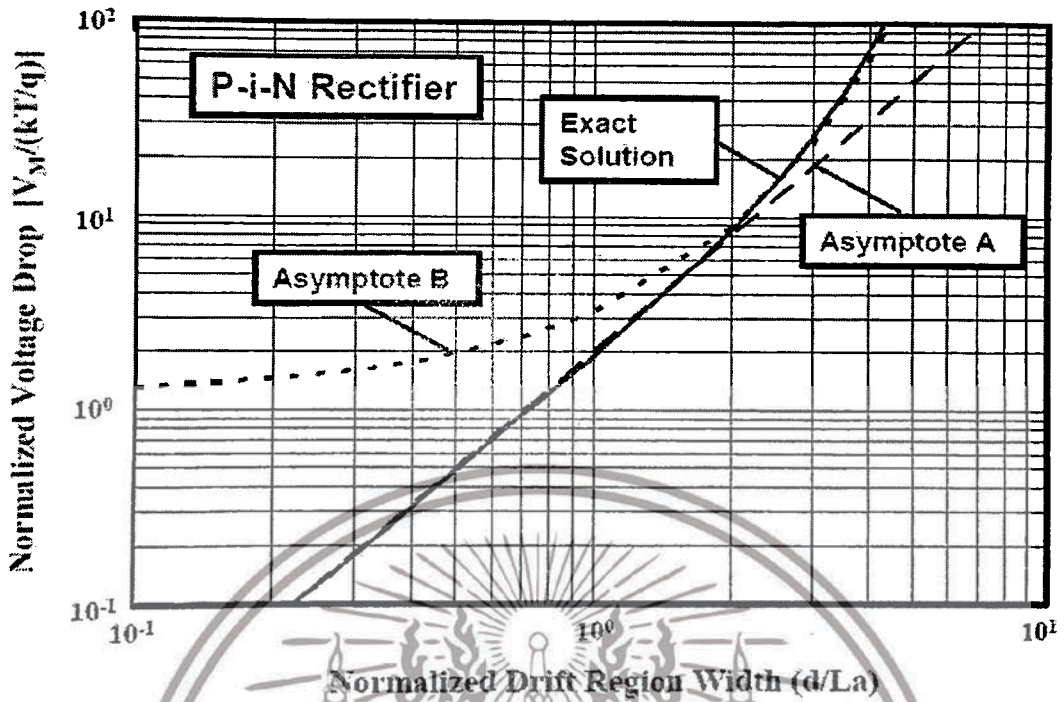
กระแสรวมที่บริเวณต่างๆในบริเวณดริฟท์ จะคงที่ เขียนได้ดังนี้

$$J_T = J_p + J_n \tag{2.47}$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมารวมกัน จะได้

$$E(x) = \frac{J_T}{q(\mu_n + \mu_p)n} - \frac{kT}{2qn} \frac{dn}{dx} \tag{2.48}$$

ดังนั้น เงื่อนไขจากการที่ประจุเป็นกลางหรือ $n(x)=p(x)$ นั้นได้นำมาใช้ ในเทอมแรกของสมการ 2.48 แทนค่าแรงดันเนื่องมาจากกระแสที่ไหลผ่านบริเวณดริฟท์ เทอมที่สองที่มีความเกี่ยวข้องกับพาหะที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สมมาตรก่อให้เกิดจากความแตกต่างในการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนและโฮล



รูปที่ 2.6 แรงดันตกคร่อมภายในบริเวณดริฟท์ (ตรงกลาง) ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN

ทำการอินทิเกรตการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ได้จากสมการที่ (2.48) แรงดันที่ตกคร่อมใน Drift-Region คือ

$$\frac{V_m}{kT/q} = \left\{ \frac{8b}{(b+1)^2} \frac{\sinh(d/L_a)}{\sqrt{1-B^2 \tanh^2(d/L_a)}} \times \arctan \left[\frac{\sqrt{1-B^2 \tanh^2(d/L_a)} \sinh(d/L_a)}{1+B \tanh^2(d/L_a)} \right] + B \ln \left[\frac{1+B \tanh^2(d/L_a)}{1-B \tanh^2(d/L_a)} \right] \right\} \quad (2.49)$$

เมื่อ $b = (\mu_n/\mu_p)$ และ $B = (\mu_n - \mu_p)/(\mu_n + \mu_p)$ เป็นสมการเชิงซ้อนสามารถประมาณได้จากการใช้สองเส้นในการกำหนดดังแสดงในรูป 2.6 เทอมทั้งหมดของแรงดันที่ตกคร่อมในบริเวณดริฟท์ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสขณะ On-State แรงดันที่ตกคร่อมในบริเวณดริฟท์ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในอัตราส่วน d/L_a เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 0.1 แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณดริฟท์ เท่ากับ 0.05 mV ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นประมาณ 50 mV สำหรับอัตราส่วนของ d/L_a อันเดียวกันและกลายเป็น 0.7 V เมื่ออัตราส่วน d/L_a เพิ่มขึ้นเป็น 3 ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นบริเวณตรงกลางจะทำให้แรงดันขณะ On-State ลดลงเมื่ออายุพาหะลดลงจะเสริมให้การสวิตชิ่งเร็วขึ้น

แรงดันตกคร่อมในขณะ On-State ในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด Pin ประกอบไปด้วยแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ P⁺/N, บริเวณตรงกลาง, และบริเวณส่วนของ N/N⁺ แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ P⁺/N สามารถนิยามได้จากความหนาแน่นที่ถูกฉีดยของพาหะส่วนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเฉพาะกิจเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p(-d) = p_{0N} e^{qV_{p+}/kT} \quad (2.50)$$

เมื่อ p_{0N} คือ ความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยในบริเวณดริฟท์ ด้านเอ็นที่ภาวะสมดุล และ V_{p+} คือ แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ P^+/N เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นพาหะส่วนน้อยในภาวะสมดุลในระดับการเติมสารเจือ N_D ในบริเวณดริฟท์

$$V_{p+} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{p(-d)N_D}{n_i^2} \right] \quad (2.51)$$

เช่นเดียวกับ การประยุกต์ใช้ กฎของรอยต่อ (Law Of The Junction) บนด้านแคโทด

$$n(+d) = n_{0N} e^{qV_{N+}/kT} \quad (2.52)$$

เมื่อ n_{0N} คือ ความหนาแน่นพาหะส่วนมากในบริเวณดริฟท์ ด้านเอ็นที่ภาวะสมดุล และ V_{N+} คือ แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ N^+/N ดังนั้นความเข้มข้นพาหะส่วนมากในภาวะสมดุลจะเท่ากับปริมาณการเติมอะตอมสารเจือ N_D ในบริเวณดริฟท์

$$V_{N+} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{n(+d)}{N_D} \right] \quad (2.53)$$

แรงดันตกคร่อมที่เกี่ยวข้องกับบริเวณขอบทั้งสอง เขียนได้ดังสมการ

$$V_{p+} + V_{N+} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{n(+d)n(-d)}{n_i^2} \right] \quad (2.54)$$

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณขอบได้รวมตัวกับแรงดันที่ตกคร่อมบริเวณตรงกลาง ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสขณะ On-State (J_T) และแรงดันตกคร่อมรวม (V_{ON}) สำหรับซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN

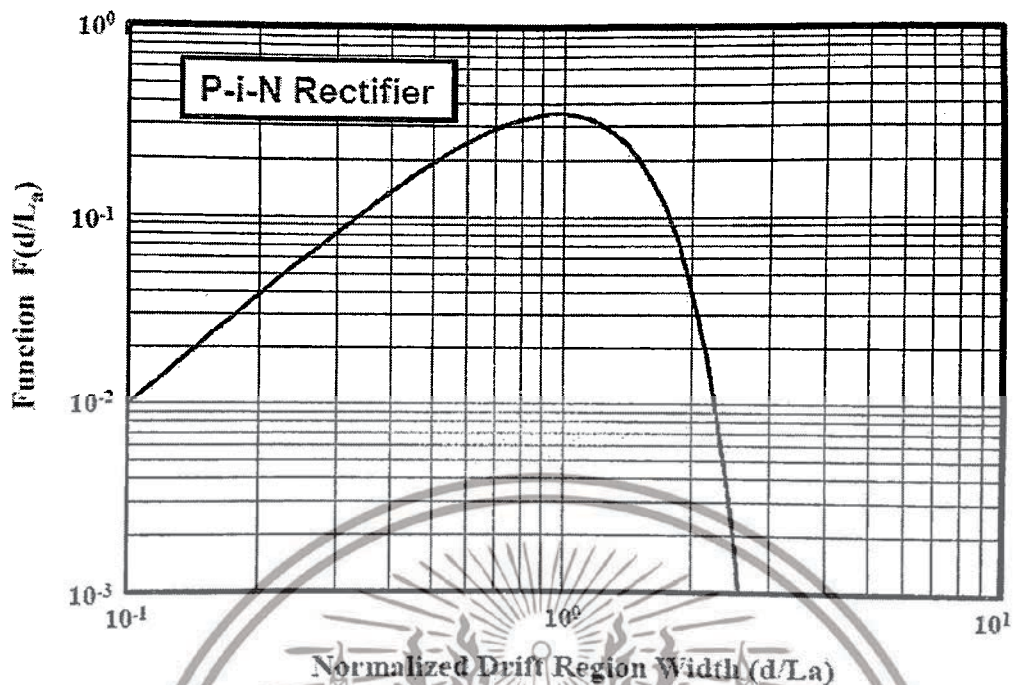
$$J_T = \frac{2qD_a N_i}{d} F \left(\frac{d}{L_a} \right) e^{qV_{ON}/2kT} \quad (2.55)$$

เมื่อ

$$F \left(\frac{d}{L_a} \right) = \frac{(d/L_a) \tanh(d/L_a)}{\sqrt{1-0.25 \tanh^4(d/L_a)}} e^{-qV_M/2kT} \quad (2.56)$$

จากสมการ 2.55 เห็นได้ชัดว่า ความหนาแน่นกระแสมีค่าคงที่ขณะ On-State แรงดันที่ตกคร่อมจะมีค่าน้อยมากเมื่อฟังก์ชัน $F \left(\frac{d}{L_a} \right)$ มีค่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



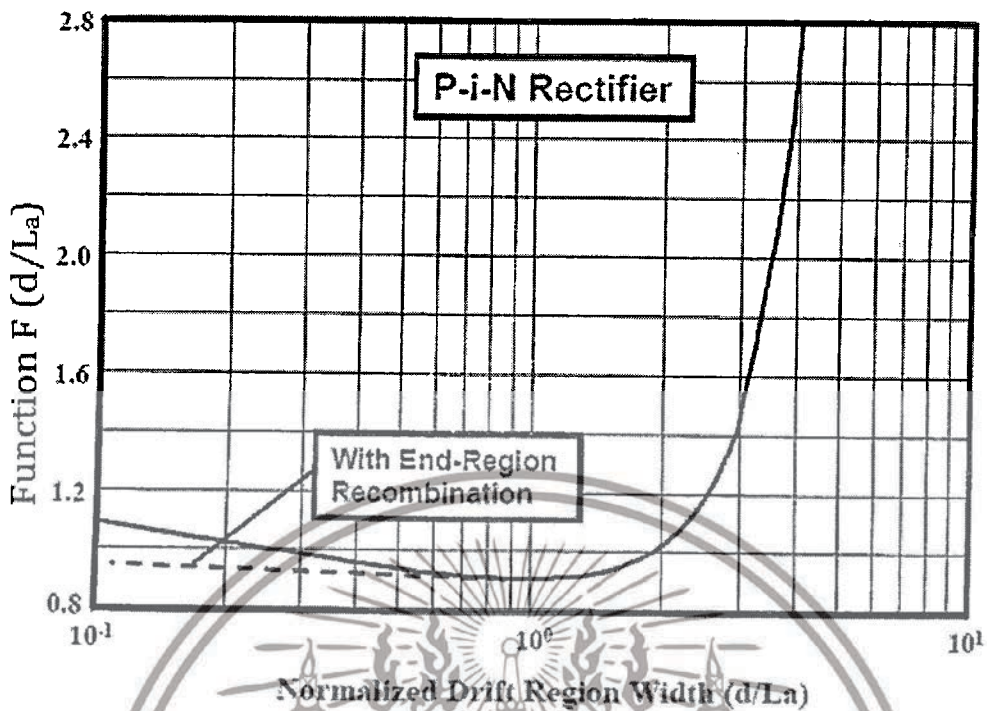
รูปที่ 2.7 ฟังก์ชัน $F\left(\frac{d}{L_a}\right)$ ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N

การเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน $F\left(\frac{d}{L_a}\right)$ กับการเพิ่มขึ้นของอัตรา $\left(\frac{d}{L_a}\right)$ ดังรูปที่ 2.7 สามารถเห็นได้ชัดจากฟังก์ชันค่ามากที่ $\left(\frac{d}{L_a}\right) = 1$ ดังนั้น ที่ขณะ On-State แรงดันตกคร่อมที่ลดลงอย่างรวดเร็วของระยะการแพร่ให้เท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างบริเวณที่ดริฟท์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าฟังก์ชัน $F\left(\frac{d}{L_a}\right)$ มีการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราของ $\left(\frac{d}{L_a}\right)$ เพิ่มขึ้นเกิน 3 สิ่งนี้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันขณะ On-State เมื่อระยะการแพร่มีค่าน้อยกว่าครึ่งของความกว้างบริเวณดริฟท์

แรงดันตกคร่อมขณะ On-State ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.55 สำหรับอุปกรณ์ที่มีความสว่าง (d) เพียงครึ่งหนึ่ง นั่นคือ การเกิดปรากฏการณ์พังก์เจอร์ (Punch Through)

$$V_{ON} = \frac{2kT}{q} \ln\left[\frac{J_T d}{2qD_{an} F\left(\frac{d}{L_a}\right)}\right] \tag{2.57}$$

แรงดันที่ตกคร่อมถูกคำนวณสำหรับซิลิคอนไดโอดกำลัง PiN กับความกว้างของบริเวณดริฟท์ ที่ 200 ไมครอน แสดงดังรูป 2.8 ที่ความหนาแน่นกระแสขณะ On-State 100 A cm^{-2} คาดว่าแรงดันที่ตกคร่อมจะมีค่าน้อยที่อัตรา: $\left(\frac{d}{L_a}\right)$ เท่ากับ 1 แต่จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตรา $\left(\frac{d}{L_a}\right)$ เกิน 3

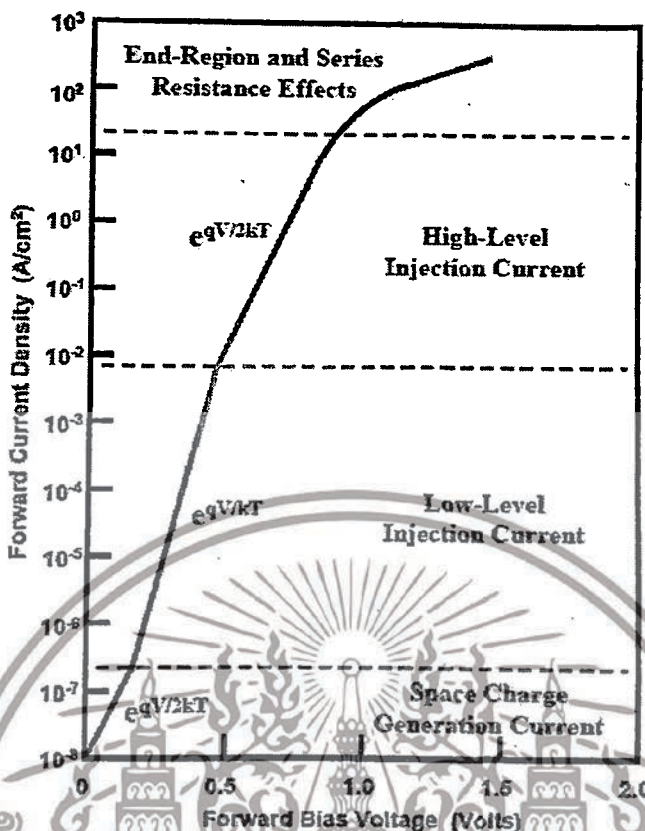


รูปที่ 2.8 แรงดันตกคร่อมขณะ On-State ของซิลิคอนไดโอดกำลัง P-i-N

2.2.5 คุณลักษณะการนำกระแสขณะไบอัสตรง

การวิเคราะห์กระแสไหลในซิลิคอนไดโอดกำลัง PIN อันดับแรก ต้องบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นเมื่อมีการฉีดพาหะที่ระดับกระแสต่ำมาก ๆ การควบคุมการเกิดของกระแสที่ไหลกับสัดส่วนของกระแสที่ (qv_{0N}/kT) เมื่อกระแสถูกควบคุมด้วยพาหะส่วนน้อยที่ฉีดเข้าไปในบริเวณดริฟท์ กับความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยที่ต่ำกว่าความเข้มข้นสารเจือ กระแสไหลที่เกิดขึ้นจากการแพร่ภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับต่ำ กระแสที่ไหลนั้นเป็นสัดส่วนกับ (v_{0N}/kT) ด้วยการเพิ่มความหนาแน่นกระแส ความหนาแน่นพาหะจะถูกฉีดในบริเวณดริฟท์ ก็จะเกินกว่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือ ซึ่งก็คือ เงื่อนไขการฉีดระดับสูง กระแสก็จะไหลอีกครั้งเป็นสัดส่วนกับ (v_{0N}/kT) ในโหมดการทำงานนี้ ความหนาแน่นพาหะที่ถูกฉีดในบริเวณดริฟท์ จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนต่อความหนาแน่นกระแสส่งผลให้แรงดันตกคร่อมคงที่ อิทธิพลจากการรวมตัวที่บริเวณขอบลดลงจากความหนาแน่นพาหะที่ถูกฉีดในบริเวณดริฟท์ ซึ่งเห็นได้จากกราฟรูปที่ (2.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 คุณสมบัติขณะ On-State ของซิลิคอนพินไดโอดกำลัง

2.3 คุณสมบัติการสวิตชิง

ตัวเรียงกระแสกำลังมีหน้าที่ควบคุมทิศทางกระแสไหลของกระแสภายในวงจร ถูกประยุกต์ใช้มากมายในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาในการทำงานขณะ On-State เมื่อมีการให้แรงดันบวกกับขั้วแอโนด และขณะ Off-State เมื่อให้แรงดันลบกับขั้วแอโนด ระหว่างสถานะการทำงานทั้งสองนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่อุปกรณ์ต้องการความเร็วสูงเพื่อที่จะลดกำลังสูญเสีย การเปลี่ยนแปลงจากสถานะ ป้องกันแรงดันย้อนกลับเป็นสถานะ On-State มาพร้อมด้วยแรงดันที่มากในแอโนดซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของกำลังที่มีการกระจาย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การฟื้นตัวไปข้างหน้า (Forward Recovery) แม้กำลังสูญเสียที่เกิดมากขึ้น เมื่อไดโอดมีการสวิตช์ การสะสมประจุภายในบริเวณทรินิฟต์ต้องถูกแยกออกก่อนการรองรับแรงดันสูง ก่อให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับมากในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ปรากฏการณ์นี้กล่าวถึงการฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การฟื้นตัวไปข้างหน้า

เมื่อซิลิคอนพินไดโอดกำลัง มีการสวิตช์จากสถานะหนึ่งไปยังสถานะหนึ่ง แรงดันที่ตกคร่อมขณะให้แรงดันไบอัสไปข้างหน้าจะมีมากกว่าแรงดันตกคร่อมภายใต้การทำงานสภาวะสมดุล โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากกระแสที่แอโนดเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว ดังนั้นแรงดันตกคร่อมบริเวณตรงกลางของซิลิคอนพินไดโอดกำลัง จะไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส ถ้าอัตราของกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนของบริเวณดริฟท์ก็ยังคงสามารถทนอยู่ได้ ดังนั้นส่วนของบริเวณดริฟท์จะมีความต้านทานสูงเนื่องมาจากความเข้มข้นไฟฟ้าต่ำ แรงดันที่ตกคร่อมจะมีมากกว่าภายใต้การทำงานในสภาวะสมดุล

การเพิ่มขึ้นของแรงดันไปข้างหน้าเมื่อซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN มีการทำงานในอัตราสูง สำหรับกระแสแอโนดสามารถที่จะวิเคราะห์ จากการกระจายตัวของการฉีดของพาหะเหมือนฟังก์ชันของเวลาและตำแหน่งในบริเวณดริฟท์ ความเข้มข้นพาหะส่วนเกินส่วนใหญ่ที่ถูกฉีดเข้าไปในบริเวณดริฟท์ นิยามโดยสมการต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \delta n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{\partial n}{\tau_n} \quad (2.58)$$

ถ้ากระแสที่ไหลส่วนใหญ่มาจากการแพร่ ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนนิยามโดย

$$J_n = q D_n \frac{\partial \delta n}{\partial x} \quad (2.59)$$

สมการการแพร่ของอิเล็กตรอน นิยามโดย

$$\frac{\partial \delta n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \delta n}{\partial x^2} - \frac{\partial n}{\tau_n} \quad (2.60)$$

ดังนั้นแรงดันตกคร่อมมากที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราสูงของกระแสภายในเวลา ซึ่งมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับอายุการรวมตัว กระบวนการรวมตัวใหม่ เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial \delta n(x,t)}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \delta n(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.61)$$

สมการนี้อยู่ภายใต้การกระจายตัวของอิเล็กตรอนส่วนเกินในบริเวณดริฟท์เป็นฟังก์ชันของพื้นที่และเวลา การแก้ปัญหาสำหรับความเข้มข้นของอิเล็กตรอนส่วนเกินอยู่ในรูปของ

$$\delta n(x,t) = A(t) e^{-\left(\frac{x}{\sqrt{4D_n t}}\right)} \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทอมของ $A(t)$ คือความหนาแน่นของกระแส ซึ่งเพิ่มขึ้นกับฟังก์ชันของเวลา ความหนาแน่นของกระแสที่ขอบของรอยต่อพีเอ็น (ที่ $x=0$) ภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูง นิยามโดย

$$J = J_n(0) = 2qD_n \left(\frac{\partial \delta n}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (2.63)$$

ใช้สมการการกระจายตัวพาหะในสมการที่ (2.62)

$$J = 2qD_n \frac{A(t)}{\sqrt{4D_n t}} = qA(t) \sqrt{\frac{D_n}{t}} \quad (2.64)$$

ระหว่างเวลาทรานเซียนต์ของการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า ความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้น มีค่าเป็นอัตราคงที่ (a) ดังนั้น

$$J = at \quad (2.65)$$

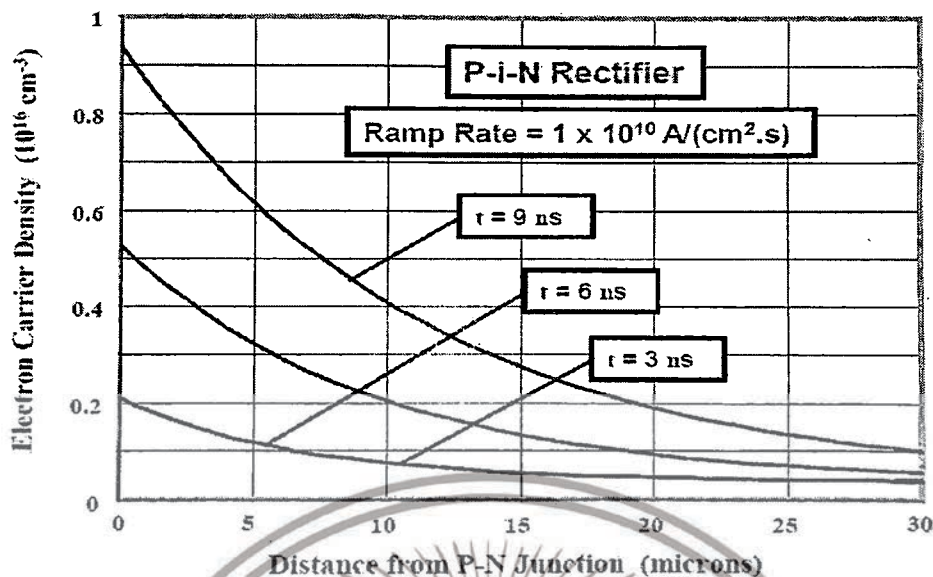
จากสมการด้านบน ค่าสัมประสิทธิ์ของ $A(t)$ กำหนดได้โดย

$$A(t) = \frac{at^{3/2}}{q\sqrt{D_n}} \quad (2.66)$$

ทำให้ความเข้มข้นอิเล็กตรอนส่วนเกินที่ขอบของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นตามฟังก์ชันของเวลา เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแส ความเข้มข้นอิเล็กตรอนส่วนเกินนั้นจะลดลงจากตรงรอยต่อพี-เอ็น ตามระยะการแพร่ นิยามโดย

$$L(t) = \sqrt{4D_n t} \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ความเข้มข้นอิเล็กตรอนในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า

การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นอิเล็กตรอนส่วนเกินภายในบริเวณดริฟท์ นิยามโดย

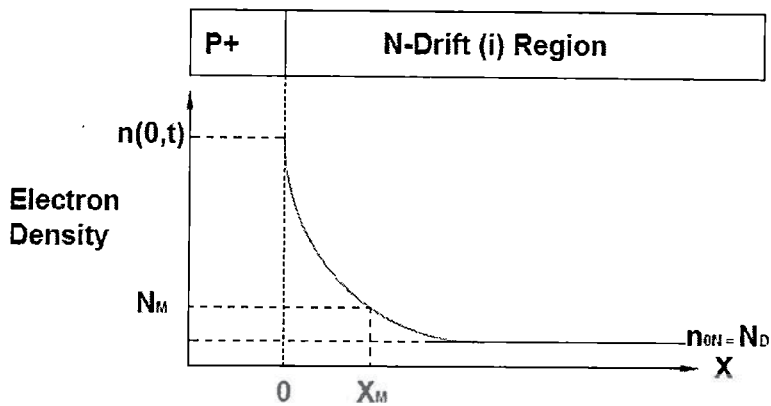
$$\delta n(x, t) = \frac{at^{3/2}}{q\sqrt{D_n}} e^{(x/\sqrt{4D_n t})} \tag{2.68}$$

ความเข้มข้นรวมของอิเล็กตรอนภายในบริเวณดริฟท์สามารถนิยามได้จากผลรวมของความเข้มข้นอิเล็กตรอนเนื่องมาจากอะตอมสารเจือทำให้ความเข้มข้นส่วนเกินของอิเล็กตรอน

$$n(x, t) = \delta n(x, t) + N_D = \frac{at^{3/2}}{q\sqrt{D_n}} e^{(x/\sqrt{4D_n t})} + N_D \tag{2.69}$$

ความเข้มข้นรวมของอิเล็กตรอนที่ได้พลอตแสดงไว้ดังรูปที่ 2.10 สำหรับกรณีสามตัวอย่างของเวลาในอัตราเชิงลาดที่ $1 \times 10^{10} \text{ A cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN นี้ความหนาแน่นของบริเวณดริฟท์เท่ากับ $60 \text{ }\mu\text{m}$ กับความเข้มข้นการเติมอะตอมสารเจือที่ $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ที่เวลา 3 ถึง 6 ถึง 9 ns ความเข้มข้นอิเล็กตรอนที่รอยต่อพี-เอ็น ($x=0$) เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสจาก 30 เป็น 60 และ 90 Acm^{-2} ดังนั้นการกระจายตัวของอิเล็กตรอนไกลกว่าในบริเวณ ดริฟท์จากกระบวนการแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ความเข้มข้นอิเล็กตรอนในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวไปข้างหน้า

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณดริฟท์สามารถคำนวณจากการแทนผลของความหนาแน่นกระแส ณ เวลาต่างๆ และค่าความต้านทานของบริเวณดริฟท์ บนพื้นฐานของความหนาแน่นการกระจายตัวอิเล็กตรอนที่สามารถที่จะสรุปได้ว่าค่าความต้านทานของบริเวณดริฟท์ลดลงกับเวลา เพราะว่ามีค่ามากของบริเวณ

ดริฟท์กลายเป็นตัวปรับความนำเช่นเดียวกับกระแสที่มีลักษณะเชิงลาดขึ้น การวิเคราะห์ผลของความต้านทานบริเวณดริฟท์ พิจารณาสวนระยะที่ x จากรอยต่อพี-เอ็น กับความหนาแน่นที่น้อยสุด $n(x,t)$ นิยามได้ดัง

$$dR = \rho(x)dx = \frac{dx}{q\mu_n(x,t)n(x,t)} \quad (2.70)$$

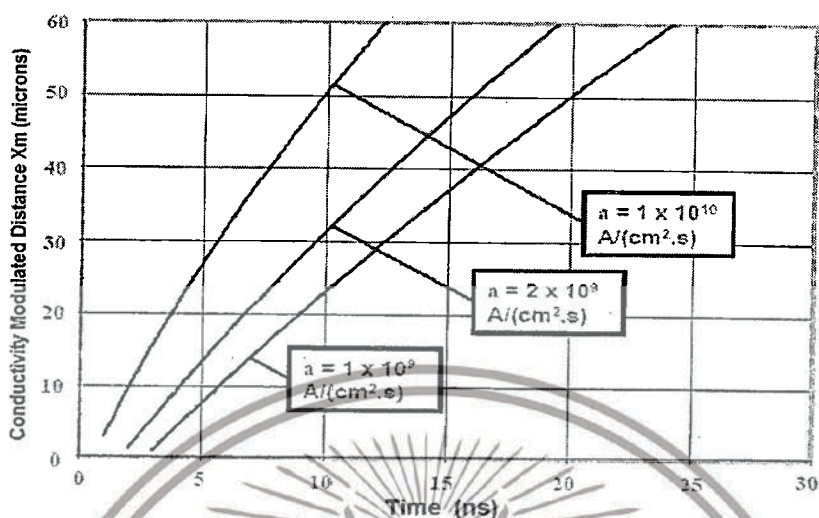
เมื่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งของเวลา เพราะว่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ ค่าความต้านทานบริเวณดริฟท์ระหว่างการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า นิยามโดย

$$R_D(t) = \int_0^{W_D} dR = \int_0^{W_D} \frac{dx}{q\mu_n(x,t)n(x,t)} \quad (2.71)$$

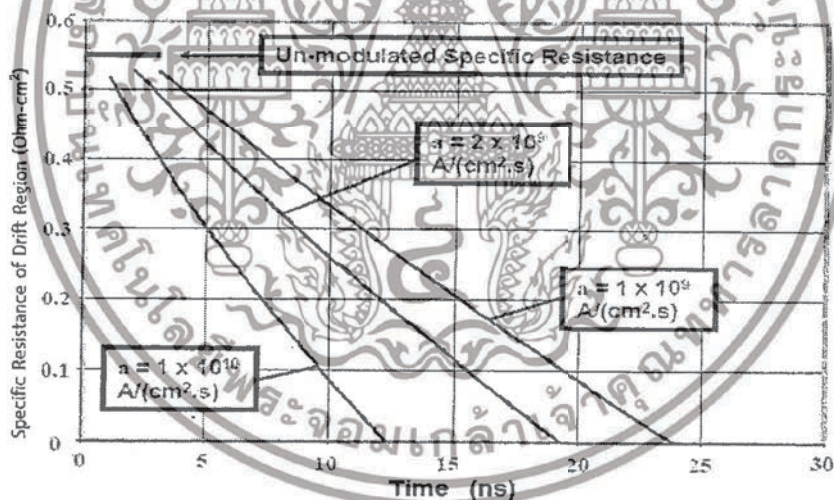
ง่ายต่อการวิเคราะห์การแก้ปัญหาสำหรับค่าความต้านทานที่ไม่สามารถได้สืบเนื่องมาจากการขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของความเข้มข้นอิเล็กตรอน วิธีทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์ค่าความต้านทานบริเวณดริฟท์บนพื้นฐานการกำหนด ค่าความเข้มข้น (N_M) บ่งชี้ให้เห็นได้จากรูปที่ 2.12 และการสมมติว่าค่าความต้านทานของบริเวณดริฟท์กับความเข้มข้นอิเล็กตรอน ค่าเหล่านี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่เหลือ ของบริเวณดริฟท์ เมื่อไม่มีการปรับเปลี่ยนจะถือว่าเกิดขึ้น ส่วนของ Conductivity Modulate จากบริเวณดริฟท์นั้นมีระยะเท่ากับ x_M กำหนดโดยใช้สมการที่ (2.69)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_M = \sqrt{4D_n \ln \left[\frac{A(t) + N_D}{N_M} \right]} \quad (2.72)$$



รูปที่ 2.12 ระยะของบริเวณ Conductivity-Modulated ระหว่างกระบวนการพื้นตัวกลับไปข้างหน้า

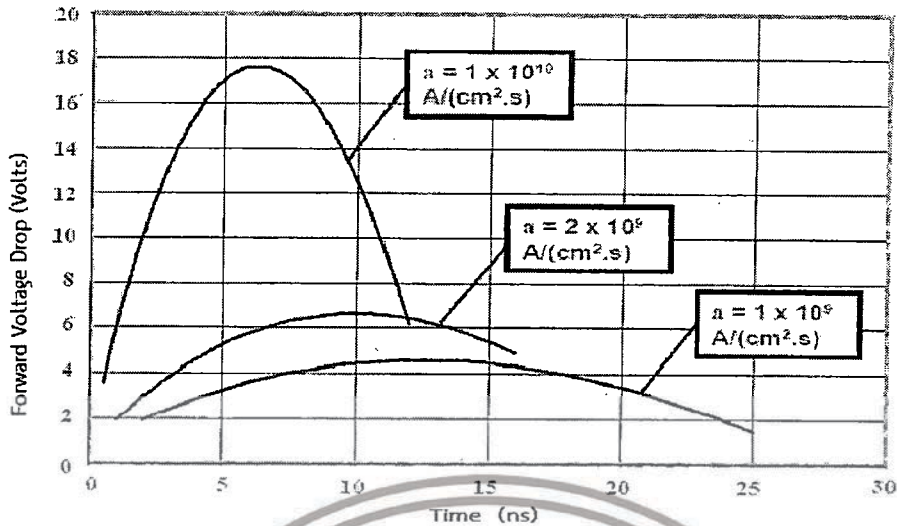


รูปที่ 2.13 การลดลงของค่าความต้านทานบริเวณดริฟท์ระหว่างกระบวนการพื้นตัวกลับไปข้างหน้า

แรงดันตกคร่อมบริเวณดริฟท์ $[V_D(t)]$ สามารถหาได้จากการคูณกันของค่าความต้านทาน และค่าความหนาแน่นกระแส ในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในรูป 2.14

$$V_D = R_D(t) J_F(t) \quad (2.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



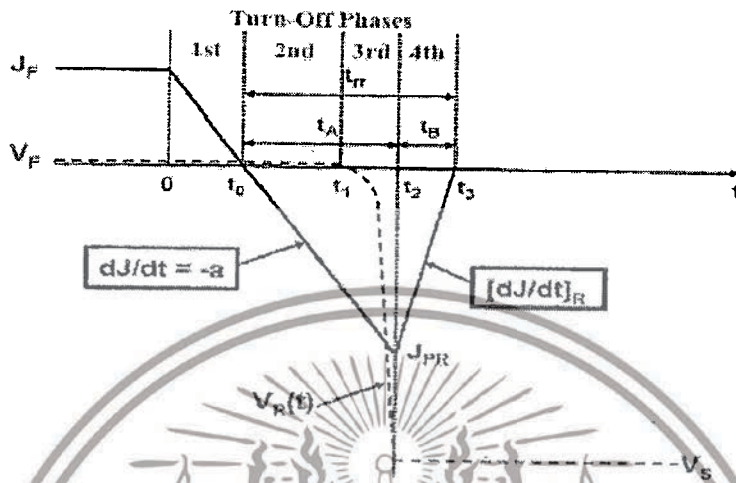
รูปที่ 2.14 แรงดันตกคร่อมซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-I-N ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวย้อนกลับไปข้างหน้า

2.3.2 การฟื้นตัวย้อนกลับ

การมีอยู่ของความเข้มข้นพาหะอิสระในบริเวณดริฟท์ ระหว่าง On-state การสวิตช์ของ ไดโอดจากสถานะหนึ่งไปยังสถานะหนึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกำจัดพาหะเหล่านี้เพื่อช่วยให้การ สร้างบริเวณปลอดพาหะนั้นสามารถรองรับสนามไฟฟ้าที่สูงได้ระหว่างการสวิตช์ซึ่งจากสถานะ On state ไปเป็นสถานะป้องกันแรงดัน นิยามว่า การฟื้นตัวกลับไปยังหลัง (Reverse recovery) เมื่อให้ แรงดันบวกที่ขั้วแอโนด กระแสจะไม่สามารถลดลงเป็นศูนย์ได้ทันที ถ้าเกิดความหน่วงของแรงดัน แหล่งจ่าย และค่าความต้านทานอนุกรม กระแสที่ย้อนกลับสังเกตได้ภายหลังมีการเปลี่ยนแปลง แรงดันจากบวกเป็นลบกระแสยังคงไหลอยู่จนกระทั่งการสะสมประจุจะพอให้รอยต่อพีเอ็นรองรับ แรงดันด้วยการสร้างบริเวณปลอดพาหะซึ่งกระบวนการฟื้นตัวย้อนกลับจะเกี่ยวข้องกับโหลดของความต้านทาน (Resistive load)

ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นธรรมดาที่จะใช้ตัวเรียงกระแสกำลังเพื่อเหนี่ยวนำโหลด ในกรณีนี้กระแสที่ลดลง ณ อัตราเชิงลาดคงที่ (a) ดังรูปที่ 2.15 จนกระทั่งไดโอดสามารถรองรับแรงดัน ได้นั้นคือตำแหน่งของกระแสฟื้นตัวย้อนกลับสูงสุด (Peak Reverse recovery current) เกิดขึ้น เนื่องจากประจุที่สะสม ด้วยการลดลงของกระแสจนเป็นศูนย์ซึ่งยังอยู่ในโหมดแรงดันไปข้างหน้า Low On State แรงดันตกคร่อมยังคงมีจนเวลาที่ t_1 จากนั้นแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเท่าแหล่งจ่าย แล้วตัวเรียงกระแสทำงานในโหมดแรงดันย้อนกลับ กระแสที่ไหลผ่านตัวเรียงกระแสในทิศทาง ย้อนกลับจะมีค่ามากที่สุด (J_{PR}) ที่เวลา t_2 เมื่อแรงดันย้อนกลับเท่ากับแรงดันย้อนกลับของแหล่งจ่าย (V_s) ในเวลาเดียวกันก็จะมีกระแสสูงและแรงดันสูงที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันการกระจายอยู่ในตัว อุปกรณ์กำลัง กระแสย้อนกลับสูงที่ไหล ที่เกิดจากการสวิตช์นั้นจะเกิดการเพิ่มของกำลังการสูญเสีย ภายในตัวอุปกรณ์ ดังนั้นการลดลงของขนาดกระแสฟื้นตัวย้อนกลับสูงและระยะเวลาการฟื้นตัวของท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รานเขียนต์จะเกิดผลดี ซึ่งระยะเวลาที่กล่าวถึงนี้ก็คือ ระยะเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse recovery t_{rr})



รูปที่ 2.15 ลักษณะกระแสและแรงดัน ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวย้อนกลับ

รูปแบบการวิเคราะห์ของการฟื้นตัวย้อนกลับสำหรับเวลาเปิดของซิลิกอนพินไดโอดกำลัง ภายใต้อัตราการคงที่ของการเปลี่ยนแปลงกระแส (กระแสอัตราเชิงลาด) สามารถนิยามความเข้มข้นของพาหะอิสระในบริเวณดริฟท์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (รูปข้างล่างนี้) การกระจายพาหะที่เป็นลูกโซ่ที่เกิดจากกระแสไหลขณะ On-State ประมาณได้จากการเฉลี่ยค่ากลางบริเวณดริฟท์และส่วนเชิงเส้น ต่างๆกับความเข้มข้น $n(-d)$ ที่ $x=0$ ถึงความเข้มข้นเฉลี่ยของ n_a ที่ระยะ $x=b$ ความเข้มข้นพาหะนิยามได้จากสมการ

(2.36) และ (2.37)

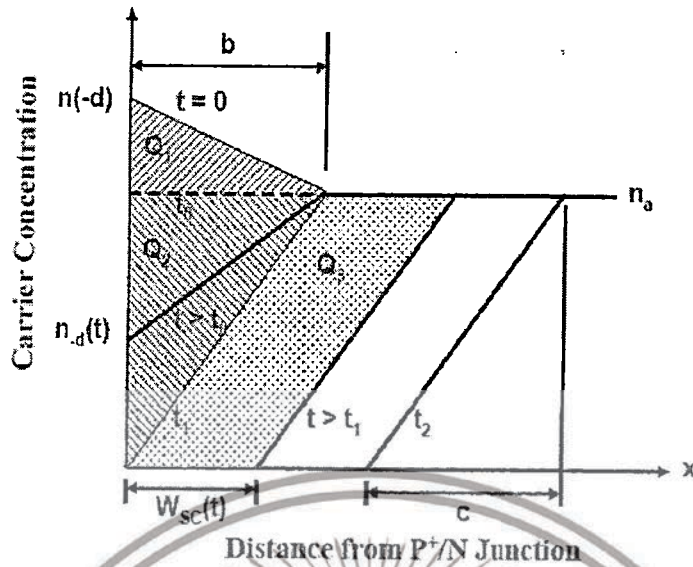
$$n(-d) = \frac{\tau_{HL} J_F}{2qL_a} \left[\frac{\cosh\left(\frac{d}{L_a}\right)}{\sinh\left(\frac{d}{L_a}\right)} - \frac{\sinh\left(\frac{d}{L_a}\right)}{2 \cosh\left(\frac{d}{L_a}\right)} \right] \quad (2.74)$$

และ

$$n_a = \frac{\tau_{HL} J_F}{2qd} \quad (2.75)$$

เมื่อ J_F คือ ความหนาแน่นกระแสไปข้างหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 รูปแบบการกระจายตัวของของพาหะในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-i-N ในการฟื้นตัวย้อนกลับ

กระแสมีค่าไหลผ่านที่เวลาต่างๆระหว่างที่ช่วงเวลาปิดกำหนดด้วยอัตรากระแสของพาหะที่ขอบรอยต่อ P⁺-N

$$J_F = 2qD_a \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=-d} \tag{2.76}$$

ในเฟสแรกขอเวลาปิด ความหนาแน่นกระแสจะเปลี่ยนจาก On-state (J_F) เป็นศูนย์ที่เวลา t_0 ระยะ b ในรูป 2.16 จะได้ความสัมพันธ์ของประจุ Q_1 ที่ลดลงระหว่างเฟสแรกถึงกระแสไหลที่ขอบรอยต่อของเฟสแรกรูปแบบของพาหะจะมีการแฟลท(Flat) ที่เวลา t_0 เห็นได้จากเส้นประในรูปที่ 2.16 เพราะว่ากระแสที่เป็นศูนย์ที่เวลานี้ การเปลี่ยนแปลงในการสะสมประจุภายในบริเวณดริฟท์ระหว่างเฟสแรกสามารถได้รับจากพื้นที่ Cross-Hatched เห็นได้จากรูป Q_1 ในรูป

$$Q_1 = \frac{qb}{2} [n(-d) - n_a] \tag{2.77}$$

ประจุ Q_1 มีความสัมพันธ์กับกระแสไหลระหว่างช่วงเวลาปิดที่ $t=0$ ถึง $t=t_0$

$$Q_1 = \int_0^{t_0} J(t)dt = \int_0^{t_0} (J_F - at)dt = (J_F t_0 - \frac{at^2}{2}) \tag{2.78}$$

ซึ่ง t_0 ก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_0 = \frac{J_F}{a} \quad (2.79)$$

นำสมการทั้งสองมารวมกันได้

$$b = \frac{J_F^2}{qa[n(-d)-na]} \quad (2.80)$$

ความเข้มข้นพาหะ $n(-d)$ ในสมการ (2.74) สามารถเขียนได้เป็น

$$n(-d) = \frac{qHLJ_F}{2qL_a} K \quad (2.81)$$

เมื่อ

$$K = \frac{\cosh\left(\frac{d}{L_a}\right) \sinh\left(\frac{d}{L_a}\right)}{\sinh\left(\frac{d}{L_a}\right) 2 \cosh\left(\frac{d}{L_a}\right)} \quad (2.82)$$

ใช้สมการที่ (2.81) ในการเชื่อมรวมกับสมการ (2.75) และ (2.80)

$$b = \frac{2L_a J_F^2}{at_{HL}(Kd-L_a)} \quad (2.83)$$

ในเฟสที่เวลาปิดเกิดที่เวลา t_0 ที่ซึ่งกระแสเท่ากับศูนย์จนถึงเวลา t_1 เมื่อรอยต่อ P+-N สามารถที่จะรับรองแรงดัน ลักษณะของพาหะที่เวลา t_1 แสดงดังรูป 2.16 ความเข้มข้นศูนย์ที่ขยายออกจากรอยต่อ ($x=0$) และความเข้มข้นเฉลี่ย n_a ที่ระยะ b จากรอยต่อหลังเวลา t_1 บริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ P+-N กับความเข้มข้นพาหะศูนย์ที่ระยะห่างจากรอยต่อ เวลา t_1 ได้รับการวิเคราะห์จากประจุที่เคลื่อนที่ออกกระหว่างขณะเวลาปิดจาก $t=t_0$ ถึง $t=t_1$ ในรูป 2.16 ประจุที่เคลื่อนที่ออกกระหว่างเวลา ระยะห่างชี้ให้เห็นจากพื้นที่ Cross-Hatched นิยามโดย

$$Q_2 = \frac{1}{2} qn_a b \quad (2.84)$$

ความสัมพันธ์ของประจุที่กระแสไหลระหว่างขณะเวลาปิดจาก $t=t_0$ ถึง $t=t_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_2 = \int_0^{t_0} J(t) dt = \int_0^{t_0} (J_F - at) dt = \frac{a}{2} (t_1^2 - t_0^2) \quad (2.85)$$

ใช้สมการ (2.85) สำหรับ t_0

$$Q_2 = \frac{a}{2} (t_1^2 - \frac{J_F^2}{a^2}) \quad (2.86)$$

รวมสมการที่ (2.84) และ (2.86)

$$t_1 = \sqrt{\frac{qn_a b}{a} + \frac{J_F^2}{a^2}} \quad (2.87)$$

$$t_1 = \frac{J_F}{a} \sqrt{\frac{L_a}{Kd - L_a} + 1} \quad (2.88)$$

ระหว่างตลอดเวลาจาก $t=0$ จนกระทั่งเวลา $t=t_1$ รอยต่อ P+-N ภายในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN จะยังคงมีแรงดันไปข้างหน้าอยู่ เพราะว่ายังคงมีความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยในบริเวณ ดริฟท์ที่รอยต่อ [p(-d,t)] เหนือจุดสมดุลของความเข้มข้นพาหะส่วนน้อย (pon) ภายใต้การสมมติของเงื่อนไขการฉีดระดับสูงในบริเวณดริฟท์ ความหนาแน่นพาหะส่วนน้อย [p(-d,t)] จะหนาแน่นเท่ากับพาหะส่วนมาก [n(-d,t)] ดังรูปที่ 2.16 ความหนาแน่นกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในเวลา นิยามโดย

$$J(t) = 2qD_a \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=-d} = 2qD_a \frac{[n(-d,t) - n_a]}{b} \quad (2.89)$$

ดังนั้นความเข้มข้นของพาหะในบริเวณดริฟท์ที่รอยต่อจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแสโดย

$$p(-d,t) = n(-d,t) = n_a + \frac{J(t)b}{2qD_a} = n_a + \frac{(J_F - at)b}{2qD_a} \quad (2.90)$$

แสดงให้เห็นว่าค่าทั้งสองที่เป็นบวกและลบสามารถใช้ได้สำหรับความหนาแน่นระหว่างขณะเวลาปิดที่ t_1 แรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าที่รอยต่อระหว่างช่วงเวลาสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของโบลท์ซมันน์ (Boltzmann's Relationship)

$$V_F(t) = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{p(-d)}{p_{0N}} \right] = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(J_F - at)b}{2qD_a p_{0N}} + \frac{n_a}{p_{0N}} \right] \quad (2.91)$$

สมการนี้อธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมในซิลิคอนไดโอดชนิด PiN ระหว่างขณะเวลาปิดจนกระทั่งรองรับแรงดันย้อนกลับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเฟสที่สามของเวลาขณะปิด ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN เริ่มที่จะรองรับแรงดันที่มีการเพิ่มขึ้น ความต้องการสร้างบริเวณปลอดพาหะ $W_{sc}(t)$ ที่รอยต่อ P+-N นั้นจะเพิ่มตามเวลาดังรูปที่ 2.16 การเพิ่มขึ้นของบริเวณปลอดพาหะจะถูกแยกด้วยประจุสะสมในบริเวณดริฟท์ กระแสย้อนกลับก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นหลังเวลา t_1 การเพิ่มขึ้นของแรงดันย้อนกลับที่ตกคร่อมนั้นสามารถคำนวณได้จากประจุสะสมที่เกิดขึ้นด้วยการประมาณค่าคงที่กระแส ในกรณีนี้ความชันของการกระจายตัวพาหะยังคงมีค่าคงที่อยู่ ดังรูปที่ 2.16 ประจุที่ถูกกำจัดออกที่เวลา t หลังจากรอยต่อ P+-N ได้รับไปแรงดันย้อนกลับที่เวลา t_1 ซึ่งให้เห็นว่าพื้นที่ที่แรง Q_3 จะมีค่าเท่ากับ

$$Q_3 = qn_a W_{sc}(t) \quad (2.92)$$

ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสที่ไหลระหว่างขณะเวลาปิดที่เวลา t_1 ถึงเวลา t

$$Q_3 = \int_{t_1}^t J(t) dt = \int_{t_1}^t (J_F - at) dt = J_F(t - t_1) - \frac{a}{2}(t^2 - t_1^2) \quad (2.93)$$

รวมความสัมพันธ์ข้างต้นดังกล่าวเข้าด้วยกัน สำหรับประจุ Q_3 จะสามารถอธิบายการเพิ่มขึ้นของขนาดบริเวณปลอดพาหะที่เป็นไปตามฟังก์ชันของเวลา

$$W_{sc}(t) = \frac{a}{2qn_a} (t^2 - t_1^2) - \frac{J_F}{qn_a} (t - t_1) \quad (2.94)$$

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ สามารถคำนวณได้จากสมการปัวซองค์ (Poisson's Equation)

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{Q(x)}{\epsilon_s} \quad (2.95)$$

เมื่อ $Q(x)$ คือ ประจุในบริเวณปลอดพาหะ แตกต่างกับการทำงานในโหมดป้องกันแรงดัน เมื่อประจุในบริเวณปลอดพาหะเกิดจากการไอออไนซ์ของประจุผู้ให้ระหว่างช่วงเวลาปิดการกระจายตัวของประจุเพิ่มขึ้นในบริเวณปลอดพาหะเนื่องมาจากการกำจัดออกของประจุสะสม ดังนั้นสนามไฟฟ้าภายในบริเวณปลอดพาหะจะมีมาก ความเข้มข้นของโฮลภายในบริเวณปลอดพาหะนั้นมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแส (J_R) โดย

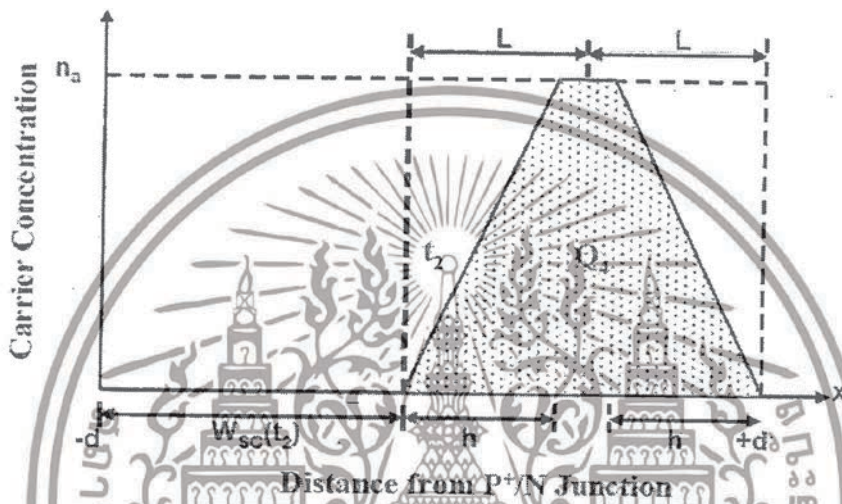
$$p(t) = \frac{J_R(t)}{qv_{sat,p}} = \frac{at - J_F}{qv_{sat,p}} \quad (2.96)$$

แรงดันที่รองรับบริเวณปลอดพาหะ นิยามโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_R(t) = \frac{q[N_D + p(t)]}{2\epsilon_s} [W_{sc}(t)^2] \quad (2.97)$$

สำหรับการขยายออกของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งให้เห็นว่าแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังเวลา t_1 ในตอนสุดท้ายของเฟสที่สามเกิดขึ้นเมื่อแรงดันย้อนกลับตกร้อมเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย (V_s) การใช้ค่าในสมการ (2.97) กับ (2.94) ที่เวลา t_2 ได้



รูปที่ 2.17 ประจุสะสมภายในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด P-I-N หลังจากสิ้นสุดเฟสที่สาม

ระหว่างเฟสที่สี่ของเวลาปิด กระแสย้อนกลับลดลงอย่างรวดเร็วที่การประมาณของอัตราคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ขณะที่แรงดันยังคงที่เท่ากับแหล่งจ่าย ประจุสะสมภายในบริเวณดริฟท์หลังจากสิ้นสุดเฟสที่สามดังรูป 2.17 บริเวณส่วนที่แรง Q_d ที่ตำแหน่งสิ้นสุดของเฟสสามในเวลาปิด ($t=t_2$) กระแสพื้นตัวย้อนกลับสูงสุด J_{PR} ที่ไหลผ่านโครงสร้างนั้น กระแสมีความสัมพันธ์กับพาหะอิสระตาม

$$J_{PR} = 2qD_a \frac{dn}{dx} = 2qD_a \frac{n_a}{h} \quad (2.98)$$

เมื่อขนาด h แสดงดังรูปที่ 2.17 โดยใช้สมการ

$$h = \frac{2qD_a n_a}{J_{PR}} \quad (2.99)$$

ประจุสะสมที่ยังเหลืออยู่ในบริเวณดริฟท์ที่เวลา t_2 นิยามโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_4 = qn_a[2d - W_{sc}(t_2) - h] \tag{2.100}$$

ประจุต้องการการกำจัดออกระหว่างเฟสที่สี่ ที่เวลาปิด ในระหว่างเฟสที่สี่ กระแสที่ลดลงเป็นศูนย์ที่ การประมาณอัตราคงที่ชี้ให้เห็นดังรูป 2.15 $[dj/dt]_R$ เหนือคาบเวลา t_B มีการขยายจากเวลา t_2 ไป t_3 ประจุที่ถูกกำจัดออกเนื่องมาจากกระแสที่ไหลระหว่างเวลาดังกล่าว นิยามโดย

$$Q_R = \frac{1}{2} J_{PR} t_B \tag{2.101}$$

ช่วงเวลาการทดลอง (t_B) ของกระแสย้อนกลับ นิยามโดย

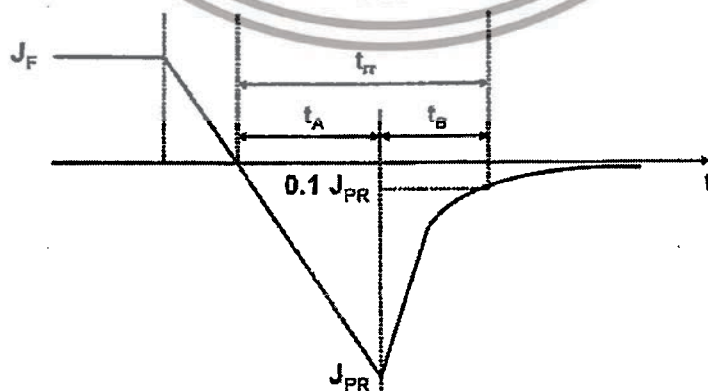
$$t_B = (t_3 - t_2) = \frac{2qn_a}{J_{PR}} [2d - W_{sc}(t_2) - h] \tag{2.102}$$

อัตราเชิงลาดย้อนกลับนิยามโดยการหารของกระแสพื้นด้วยย้อนกลับสูงสุดด้วยช่วงเวลา

$$\left[\frac{dj}{dt} \right]_R = \frac{J_{PR}}{t_B} = \frac{J_{PR}^2}{2qn_a[2d - W_{sc}(t_2) - h]} \tag{2.103}$$

2.4 เทรดออฟของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN

นอกจากกำลังสูญเสียจะเกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์ขณะช่วงเวลา ขณะ On-State แรงดันที่ตกคร่อมเพิ่มในตัวอุปกรณ์เมื่ออายุพาหะส่วนน้อยลดลง ซึ่งจะส่งผลให้มีการเพิ่มกำลังสูญเสียระหว่างกระแสไหลได้ เพื่อที่จะลดกำลังสูญเสียโดยทั่วไปเราจะทำการปรับปรุงเส้นของเทรดออฟ (Tradeoff) ซึ่งอยู่ระหว่าง On-State และการสวิตช์



รูปที่ 2.18 กราฟกระแสพื้นตัวย้อนกลับ ขณะเวลาปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นของเทอร์ตอปสามารถพลอตขึ้นขณะแรงดันตกคร่อมตอน On-State กับช่วงเวลาปิดพื้นตัวย้อนกลับ ช่วงเวลาปิดของกราฟนั้นประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างเฟสที่สี่ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ช่วงเวลาปิด(t_{rr}) นิยามโดยเวลาที่กระแสย้อนกลับลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ของกระแสพื้นตัวย้อนกลับสูงสุด (t_{PR}) หลังจากทีกระแสเท่ากับศูนย์

2.4.1 การควบคุมอายุพาหะ

การปรับระยะเวลาการรวมตัวในบริเวณดริฟท์สามารถดำเนินการได้โดยหลายวิธี ในตำแหน่งของระดับลิทภายในแถบช่องว่าง ส่วนใหญ่ภายในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตสารกึ่งตัวนำ จะใช้วิธีการแพร่อะตอมสารเจือพวกทองและแพลตตินัมลงไปหรือใช้วิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอน



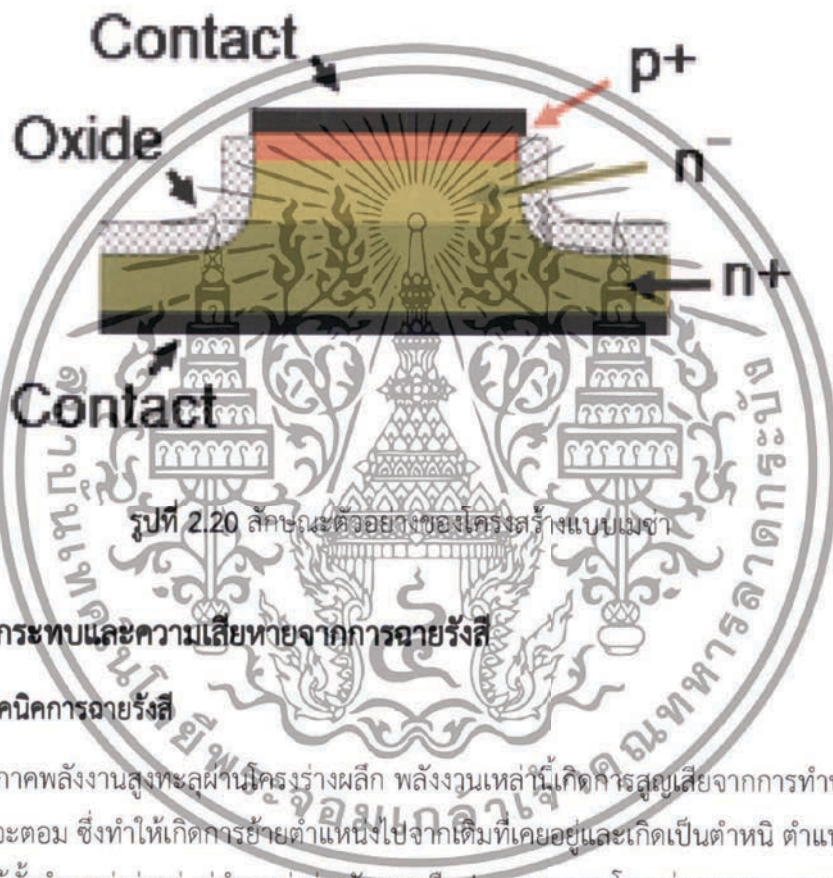
รูปที่ 2.19 กราฟเทอร์ตอปของซิลิกอนคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ได้รับการควบคุมอายุพาหะในวิธีต่างๆ

จากรูปที่ 2.19 อุปกรณ์ที่ใช้มีสภาพความต้านทาน 60-90 Ωcm ซิลิกอน N-type แรงดันพังทลาย 2500 โวลต์

2.5 ซิลิกอนพินไดโอดโครงสร้างแบบเมซ่า

โครงสร้างแบบเมซ่าก็จะมีลักษณะคล้ายเสื่อเกราะของนักรบโบราณ คือบริเวณขอบบนของเวเฟอร์ทั้งสองข้างจะถูกกัด (Etching) ออกไป ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถสร้างได้ง่าย ประยุกต์ใช้งานในกรณีที่อุปกรณ์ของเราต้องการให้แรงดันพังทลายทั่วทั้งแผ่นมีค่าเท่ากัน โดยปกติที่บริเวณขอบของเวเฟอร์สนามไฟฟ้าจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง จึงทำให้บริเวณขอบของเวเฟอร์มีแรงดันพังทลายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำกว่าบริเวณตรงกลาง เนื่องจากในบริเวณขอบของชิ้นงานจะมีความเข้มข้นของสารเจือต่ำกว่า บริเวณตรงกลางหรือที่เราเรียกว่า เบท (Bout) เมื่อความเข้มข้นของสารเจือที่ขอบนั้นมีความเข้มข้นต่ำ จะทำให้ค่าความต้านทาน (Resistivity) สูงตามไปด้วย เมื่อค่าความต้านสูงอุปกรณ์นั้นก็จะไม่ประหยัดพลังงาน เราจึงจำเป็นต้องทำให้ค่าแรงดันพังทลายตรงขอบชิ้นงาน มีค่าใกล้เคียงกับบริเวณตรงกลางหรือเบทมากที่สุด โดยการทำให้เป็นโครงสร้างแบบเมซ่า คือกีดทำให้มันเอียง จากนั้นสนามไฟฟ้าที่ขอบก็จะถูกเจือจางลง มีค่าใกล้เคียงกับบริเวณตรงกลางชิ้นงานได้มากขึ้น โดยตัวอย่างโครงสร้างแบบเมซ่านั้นจะแสดงดังรูปที่ 2.20



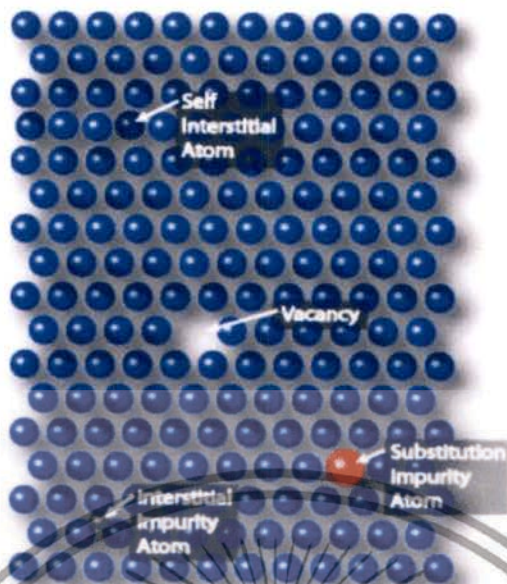
รูปที่ 2.20 ลักษณะตัวอย่างของโครงสร้างแบบเมซ่า

2.6 ผลกระทบและความเสียหายจากการฉายรังสี

2.6.1 เทคนิคการฉายรังสี

อนุภาคพลังงานสูงทะลุผ่านโครงร่างผลึก พลังงานเหล่านี้เกิดการสูญเสียจากการทำปฏิกิริยากับโครงร่างอะตอม ซึ่งทำให้เกิดการย้ายตำแหน่งไปจากเดิมที่เคยอยู่และเกิดเป็นตำหนิ ตำแหน่งว่างเหล่านี้เป็นได้ทั้งตำแหน่งว่างคู่, คู่ตำแหน่งว่างกับสารเจือปน, การแทรกโครงร่างอะตอม และ ส่วนประกอบของตำแหน่งว่างสารเจือปนกับการแทรกโครงร่างอะตอม ดังรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ลักษณะความเสียหายจากโครงสร้างผลึกในแบบต่างๆ

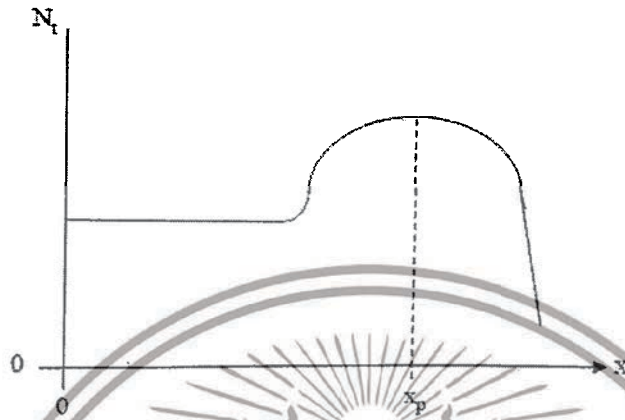
ทั้งหมดนี้นำไปสู่การเกิดศูนย์กลางรวมตัวในซิลิกอน รังสีของอิเล็กตรอน, โปรตอนอัลฟา, และแกมมา สามารถนำมาใช้ในเทคนิคนี้ได้โดยจะมีผลกระทบตออายุพาหะ ระดับลึกที่เกิดจากการฉายรังสี แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในแถบช่องว่างพลังงานของซิลิกอนที่เหมาะสมการลดอายุของพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังแสดงความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงสร้างผลึกกับความลึกหลังจากการฉายรังสีอนุภาคพลังงานสูงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตำหนิกับความลึกใต้ผิวหน้า N_t



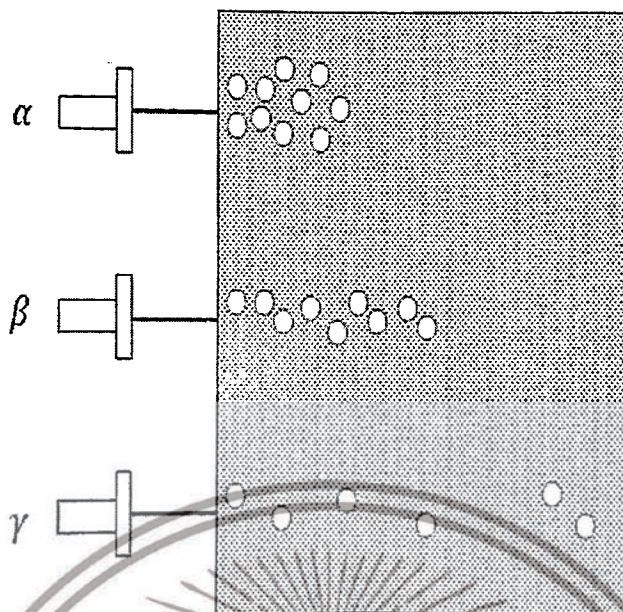
รูปที่ 2.23 แผนผังความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงสร้างผลึก กับความลึกหลังจากการฉายรังสีอนุภาคสูง

ความลึก x_p มีค่าสูงสุด (ความลึกที่ทะลุผ่าน) เป็นฟังก์ชันกับมวลและพลังงานของอนุภาค สำหรับการให้พลังงาน ความลึกที่ทะลุผ่านโดยประมาณจะแปรผกผันกับมวลของอนุภาค ความเสียหายจากรังสีโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงท้ายสุดของช่วงอนุภาค

2.6.2 การแตกตัวเป็นไอออนของรังสี

จากตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของรังสีชนิดต่างๆ สำหรับค่าพลังงานจนถึงที่ 1 Mev โดยอนุภาคที่มีมวลมากกว่าหรือน้อยกว่าจะสามารถเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอนุภาคที่มีมวลมากกว่า จึงทำให้ระยะทางที่อนุภาคนั้นสามารถทะลุผ่านได้มีค่าน้อยกว่า ดังรูปที่ 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 ลักษณะการทะลุผ่านของรังสีชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของรังสีชนิดต่างๆ

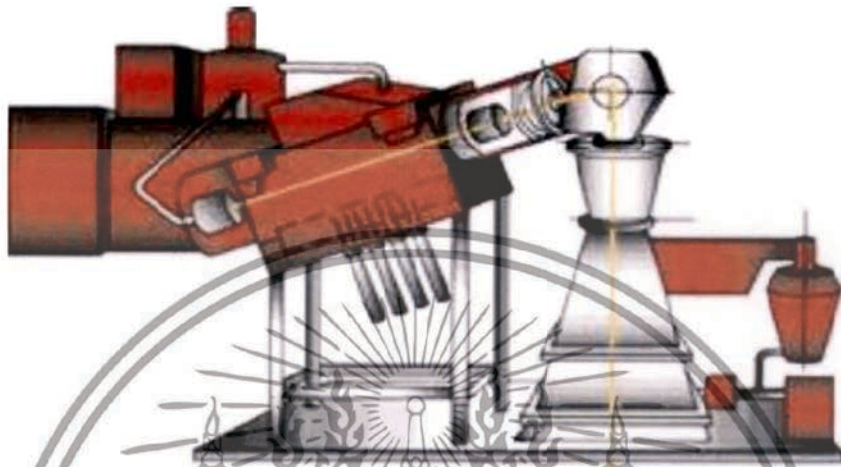
คุณสมบัติ	ปริมาณรังสี (E _k =1 Mev)				
	แอลฟา(α)	โปรตรอน(p)	อิเล็กตรอน(e)	โฟตอน(γ)	นิวตรอน(n)
สัญลักษณ์	${}^4_2\alpha$ or He^{2+}	1_1p or He^{1+}	${}^0_{-1}e$ or β	${}^0_0\gamma$	1_0n
ประจุ	+2	+1	-1	กลาง	กลาง
น้ำหนัก (amu)	4.001506	1.007276	0.000548858	-	1.008665
ความเร็ว (cm.sec)	6.94×10^8	1.38×10^9	2.82×10^{10}	1.008×10^{10}	1.38×10^9

2.6.3 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนความเร็วสูง

คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง (E-Beam) ของศูนย์ฉายรังสีอัญมณีแห่งใหม่ (อาคาร E-Beam) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ติดตั้งอยู่ในศูนย์วิจัยองค์กรักษ์ อำเภอรังษี จังหวัดนครนายก นั้นเป็นเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนแบบเชิงเส้น (Electron Linacs) รังสีที่เอามาใช้งานคือ อิเล็กตรอน และ เบริสตราลูจ ซึ่งเป็นเครื่องเร่งที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประหยัดมากที่สุด โดยปกติกออกแบบสร้างที่สามารถปรับเปลี่ยนพลังงานบีบได้ในช่วง 10 – 20 Mev (10.20KW) สำหรับเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนบีบ 20 MeV ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 1.5 mA หลังการฉายรังสีจะมีกัมมันตภาพรังสีต่ำ



รูปที่ 2.25 ลักษณะโครงสร้างเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนแบบเชิงเส้น

2.6.4 การปรับค่าอายุพาทะด้วยวิธีการฉายลำรังสีอิเล็กตรอน

ลักษณะสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ประเภทไบโพลาร์ (bipolar device) ได้แก่ ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ไรซิสเตอร์ IGBT และรวมถึงโครงสร้างรวมกันขึ้นอยู่กับอายุของพาทะส่วนเกินเช่นกัน อุปกรณ์ประเภทไบโพลาร์ที่มีรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกันแต่มีค่าอายุของพาทะส่วนเกินต่างกันจะมีลักษณะสมบัติสถานะนำกระแส และไดนามิกส์ที่ต่างกันสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ไรซิสเตอร์ IGBT ค่าอายุพาทะยาวเป็นที่ต้องการ เพื่อจะทำให้การสูญเสียในสถานะนำกระแส น้อยจนเป็นที่ยอมรับได้ ในทางกลับกัน อุปกรณ์ที่ต้องการให้ทำงานที่ความถี่สูงต้องการให้ อายุของพาทะที่สั้นเพื่อให้หยุดนำกระแสได้เร็ว และมีประจุไฟฟ้าพื้นตัวย้อนกลับน้อยที่สุด ในกรณีของอุปกรณ์ซิลิคอน อายุของพาทะส่วนเกิน โดยส่วนใหญ่ซึ่งถูกควบคุมด้วยศูนย์กลางการรวมตัว เฉพาะที่โดยการทำให้เกิดพลังงานระดับในช่องว่าง [2] จนกระทั่งความหนาแน่นของกระแสไปถึงระดับของลำดับ 10^3 A/cm^2 ซึ่งในช่วงนี้การรวมตัวแบบโอเจอร์จะเด่นขึ้นทันที [4] ส่วนในช่วงของความหนาแน่นกระแสซึ่งใช้งานปกติอายุของพาทะแปรผกผันกับความเข้มข้นของศูนย์กลางการรวมตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีของการเกิด และการรวมตัวของพาหะผ่านศูนย์กลางเฉพาะที่ โดยปกติแล้วจะอ้างอิงถึงทฤษฎี Shockley-Read-Hall [5], [6], [3] ในระหว่างกระบวนการรวมตัวคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลรวมตัวผ่านระดับลึกของอะตอมเจอปน ขึ้นกับลักษณะของความเข้มข้นของความไม่บริสุทธิ์ (N_t) ระดับพลังงาน (w_t) ในแถบช่องว่างพลังงาน และ capture cross section ของอิเล็กตรอน (σ_n) และโฮล (σ_p) ตามลำดับ สำหรับระดับลึกของอะตอมผู้ให้เดี่ยว ความเร็วการรวมตัวแสดงโดยสมการ

$$R_n = -\frac{d\Delta n}{dt} = V_{th} \sigma_n (nN_t^+ - n_1 N_t^*) \quad (2.104)$$

$$R_p = -\frac{d\Delta p}{dt} = V_{th} \sigma_p (pN_t^+ - p_1 N_t^*) \quad (2.105)$$

เมื่อ V_{thp} และ V_{thn} คือ อัตราเร็วความร้อนของโฮล และอิเล็กตรอน N_t^+ คือ ความเข้มข้นศูนย์กลางไอออน N_t^* คือความเข้มข้นศูนย์กลางเป็นกลาง n_1 และ p_1 คือความเข้มข้นโฮล และอิเล็กตรอน ถ้าระดับเฟอร์มิเท่ากับศูนย์กลางระดับพลังงาน นั่นคือ

$$p_1 = N_v \exp\left[-\frac{w_g - w_f}{kT}\right] \quad (2.106)$$

และ

$$n_1 = N_c \exp[-w_f/kT] \quad (2.107)$$

จากความสัมพันธ์เดียวกันสามารถใช้สำหรับกรณีของระดับลึกของอะตอมผู้รับเดี่ยวได้เช่นกันเพื่อรักษาสภาพสมดุลพลศาสตร์ จำเป็นต้องรักษาเงื่อนไข electroneutrality ไว้ซึ่งให้ความเข้มข้นของศูนย์กลางต่ำกว่าความเข้มข้นของพาหะส่วนใหญ่ในสภาวะสมดุลมากๆ ($N_t \ll n_0 + p_0$), $R_n = R_p$ และอายุของพาหะแสดงโดย

$$\tau = \tau_{p0} \frac{n_0 + n_1 + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n} + \tau_{n0} \frac{p_0 + p_1 + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n} \quad (2.108)$$

เมื่อ n_0 และ p_0 คือ ความเข้มข้นของโฮล และอิเล็กตรอนในสภาพสมดุลความร้อน

Δn ($\Delta n = \Delta p$) คือ ความเข้มข้นพาหะส่วนเกิน

$$\tau_{p0} = (v_{thp} \sigma_p N_t)^{-1} \quad (2.109)$$

และ

$$\tau_{n0} = (v_{thn} \sigma_n N_t)^{-1} \quad (2.120)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังประเภทไบโพลาร์โดยปกติแล้วทำงานในโหมดสวิตซ์ซึ่ง เมื่ออยู่ในสถานะนำกระแสชั้นภายใน (Internal layer) เต็มไปด้วยพาหะส่วนเกินภายในได้เงื่อนไขการฉีดระดับสูง เงื่อนไขการฉีดระดับต่ำจะเกิดได้เมื่อมีความหนาแน่นกระแสค่อนข้างน้อยเท่านั้น เมื่ออยู่ในสถานะหยุดนำกระแสความกว้างชั้นปลอดพาหะเกิดขยายขึ้นที่รอยพีเอ็น

ภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูง ($\Delta n \gg n_0 + p_0, \Delta n \gg N_t$) อายุของพาหะการฉีดระดับสูง (τ_H) แสดงโดย

$$\tau_H = \tau_{n0} + \tau_{p0} = \frac{1}{N_t} \left[\frac{1}{v_{thn}\sigma_n} + \frac{1}{v_{thp}\sigma_p} \right] \quad (2.121)$$

ซึ่งจะเห็นว่าอายุของพาหะไม่ขึ้นกับพลังงานของศูนย์กลาง แต่ขึ้นกับความเข้มข้นของศูนย์กลาง (N_t) และ capture cross sections เท่านั้น

ในชั้นปลอดพาหะ ศูนย์กลางระดับลึกทำให้เกิดการเกิดใหม่ของพาหะ ซึ่งอัตราการเกิดใหม่ (G) แสดงโดย

$$G = \frac{n_i^2}{(n_i\tau_{p0} + p_i\tau_{n0})} = \frac{n_i}{\tau_{sc}} \quad (2.122)$$

เมื่ออายุของพาหะในบริเวณปลอดประจุขึ้นอยู่กับตำแหน่งของระดับพลังงานกับดัก (W_t) เนื่องจากตำแหน่งของระดับพลังงานนี้มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (W_f) และมีค่าน้อยสุดเมื่อ (W_t) และ (W_f) ทับซ้อนกัน

$$\tau_{sc} = \tau_{p0} \exp \left[\frac{-(W_t + W_f)}{kT} \right] + \tau_{n0} \exp \left[\frac{-(W_t + W_f)}{kT} \right] \quad (2.123)$$

ศูนย์กลางการรวมตัวในซิลิคอนเกิดขึ้นได้จากอะตอมเจ็อบนของโลหะหนัก และจุดตำหนิ แต่ละชนิดของศูนย์กลางมีลักษณะสมบัติของระดับพลังงาน และ Carrier capture cross sections ที่เป็นของตัวเอง ดังนั้น อายุของพาหะจึงถูกกำหนดโดยศูนย์กลางการรวมตัวที่มีอยู่ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้าง และการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงถึงเทคโนโลยีการสร้าง และกระบวนการสร้างซิลิคอนพินไดโอดโครงสร้างแบบเมซ่า แล้วนำมาทำการฉายรังสีอิเล็กตรอน เพื่อลดค่าอายุพายุหะของตัวอุปกรณ์และศึกษาคุณสมบัติการทำงานกับพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นตัวกำหนดลักษณะคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์

3.1 เทคโนโลยีการสร้าง

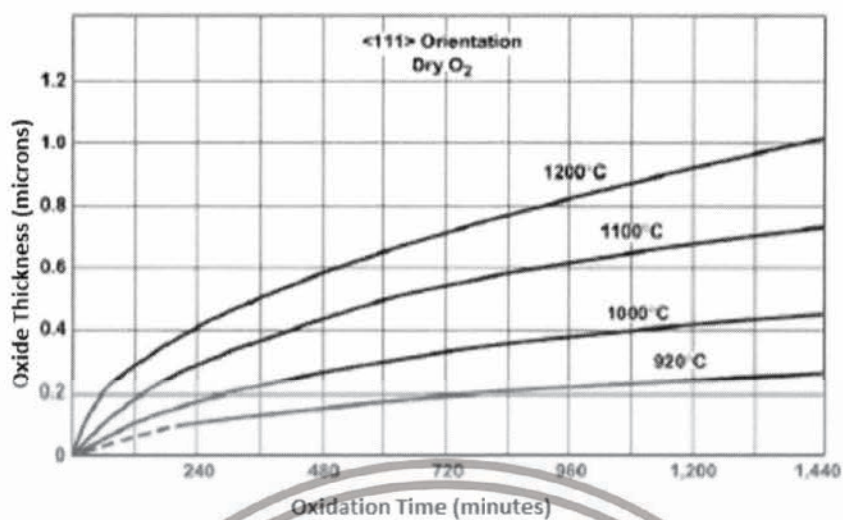
กระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 6 กระบวนการ คือ กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process) , กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) , กระบวนการการกัด (Etching Process) , กระบวนการการแพร่สารเจือ (Diffusion Process) , กระบวนการสร้างชั้นโลหะ (Metallization Process) และกระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering process)

3.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน

กระบวนการออกซิเดชัน หรือ Oxidation คือ กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ (SiO_2) บนพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ เพื่อป้องกันวัสดุที่อยู่ด้านล่างจากการปนเปื้อน (Contamination) และทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างชั้นสาร ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันมีอยู่ 2 วิธีได้แก่

- กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

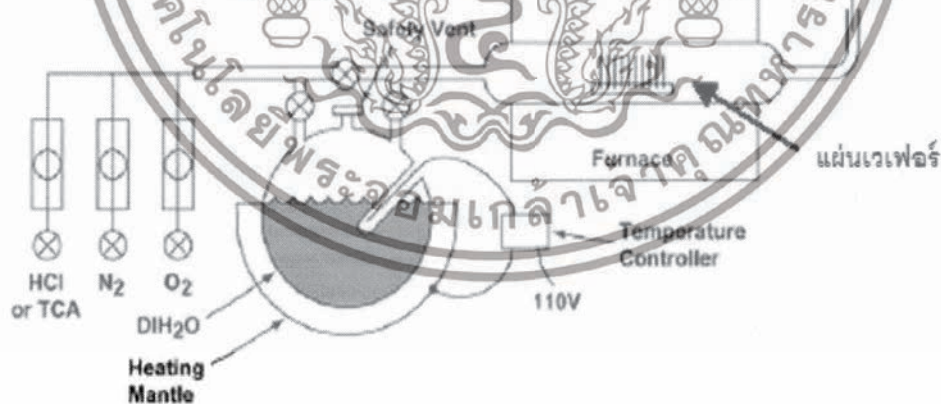
ซึ่งใช้ในการสร้างชั้นออกไซด์ที่บาง ($100-1000\text{\AA}$) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของแก๊สออกซิเจนที่บริสุทธิ์กับอะตอมของซิลิคอนที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1,100$ องศาเซลเซียส อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับอะตอมของออกซิเจนจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีสำหรับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้น SO_2 ที่ได้ จาก กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง

กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก (Wet Oxidation)

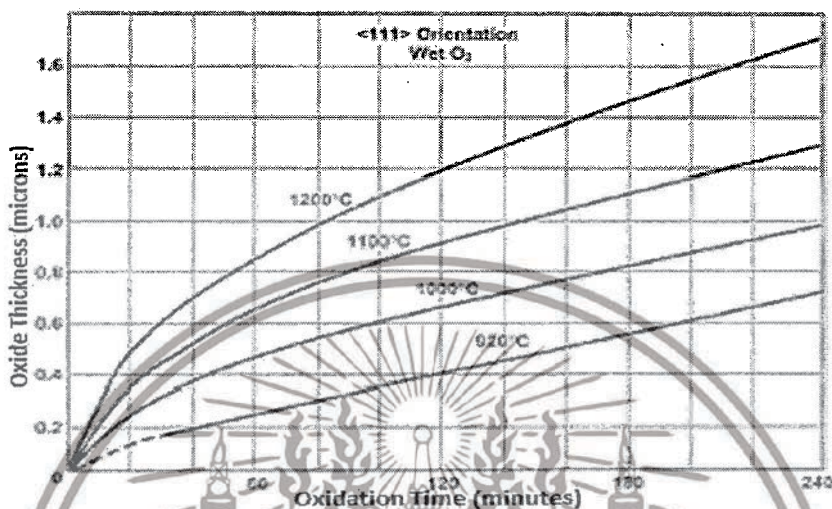
ซึ่งใช้ในกรณีสร้างออกไซด์ที่หนา (>1000 Å) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนและอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90-95 องศาเซลเซียส ก๊าซออกซิเจนซึ่งอิ่มตัวและมีไอน้ำอยู่ด้วยจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในท่อครอบที่มีแผ่นเวเฟอร์วางอยู่ ทำให้อะตอมของออกซิเจนรวมตัวกับอะตอมของซิลิคอนจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

ซึ่งอัตราการเกิดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบชื้นนี้จะเร็วกว่าอัตราการเกิดที่ได้จากกระบวนการแห้งถึง 4 เท่า เนื่องจากขนาดของโมเลกุลน้ำเล็กกว่าของโมเลกุลออกซิเจนครึ่งหนึ่ง ดังนั้นอัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำไปยังชั้น SO_2 จึงมากกว่าอัตราการแพร่ของออกซิเจน แม้ว่าอัตราการเกิดออกไซด์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยโมเลกุลน้ำจะมากกว่าออกซิเจน แต่ในการออกซิเดชันแบบแห้งจะมีความหนาแน่นของโครงสร้างออกไซด์ที่สูงกว่าแบบเปียก ดังนั้นกระบวนการแบบออกซิเดชัน โดยทั่วไปจะนิยมใช้ (แห้ง - เปียก - แห้ง) สำหรับความหนาของออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบเปียกเป็นดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้น SO₂ ที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก

การหาความหนาของออกไซด์ นอกจากจะพิจารณากราฟรูปที่ 3.1 และ 3.2 แล้วยังสามารถบอกความหนาของชั้นออกไซด์ได้โดยการดูสีของชั้นออกไซด์จากการสะท้อนแสงฟลูออเรสเซนต์ตรงๆซึ่งแสดงดังภาพผนวก ก.

3.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

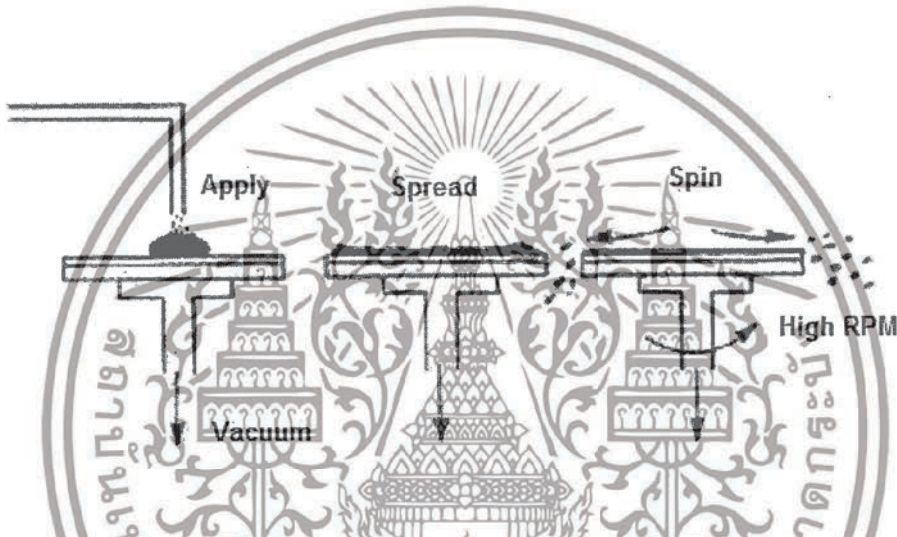
- กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นศิลปะที่ทำด้วยการคัดลอกลวดลายภาพจากลวดลายต้นแบบไปยังวัตถุอื่นๆ เช่นฐานรองซิลิกอน ซึ่งวิทยาการของโฟโตลิโธกราฟีนี้ มีการกระทำมานานมากกว่าหนึ่งร้อยปีแล้ว โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อสลักลวดลายลงบนหินหรือโลหะ คำว่า "Photolithography" มาจากภาษากรีกโบราณ ซึ่งเกิดจากการสร้างลวดลายภาพลงบนหินโดยใช้แสง ในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีถูกใช้คัดลอกลวดลายที่เล็กมากในระดับไมโครเมตร หรือนาโนเมตร เพื่อใช้ในการกำหนดพื้นที่ๆ แม่นยำลงในวัสดุที่ไวต่อแสง เช่นน้ำยาไวแสงและกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีนี้จะถูกกระทำโดยใช้แสงเสมอ

- จุดประสงค์หลักของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีในปัจจุบัน แบ่งออกเป็นสองส่วนหลักคือ (1) การสร้างลายวงจรต้นแบบโฟโตมาร์ก เป็นการสร้างลายวงจรบนฐานรองที่โปร่งแสง เช่นแผ่นควอตซ์ (Quartz) ที่มีความบริสุทธิ์สูง เพื่อใช้เป็นแม่พิมพ์ในการถ่ายแบบยังฐานรองชนิดอื่นๆ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ(2) ใช้ในการสร้างลวดลายวงจบบนแผ่นเวเฟอร์ฐานรอง ซึ่งจะถูกลบด้วยน้ำยาไวแสงเพื่อใช้สร้างลายวงจบบนแผ่นเวเฟอร์ก่อนการนำไปสู่กระบวนการกัด (Etching) หรือการฝังประจุแบบไอออน (Ion implantation) เพื่อการสร้างลายวงจบบนแผ่นเวเฟอร์ต่อไป นอกจากนี้ การผลิตด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี สามารถสร้างลวดลายวงจรมีจำนวนมากขึ้นได้ ด้วยกระบวนการการผลิตเพียงครั้งเดียวเป็นต้น

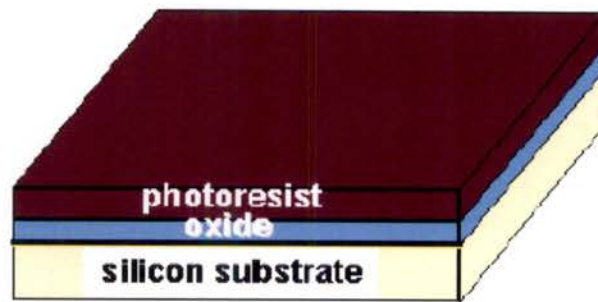
- กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากการเคลือบสารไวแสง (Photoresist) ลงบนชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ทั่วทั้งแผ่น โดยใช้วิธีการในการปล่อยน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์จากนั้นทำการหมุนแผ่นเวเฟอร์เพื่อเกลี่ยให้น้ำยาไวแสงคลุมพื้นที่ทั่วแผ่นดังแสดงในรูปที่ 3.4



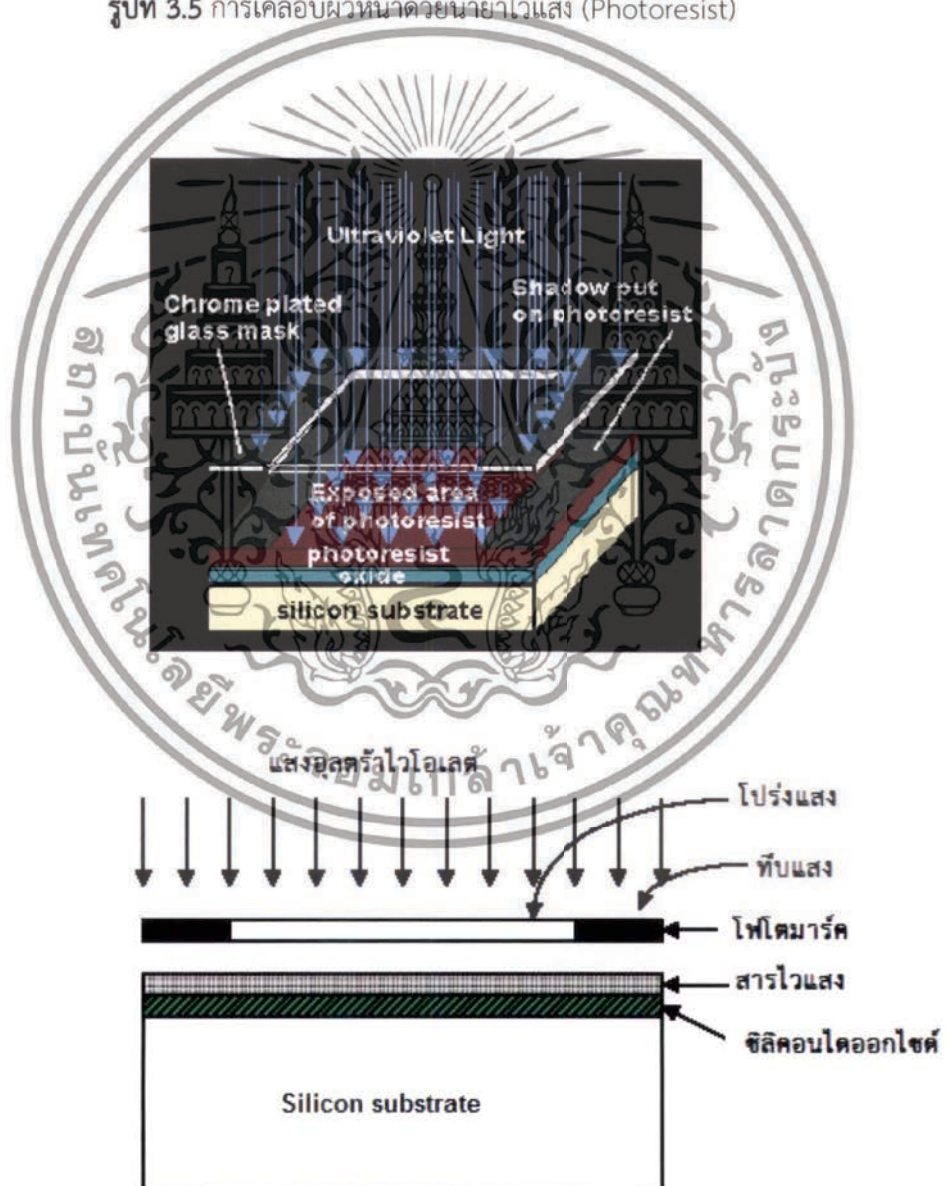
รูปที่ 3.4 การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์

สารไวแสงหรือน้ำยาไวแสงนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีถ้าถูกแสง น้ำยาไวแสงดังกล่าวมีทั้งชนิดบวกและชนิดลบ นำแผ่นที่เคลือบสารไวแสงไปอบ (Cure) ในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 100 °C เพื่อทำให้น้ำยาไวแสงยึดติดกับผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น จะได้แผ่นเวเฟอร์ที่มีชั้นของสารไวแสงเคลือบอยู่ หลังจากนั้นจะนำไปฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านโฟโตมาสก์ (Photo Mask) ไปตกกระทบบนแผ่นเวเฟอร์เพื่อให้เกิดรูปแบบที่ต้องการบนแผ่นเวเฟอร์นี้ ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสง (Photoresist)



รูปที่ 3.6 การฉายแสงอัลตราไวโอเลตผ่านโฟโตมาร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้วจะนำแผ่นเวเฟอร์ไปทำการล้าง (Develop)เอาส่วนของน้ำยาไวแสงที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับว่าใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Resist) หรือชนิดลบ (Negative Resist) ถ้าใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวกเมื่อนำไปตีเวลอป (Develop) ส่วนที่ถูกแสงจะถูกกัดออกไป แต่ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงแบบบวกเมื่อนำไป ตีเวลอปส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 (ก) Negative resist developed, (ข) Positive resist developed

ชนิดของโฟโตลิโธกราฟี

โฟโตลิโธกราฟีประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานสองชนิด คือ โฟโตลิโธกราฟีชนิดลบ (Negative photolithography) และบวก (Positive photolithography)

-โฟโตลิโธกราฟีชนิดลบ

ลักษณะหลักของโฟโตลิโธกราฟีชนิดลบคือส่วนน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงจะกลายเป็นส่วนที่ไม่สามารถละลายน้ำได้และแข็งตัวโดยครอสลิงกิง (Cross linking) ภาพลวดลายจะถูกขึ้นรูปมีลักษณะตรงกันข้ามกับจากลวดลายของลวดลายโฟโตมาสก์ต้นแบบ และมีลักษณะลวดลายเช่นเดียวกับฟิล์มเนกาทีฟของกล้องถ่ายรูป

-โฟโตลิโธกราฟีชนิดบวก

โฟโตลิโธกราฟีชนิดบวก ลวดลายที่ถูกฉายแบบลงบนเวเฟอร์จะมีภาพลวดลายเหมือนเช่นเดียวกับลวดลายบนแผ่นโฟโตมาสก์ต้นแบบ พื้นที่ๆ ถูกฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตจะทำปฏิกิริยาทางเคมีแสงและกลายเป็นส่วนที่สามารถละลายได้และอ่อนตัวในน้ำยาล้างลาย ซึ่งลักษณะนี้หมายถึงพื้นที่ของน้ำยาไวแสงชนิดบวกถูกทำการฉายแสงแล้วจะเป็นพื้นที่สามารถล้างออกได้นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 กระบวนการกัด (etching)

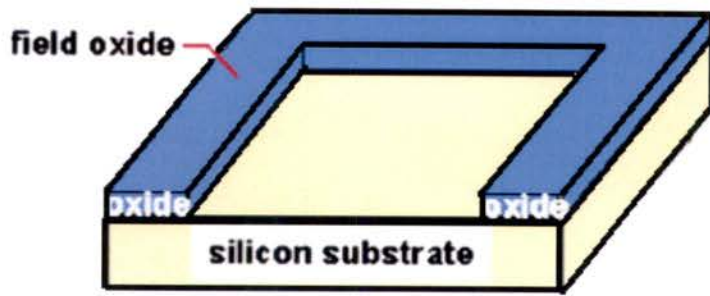
การกัด (etch) คือกระบวนการนำวัสดุออกจากผิวเวเฟอร์ (wafer) เพื่อใช้ในการออกแบบไอซี (IC) ที่ต้องการ ซึ่งมีอยู่สองประเภท ประเภทแรกคือการกัดตามลวดลาย (patterned etch) ซึ่งจะเจาะจงนำวัสดุออกจากพื้นที่ที่กำหนด และถ่ายทอดรูปแบบจากน้ำยาไวแสง (photoresist) หรือแผ่นมาร์ค (hard mask) ไปยังพื้นผิวแผ่นฟิล์ม อีกประเภทหนึ่งคือการกัดแบบครอบคลุม (blanket etch) ซึ่งจะนำวัสดุทั้งหมดออกหรือนำเอาในส่วนของแผ่นฟิล์มออกเพื่อให้ได้ผลของกระบวนการที่ต้องการ เนื้อหาในส่วนนี้จะครอบคลุมทั้งสองประเภทของการกัด โดยเน้นที่การกัดตามลวดลาย (patterned etch) การถ่ายทอดลวดลายโดยใช้แสง (Photolithography) และการกัดแบบเปียก (wet etch) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมการพิมพ์มาเป็นเวลานาน และถูกใช้ในการผลิตแผ่นปริ้น (PCB) ซึ่งเทคโนโลยีนี้ได้รับมาจากอุตสาหกรรมเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ อย่างการผลิตทรานซิสเตอร์และไอซี ในปี 1950 เครื่องมือและแผงวงจรถูกถ่ายทอดไปยังเวเฟอร์ (wafer) ด้วยกระบวนการกัดและกระบวนการฝังด้วยไอออน (ion implantation) ฟิล์มแพทเทิร์นที่กำหนดโดยน้ำยาไวแสง (photoresist) บนพื้นผิวเวเฟอร์ด้วยการใช้กระบวนการถ่ายทอดโดยใช้แสง (photolithography) กระบวนการกัด หรือ Etching คือ การนำเอาชั้นสารต่างๆออกจากแผ่นซิลิคอนดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ส่วนของแผ่นเวเฟอร์ที่ทำการลอกชั้นของออกไซด์ออก

หลังจากลอกเอาส่วนของออกไซด์ออกแล้วจะเข้าสู่กระบวนการ Etching อีกครั้งหนึ่งเพื่อกำจัดชั้นของสารไวแสง (Photoresist) ออกไปก็จะเหลือส่วนของซิลิคอนไดออกไซด์ที่ต้องการอยู่บนชั้นสเตรท ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่บนซับสเตรท

ซึ่งกระบวนการกัด สามารถทำได้อยู่ 2 วิธี คือ

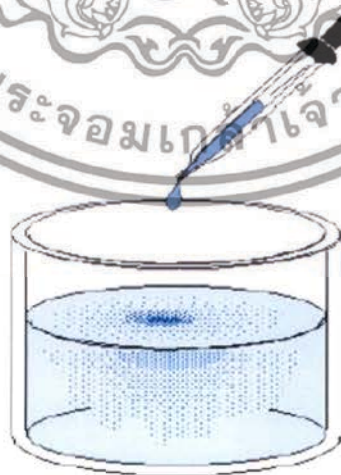
- การกัดแบบเปียก (Wet Etching) โดยใช้สารเคมีในการกัดกร่อน
- การกัดแบบแห้ง (Dry Etching) โดยใช้แก๊สที่มีไอออนของสารเคมี

3.1.4 กระบวนการโด๊ป (Doping)

กระบวนการโด๊ปสามารถแบ่งได้ 2 วิธี ได้แก่

- การแพร่สารเจือ (Diffusion)

กระบวนการในการแพร่สาร หมายถึง กระบวนการที่สารชนิดหนึ่งที่มีความหนาแน่นสูง ถูกนำไปใส่ไว้ในสารอีกชนิดหนึ่งที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า สารที่มีความหนาแน่นสูงจะแพร่กระจาย ออก ตัวอย่างเช่นหยดหมึกลงในน้ำ จะสังเกตเห็นเมื่อมีการหยดหมึกลงในน้ำหมึกจะกระจายตัวออกไป จนทำให้น้ำเปลี่ยนสีเป็นสีของหมึกจาง ๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 หลักการแพร่กระจายของหมึกในน้ำ

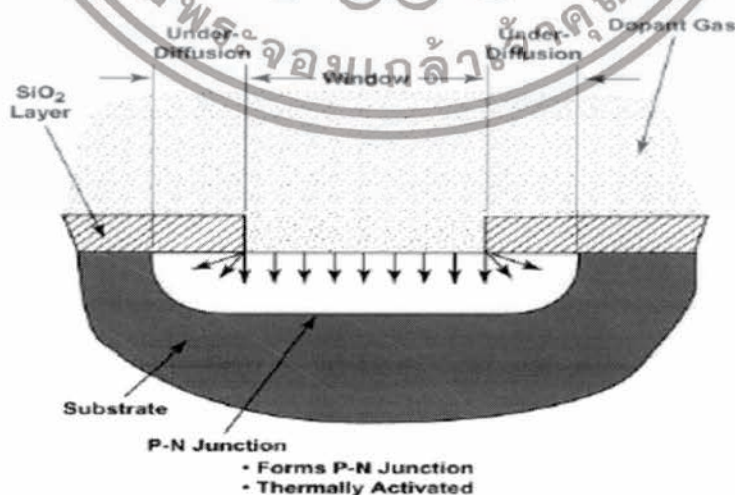
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการแพร่สารเจือในของแข็งนั้นเป็นไปได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และมีกลไกการแพร่สารเจือเป็น 2 แบบ คือ การเข้าไปแทนที่อะตอม และการเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างอะตอม - การแพร่แบบเข้าไปแทนที่

วาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิคอนหรือเยอรมาเนียมมี 4 ตัว และการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมทำกันด้วยพันธะโควาเลนซ์ (Covalance Bond) และเกาะกันเป็นโครงผลึก (Lattice) เพื่อให้พลังงานสูงขึ้นคู่พันธะจะแตกออกอะตอมของสารเจือจะเข้าไปแทนที่ ลักษณะการแทนที่เช่นนี้ อะตอมของสารเจือจะต้องมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของอะตอมที่จะถูกแทนที่ ซึ่งเป็นกรณีเดียวกับการแพร่ของโบรอน ฟอสฟอรัส อาเซนิก ในซิลิคอนหรือเยอรมาเนียม เมื่อมีการแทนที่แล้ว ถ้าหากอะตอมของสารเจือได้รับพลังงานมากพอก็อาจจะหลุดไปและมีการแทนที่และที่ใหม่ได้เช่นกัน -การแพร่แบบเข้าไปแทรกตัว

โดยการแพร่แบบนี้จะเกิดขึ้นกับสารเจือที่มีขนาดอะตอมใหญ่กว่าอะตอมของสารกึ่งตัวนำมาก เช่น การแพร่ของทองคำในซิลิคอน เป็นต้น

ซึ่งในกระบวนการของการแพร่สารเจือจะต้องประกอบด้วย การ Deposition การ Drive-in และการ Activation จะเห็นว่าแผ่นเวเฟอร์จะถูกเคลือบด้วยสารเจือทั่วทั้งแผ่น มีการเปิดช่องเพื่อให้สารเจือเข้าไปได้โดยผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการกัดแล้ว เรียกขั้นตอนนี้ว่า Deposition จากนั้นแผ่นเวเฟอร์จะถูกทำให้ร้อนเพื่ออะตอมของสารเจือได้แทรกตัวเข้าไปในโมเลกุลของซิลิคอนหรือเยอรมาเนียมในแผ่นเวเฟอร์ เรียกขั้นตอนนี้ว่าการ Drive-In หลังจากนั้นอะตอมของซิลิคอนหรือเยอรมาเนียมจะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของสารเจือทำให้เกิดอะตอมผู้ให้ (Donor) หรืออะตอมผู้รับ (Acceptor) ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ เรียกขั้นตอนนี้ว่า Activation แหล่งจ่ายสารเจือจะอยู่ในรูปของสารประกอบทั้ง 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส รูปแบบการใช้งานก็จะมีเหมาะสมแตกต่างกันออกไปตามสถานะ

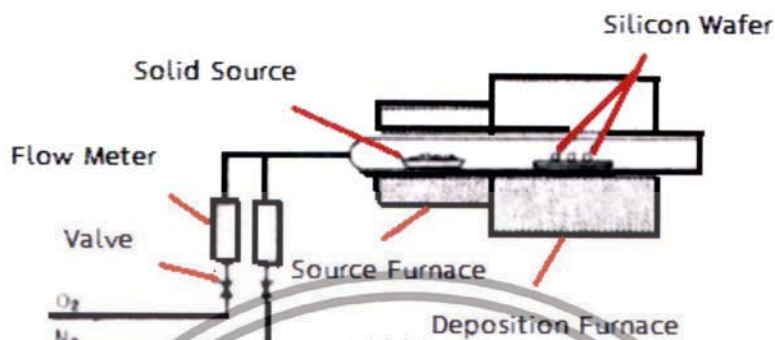


รูปที่ 3.11 การแพร่สารเจือ (Diffusion) เกิดเป็นรอยต่อ P-N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การแพร่สารเจือเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในลักษณะของแข็ง

แหล่งจ่ายสารเจือที่เป็นของแข็ง จะเป็นสารประกอบของโบรอน ฟอสฟอรัสและอาเซนิก ซึ่งเตาแพร่สารมักจะเป็นแบบ Two-zone Diffusion Furnace ดังรูปที่ 3.12



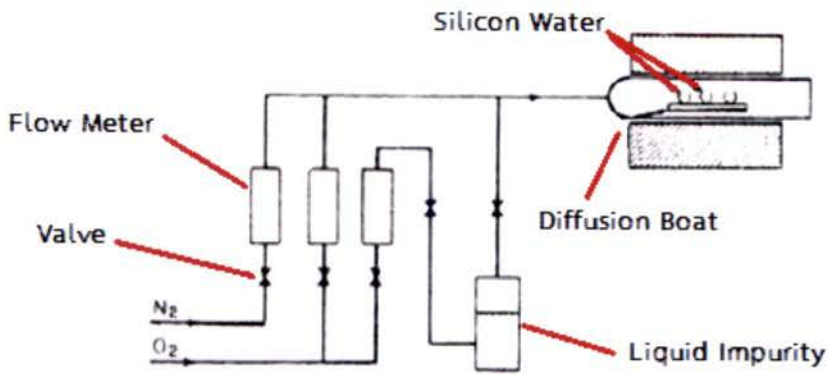
รูปที่ 3.12 เตาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นของแข็ง (Solid Source)

จากรูปที่ 3.12 เตาแพร่สารเจือจะแบ่งออกเป็น 2 ตอน ตอนหลังซึ่งมีแหล่งจ่ายสารเจืออยู่ จะมีอุณหภูมิต่ำ ประมาณ 200-400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นตำแหน่งวางเวเฟอร์จะมีอุณหภูมิประมาณ 800-1,250 องศาเซลเซียส แก๊สพาหะจะใช้ทั้งออกซิเจนและไนโตรเจน

- การแพร่สารเจือเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในลักษณะของเหลว

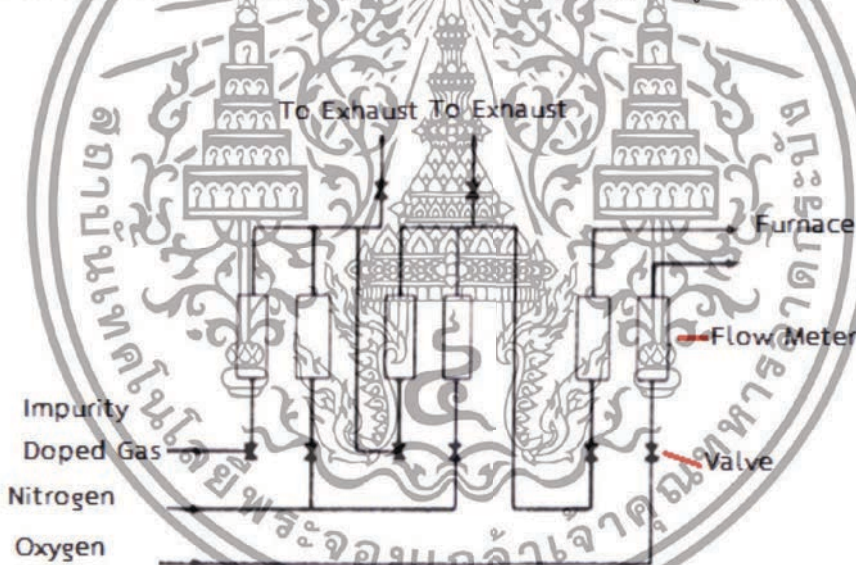
โดยทั่วไปแหล่งจ่ายสารเจือจะเป็น Phosphorus Oxychloride (POCl₃) และ Boron tribomide (BBr₃) ซึ่งมีกระบวนการคล้ายกับการทำ Wet Oxidation คือ ผ่านแก๊สเมื่อลงไปในสารละลาย จากนั้นไอของ BBr₃ หรือ POCl₃ ก็จะถูกพาเข้าไปในท่อควอทซ์ ซึ่งมีแผ่นเวเฟอร์อยู่ดังรูปที่ 3.13 ในทางปฏิบัติสามารถควบคุมความหนาแน่นในการแพร่สารเจือได้โดยการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งตัวแปรอื่นๆ เช่น เวลา อัตราการไหลของแก๊ส ปริมาณออกซิเจน มักจะถูกจำกัดให้มีความหนาแน่นที่เอาไว้ ข้อดีของการแพร่สารเจือแบบนี้คือ สามารถแพร่สารเจือให้มีความหนาแน่นได้สูงประมาณ 10² Atom/cm³ แต่มีข้อเสีย คือ การแพร่ให้มีความหนาแน่นของสารเจือสูงๆ อาจเกิดความเสียหายของผิวหน้า เนื่องจากโบรมีน และคลอรีนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 เตาเผาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นของเหลว (Liquid Source)

- การแพร่สารเจือเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในลักษณะแก๊ส โดยจะใช้สารประกอบของโบรอน ฟอสฟอรัส และอาเซนิกแสดงดังรูป 3.14



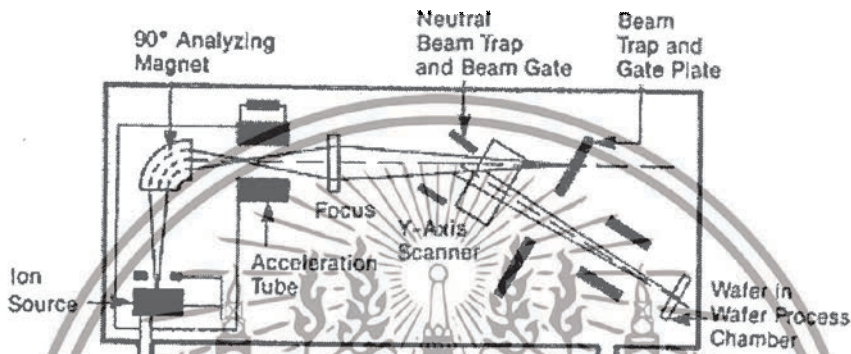
รูป 3.14 เตาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นแก๊ส (Gas Source)

การใช้แหล่งจ่ายสารเจือที่เป็นแก๊ส มีข้อได้เปรียบกว่าทั้งสองแบบที่กล่าวมามาก เนื่องจากสามารถควบคุมความหนาแน่นของสารเจือได้ง่าย ทั้งยังทำให้ใช้งานกับระบบอัตโนมัติได้สะดวกอีกด้วย ทำให้เตาที่ใช้มีขนาดกระทัดรัดลงมา และเป็นแบบ Single-Zone Diffusion Furnace และยังได้เปรียบในเรื่องของความสะดวกอีกด้วย แต่ก็มีข้อเสีย คือ เนื่องจากแก๊สที่ใช้เป็นแก๊สพิษ ถ้าไม่มีระบบป้องกันที่ดีพอ อาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การยิงไอออน (Ion-Implantation)

การได้ปโดยวิธีการแพร่สารเจือเป็นวิธีที่ใช้ได้ดีกับวงจรรวมที่มีขนาดไม่หนาแน่นมากนัก เช่น วงจรรวมแบบ SSI MSI หรือ LSI แต่ถ้าเป็นวงจรรวมขนาดใหญ่การโคปโดยวิธีการแพร่สารเจือจะทำได้ยากเนื่องจากการควบคุมขอบเขตของการแพร่สารจะทำได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการกระบวนการโคป โดยใช้วิธีการยิงไอออน เนื่องจากสามารถควบคุมให้มีความเที่ยงตรงแน่นอน ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อ หรือปริมาณอะตอมของสารเจือ เครื่องยิงไอออนแสดงรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 โดอะแกรมการทำงานของ Ion-Implantation

อะตอมของสารเจือจะถูกเลือกโดย Analyze Magnet หลังจากนั้น ก็จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า (Acceleration Tube) ผ่านเลนส์แม่เหล็กเข้าสู่ระบบการสแกน (อาจจะสแกนลำอนุภาค หรือเลื่อนแผ่นเวเฟอร์ก็ได้) เพื่อให้ตกกระทบสู่แผ่นเวเฟอร์ปกติแล้วจะใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) หนาๆ หรือสารไวแสง (Photoresist) หนาๆ เป็นหน้ากาะป้องกันการแพร่ในส่วนที่ไม่ต้องการ ความลึกของอนุภาคสารเจือที่จะเข้าไปสู่แผ่นซิลิคอน สามารถที่จะกำหนดได้โดยการปรับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เร่งอนุภาคสารเจือ

3.1.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization)

เมื่อผ่านกระบวนการมาถึงขั้นตอนนี้จะได้ชิ้นส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์วงจรรวมบนแผ่นเวเฟอร์ แต่ส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์เหล่านั้น ยังไม่มีส่วนใดที่ต่อเชื่อมถึงกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์เหล่านั้นเข้าด้วยกันตามโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้เพื่อที่จะให้ได้วงจรรวมที่ทำงานตามหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ การเชื่อมต่อส่วนต่างๆ ดังกล่าวเข้าด้วยกันจำเป็นต้องอาศัย กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization) เพื่อสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic Contact) โดยใช้ตัวนำไฟฟ้าที่ทำให้รอยสัมผัสที่ค่าความต้านทานต่ำทำให้ส่วนต่างๆ เชื่อมต่อกันได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 จุดหลอมเหลว (Melting Points) และสภาพต้านทาน(Resistivities)

Material	melting point (°C)	Resistivity ($\mu\Omega - \text{cm}$)
Al	660	2.7
Cr	1878	12
Mo	2615	5.7
Ti	1670	41.2
W	3417	5.6
Au	1064	2.44
Ni	1455	6.99

ขั้นตอนของกระบวนการเมทัลไลเซชัน เริ่มจากการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon Nitride) ที่มีความหนาปกคลุมผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ เรียกส่วนนี้ว่า Top Nitride เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนบนผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ ป้องกันความชื้น ฝุ่นละออง และรอยขีดข่วนที่อาจเกิดขึ้นกับชั้นของสารกึ่งตัวนำในขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้โฟโตมาร์ค และกระบวนการกัดเพื่อเปิดช่องสำหรับนำโลหะมาสร้างรอยสัมผัสโอห์มมีคต่อส่วนต่างๆ ของวงจรรบนแผ่นเวเฟอร์ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมีคโดยใช้โลหะ เช่น อลูมิเนียมมาสร้างเป็น ชั้นปกคลุมผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ จากนั้นก็จะใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี พร้อมด้วยโฟโตมาร์ค และกระบวนการกัดเพื่อส่วนของตัวนำในส่วนที่ไม่ต้องการออกไป

3.1.7 กระบวนการซินเตอร์ริง

หลังจากทำการเคลือบนิเกิลและทองคำ และทำการโฟโตลิโธกราฟีแล้วอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นแถบตัวนำ และก่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มมีคและรอยสัมผัสนี้อาจจะไม่สมบูรณ์เพียงพอ ดังนั้นกระบวนการอัลลอยจะช่วยให้อรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียม และซิลิคอนเป็นรอยต่อที่สมบูรณ์ การอัลลอยจะทำในเตาแพร่สาร อุณหภูมิตั้งแต่ 450-550 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยใช้เวลาประมาณ 60 นาที ถ้าในขณะที่อัลลอยปล่อยแก๊สซึ่งมีไฮโดรเจนรวมอยู่เข้าไปด้วย เรียกว่า การซินเตอร์ริง เพื่อช่วยให้คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติที่ดี และไม่เปลี่ยนแปลงง่ายต่อสภาพแวดล้อม

3.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

การสร้างซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซานี้ เพื่อศึกษาเพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_r), ค่าแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้า (V_F), ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (V_R), ค่าแรงดันพังทลาย (V_B), ค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R), ค่ากระแสอิ่มตัว (I_0) และค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทาน (R) จากรูปที่ 3.16 แสดงแผนภาพไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานตั้งแต่กระบวนการสร้างไปจนถึงกระบวนการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง



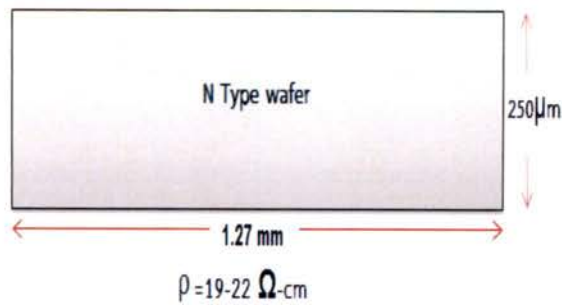
รูปที่ 3.16 แผนภาพไดอะแกรมการดำเนินงาน

กระบวนการสร้างซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมฆา ประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 6 กระบวนการ คือ กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process), กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process), กระบวนการการกัด (Etching Process), กระบวนการการแพร่สารเจือ (Diffusion Process), กระบวนการสร้างชั้นโลหะ (Metallization Process) และ กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering process)

3.2.1 กระบวนการเตรียมฐานรองซิลิคอน

ไดโอดชนิดซิลิคอนพินที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อเมฆาเริ่มต้นจากแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นสภาพความต้านทาน (ρ) $19-22 \Omega\text{-cm}$ ความหนาประมาณ $250 \mu\text{m}$ ซึ่งเมฆาไดโอดแต่ละตัวจะมีพื้นที่ประสิทธิผลของไดโอดคือ $1.27 \times 1.27 \text{ mm}^2$ แสดงเป็นภาคตัดขวางได้ดังรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ภาพภาคตัดขวางแสดงชิ้นงานเริ่มต้น

ก่อนเริ่มกระบวนการสร้างเมฆาไดโอด จะต้องทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก ผุ่นละออง เศษโลหะ และคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวหน้าของซิลิคอน จากนั้นจึงเริ่มทำการสร้างตัวอุปกรณ์โดยแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

3.2.2 กระบวนการแพร่สารเจือเพื่อสร้างชั้น N^+ และชั้น P^+

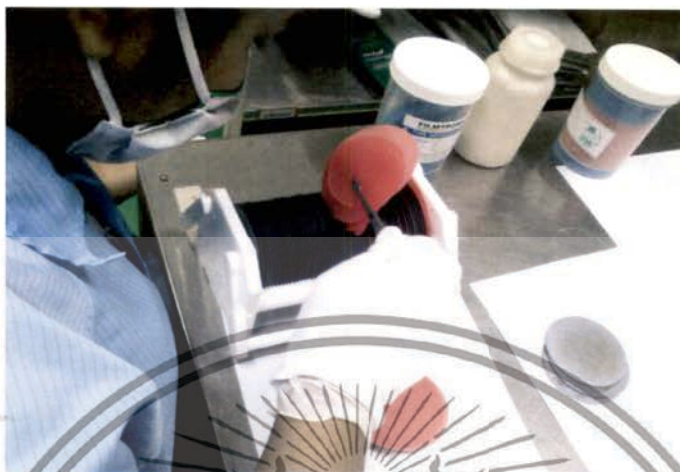
เมื่อเราทำความสะอาดฐานรองซิลิคอนเสร็จแล้วเราก็นำชิ้นงานมาทำการแพร่สารเจือ โดยใช้แผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) เพื่อสร้างชั้น P^+ และใช้แผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus) เพื่อสร้างชั้น N^+ โดยเราจะทำการแพร่ทั้งชั้น P^+ และ ชั้น N^+ ในเวลาเดียวกัน ทำการแพร่ที่อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P^+) และเอ็น (N^+) ที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือสูงมาก ดังภาพภาคตัดขวางรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ภาพภาคตัดขวางแสดงชิ้นงานเมื่อทำการแพร่สารเจือ Boron และ Phosphorus เพื่อ

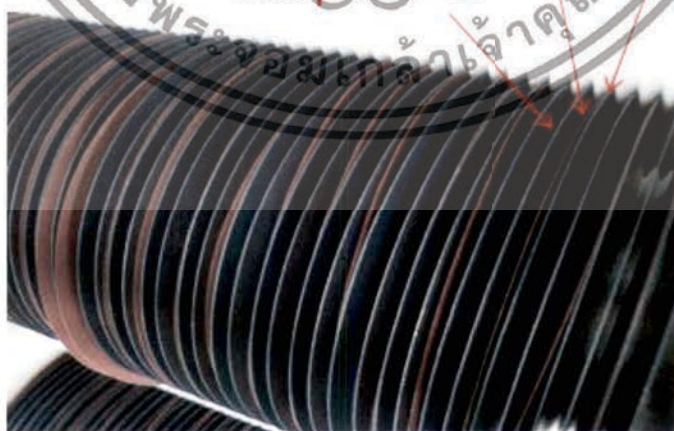
เอกสารนี้เป็นเอกสารสร้างชิ้นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการจัดเรียงการวางแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) และแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus) มีการจัดเรียงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การจัดเรียงแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) และแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus)

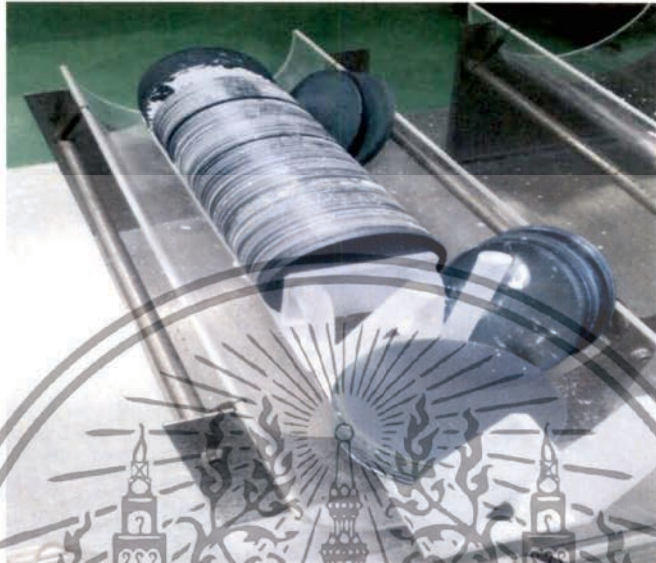
การจัดเรียงก่อนเข้าสู่กระบวนการแพร่สารเจือ เราจะนำแผ่นซิลิคอนวงก่อน จากนั้นจึงนำแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) และแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus) วางปิดด้านหน้าและหลังของแผ่นซิลิคอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ลักษณะการจัดเรียงแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) และแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus) เรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจัดเรียงแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) และแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus) กับฐานรองซิลิคอน เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะนำมาวางบนโบ๊ท (Boat) ที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ลักษณะโบ๊ทที่ใช้วางแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือโบรอน (Boron) และแผ่นจ่ายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus)

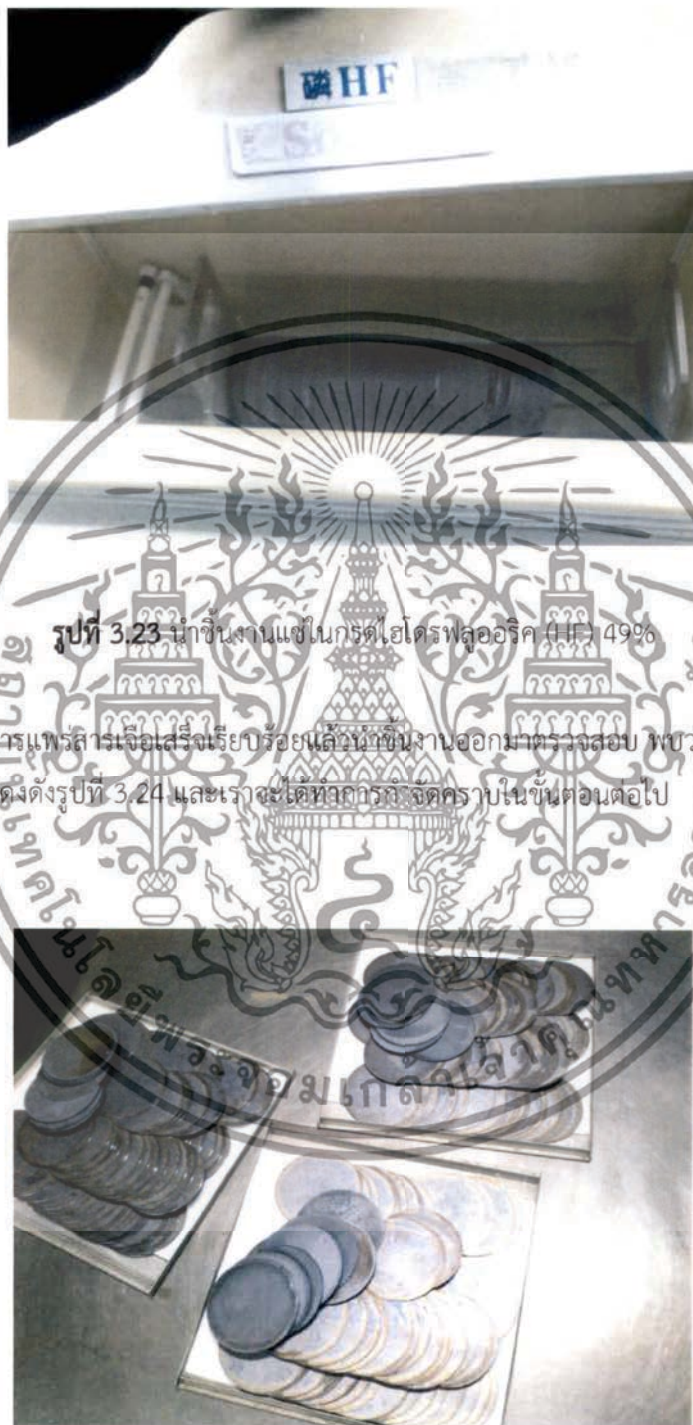
และเมื่อเข้าสู่กระบวนการแพร่สารเจือ เรียบร้อยแล้วก็นำชิ้นงานทั้งหมดออกมา ลักษณะชิ้นงานเมื่อทำการแพร่สารเจือเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ชิ้นงานที่ทำการแพร่สารเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำชิ้นงานทั้งหมดไปแช่กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 49% แล้วทำการล้าง ด้วยน้ำปอดประจุ (DI) เพื่อเข้าสู่กระบวนการต่อไป



รูปที่ 3.23 นำชิ้นงานแช่ในกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 49%

ในขณะที่เราทำการแพร่สารเจือสีเรียงเรียบร้อยแล้วนำชิ้นงานออกมาตรวจสอบ พบว่ามีบางแผ่นที่เกิดคราบสกปรก แสดงดังรูปที่ 3.24 และเราจะได้ทำการกำจัดคราบในขั้นตอนต่อไป

รูปที่ 3.24 แผ่นซิลิคอนเกิดคราบสิ่งสกปรกหลังจากทำการแพร่สารเจือ

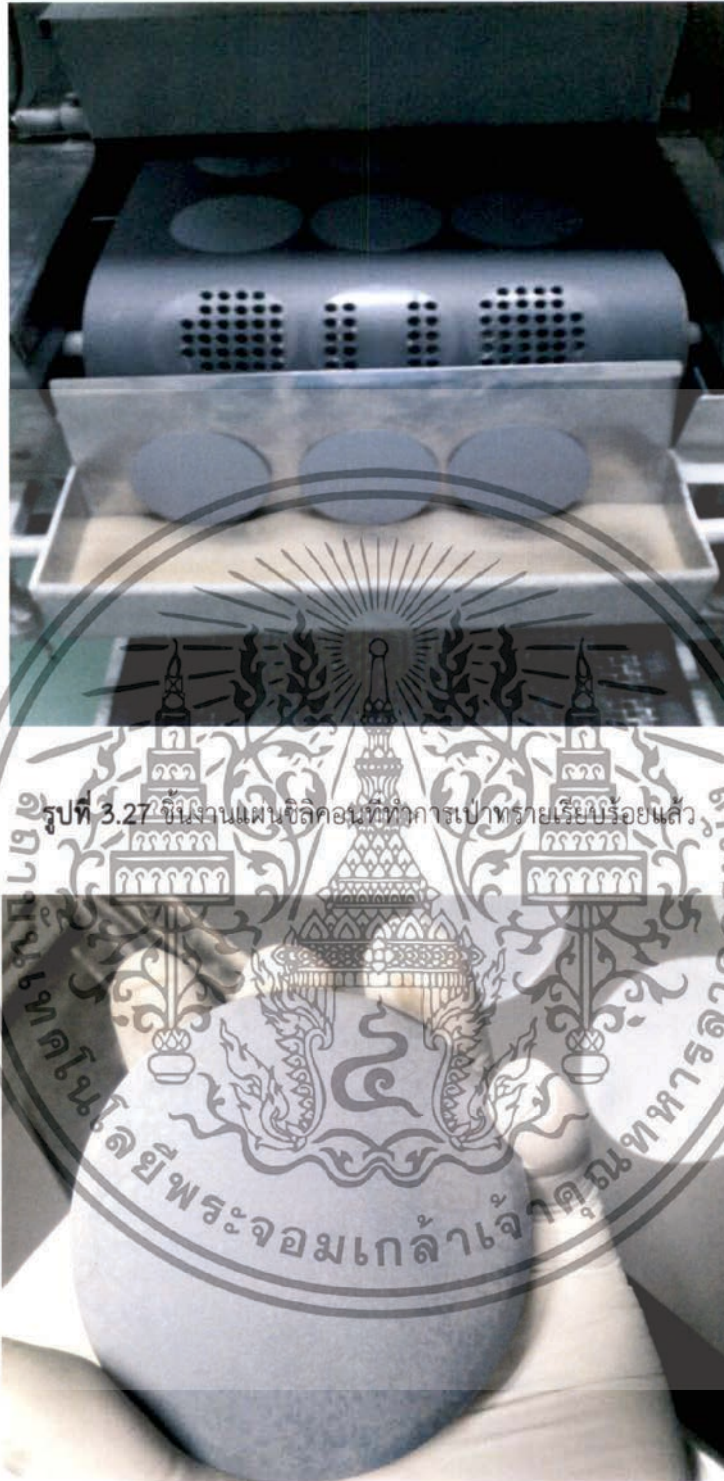
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นก็นำแผ่นชิ้นงานไปทำความสะอาด ขจัดคราบสิ่งสกปรก ด้วยวิธีการเป่าทราย ซึ่งในการเป่าทราย โดยจะทำการขัดด้วยหัวขัดทรายก่อน จะทำให้ความหนาของแผ่นซิลิคอนหายไป 10 μm รูปที่ 3.25แสดงลักษณะการขัดชิ้นงาน และเมื่อเข้าสู่กระบวนการเป่าทรายแสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 เมื่อนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการเป่าทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



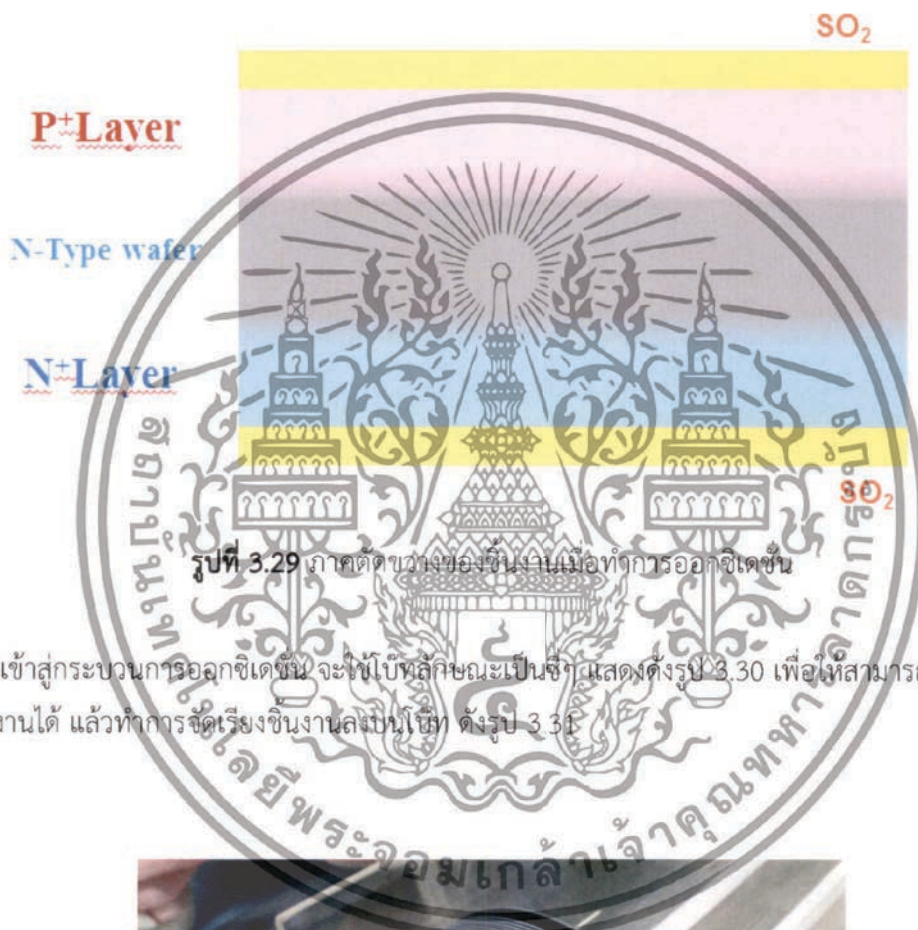
รูปที่ 3.27 ชิ้นงานแผ่นซิลิกอนที่ทำการเป่าทรายเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 3.28 ลักษณะพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ที่เข้าสู่กระบวนการขัดและเป่าทรายทรายเรียบร้อยแล้ว

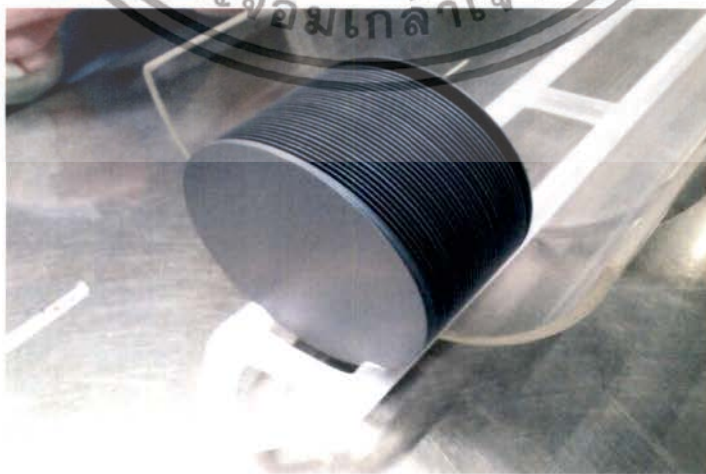
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน

กระบวนการออกซิเดชัน หรือ Oxidation คือ กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ (SO_2) บนพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ เพื่อป้องกันวัสดุที่อยู่ด้านล่างจากการปนเปื้อน (Contamination) และทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างชั้นสาร ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันที่ใช้ในการสร้างซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซანი ใช้กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก (Wet Oxidation) แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานดังรูป 3.29

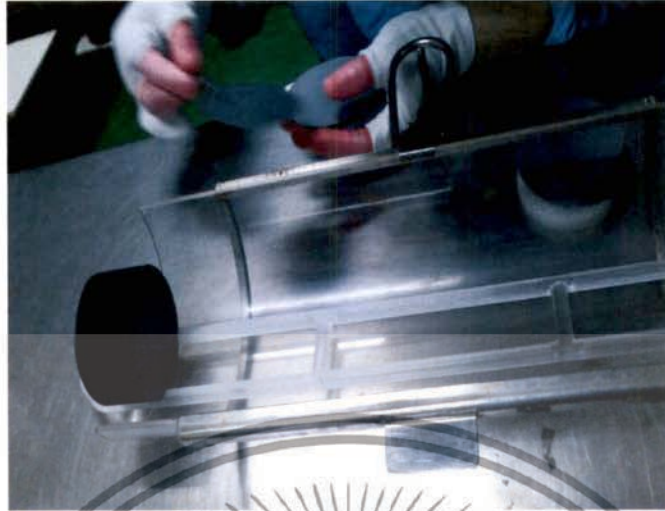


เมื่อเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชัน จะให้ปฏิกิริยาเป็นซ้ำๆ แสดงดังรูป 3.30 เพื่อให้สามารถวางตั้งชิ้นงานได้ แล้วทำการจัดเรียงชิ้นงานลงบนโต๊ะ ดังรูป 3.31



รูปที่ 3.30 ลักษณะโหนดที่ใชวางเมื่อเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 ลักษณะไม้ที่ใช้วางเมื่อเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชัน

เมื่อทำการจัดเรียงแผ่นเวเฟอร์ลงบนไม้เรียบร้อยแล้ว จากนั้นก็นำชิ้นงานที่จัดเรียงทั้งหมดเข้าเตาที่มีอุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เพื่อทำการออกซิเดชัน ดังแสดงในรูป ที่ 3.32

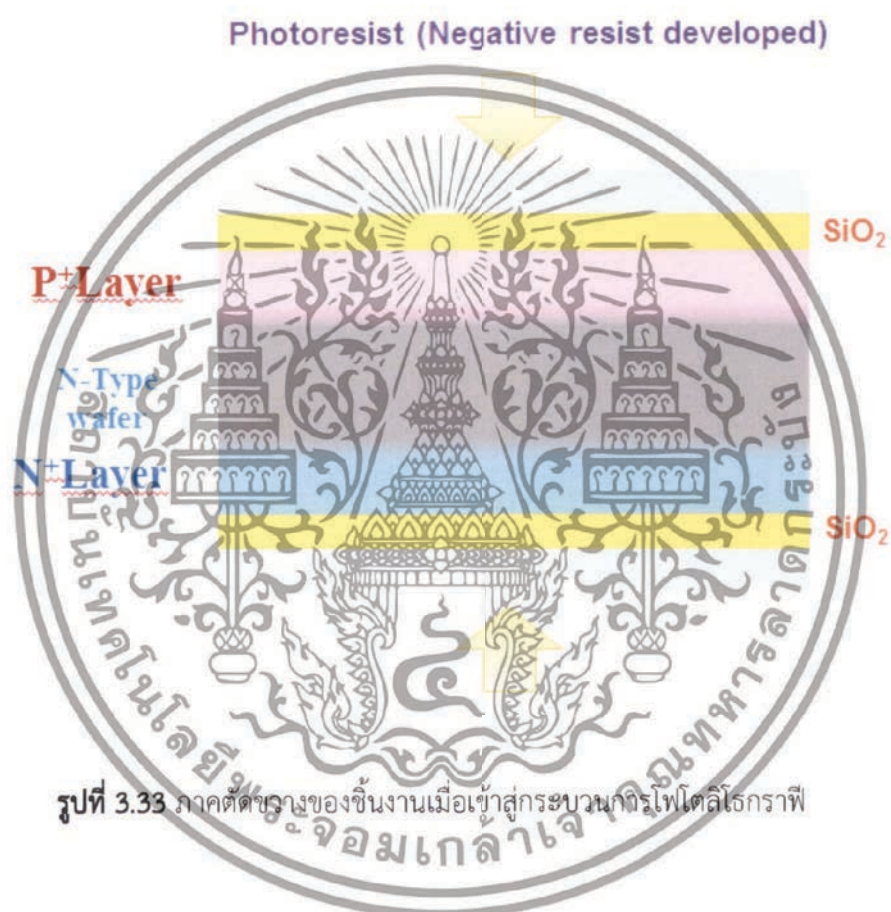


รูปที่ 3.32 เตาที่ทำกระบวนการออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากการเคลือบสารไวแสง (Photoresist) ลงบนชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ทั่วทั้งแผ่น โดยใช้วิธีการในการปล่อยน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งน้ำยาไวแสงที่เราใช้ในกระบวนการสร้างซิลิกอนพินไดโอดโครงสร้างแบบเมซานี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative resist developed) จากนั้นทำการหมุนแผ่นเวเฟอร์เพื่อเกลี่ยให้น้ำยาไวแสงคลุมพื้นที่ทั่วแผ่น แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานดังในรูปที่ 3.33



จากรูปที่ 3.34 แสดงชิ้นงานเมื่อทำการสปิน (Spin Coating) สารไวแสงหรือน้ำยาไวแสงนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีถ้าถูกแสง นำแผ่นที่เคลือบสารไวแสงไปอบ (Cure) ในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 100 °C ดังรูปที่ 3.35 เพื่อให้ทำให้น้ำยาไวแสงยึดติดกับผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น จะได้แผ่นเวเฟอร์ที่มีชั้นของสารไวแสงเคลือบอยู่ หลังจากนั้นจะนำไปฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตผ่านโฟโตมาสก์ (Photo Mask) ไปตกกระทบบนแผ่นเวเฟอร์เพื่อให้เกิดรูปแบบที่ต้องการบนแผ่นเวเฟอร์นี้ การฉายแสงจะแสดงดังรูปที่ 3.36 โดยมีแผ่นมาสก์ (mask) ดังรูปที่ 3.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

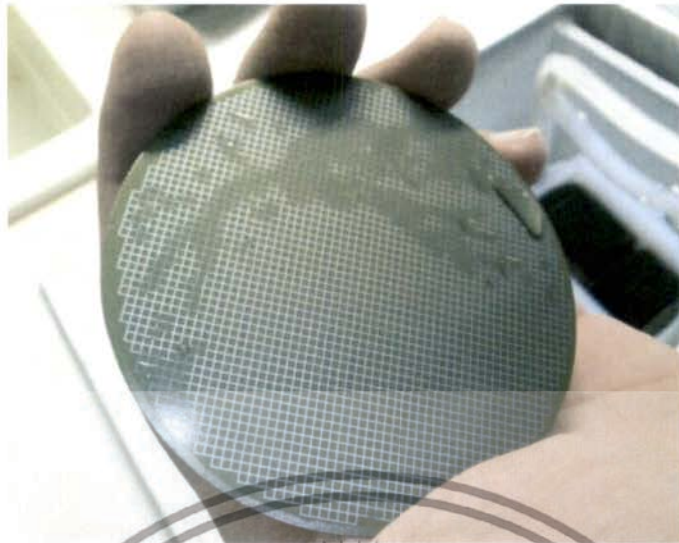


รูปที่ 3.34 แสดงการวางชิ้นงานเพื่อทำการสปิน (Spin Coating)



รูปที่ 3.35 แผ่นที่เคลือบสารไวแสงไปอบ (Cure) ในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

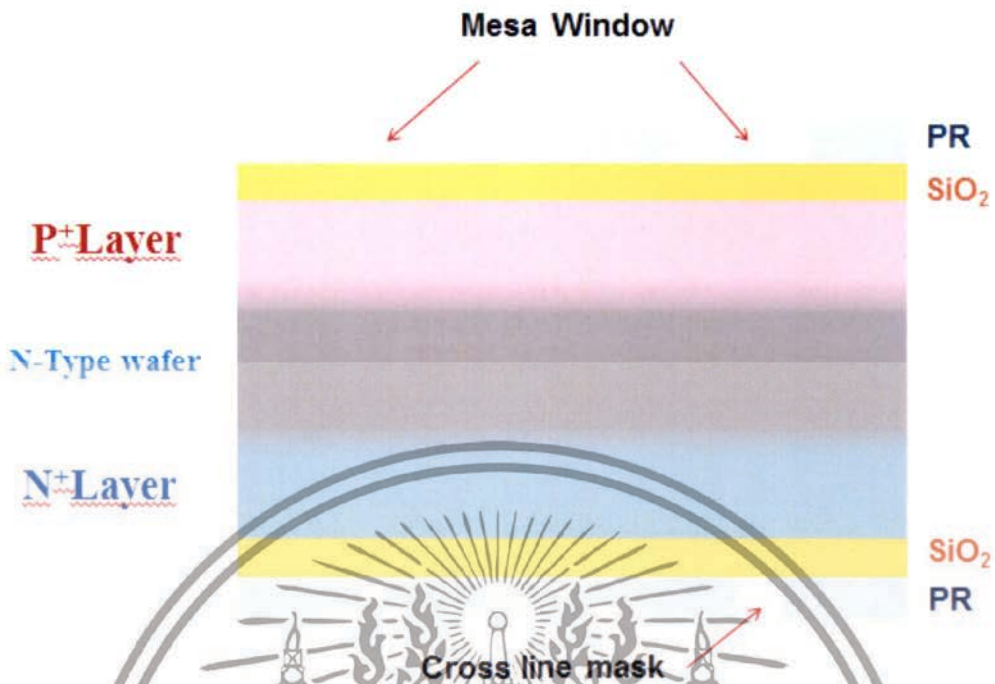


รูปที่ 3.36 แผ่นมาสค์ (mask)



รูปที่ 3.37 เครื่องที่ใช้ในการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 ภาคตัดขวางของชิ้นงานเมื่อเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

3.2.5 กระบวนการกัด (Etching) เพื่อสร้างเป็นไดโอดโครงสร้างแบบเมซา

เมื่อทำการฉายแสงแล้วจากนั้นเราจะนำแผ่นเวเฟอร์นี้ไปกัดในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) แบบเจือจาง ที่เรียกกันว่า BOE (buffer of etching) ใช้ในการกัดออกไซด์ที่ไม่หนา เพื่อที่จะกัดในร่องนั้นก่อน แล้วยกขึ้นมาล้างด้วยน้ำปอดประจุ (DI) แล้วไปจุ่มในบ่อ ซึ่งมีส่วนผสมของ HFNO_3 $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ เป็นเวลา 800-900 วินาที ได้ความลึก ประมาณ $140 \mu\text{m}$ วิธีการวัดความลึก เราจะวัดดู 2 ตำแหน่งคือ วัดในร่องและวัดบนผิวเวเฟอร์ จะแสดงดังรูปที่ 3.39 และจอแสดงระดับความลึกแสดงดังรูป 3.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.39 วิธีการวัดความลึกของแผ่นเวเฟอร์



รูปที่ 3.40 จอแสดงผลระดับความลึกของเวเฟอร์

พอได้ลวดลายเสร็จแล้วก็นำไปทำการกัดที่อุณหภูมิ -8 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 900 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.41 จากนั้นจะใช้เตาเผาในการลอกน้ำยาไวแสง ทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถทำปริมาณมากได้ และไม่เปลืองน้ำยา และในขั้นตอนนี้จะได้โครงสร้างแบบเมซ่าออกมา ดังแสดงในภาคตัดขวางรูปที่ 3.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.41 แผ่นเวเฟอร์ที่จมในบ่อ ซึ่งมีส่วนผสมของ HFNO_3 $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$



รูปที่ 3.42 ภาคตัดขวางเมื่อเข้าสู่กระบวนการกัด (Etching) ให้เป็นโครงสร้างเมซ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.43 เตาที่ใช้แผ่นเวเฟอร์ ทำการลอกน้ำยาไวแสง

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการมาแล้วจะได้ชิ้นงานออกมาดังรูปที่ 3.43 มีออกไซด์คลุมอยู่ เราจึงต้องนำไปทำความสะอาด ด้วยกระบวนการ SC1/SC2

- เริ่มต้นโดยการล้างด้วยน้ำ DI โดยเติมสารละลาย BOE (Buffer of etching) จะทำให้ออกไซด์หายหมดไปเฉพาะในร่อง

- จากนั้นก็ทำการล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)

- ต่อมาจะเติมสารผสม HFNO_3 $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2$ ในสัดส่วนที่ไม่เข้มข้นเท่าขั้นตอมักัดเพื่อทำให้เป็นโครงสร้างเมฆา

- จากนั้นก็ทำการล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)

- ลงสารแอควารีเจีย (aqua regia) เพื่อกำจัดเศษโลหะต่างๆ

- จากนั้นก็ทำการล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)

- ล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

- จากนั้นก็ทำการล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)

- กัดในแอมโมเนียแอมโมเนียมไดออกไซด์ (NH_4OH) + H_2O_2 เพื่อกำจัดประจุอิสระ ทั้งประจุบวกและประจุลบ เพราะถ้ามีประจุจะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในร่อง

- เสร็จแล้วก็รีบนำเข้าสู่กระบวนการ LPCVD ให้เร็วที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้มีสิ่งสกปรกเกาะติดชิ้นงานและป้องกันการเกิดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



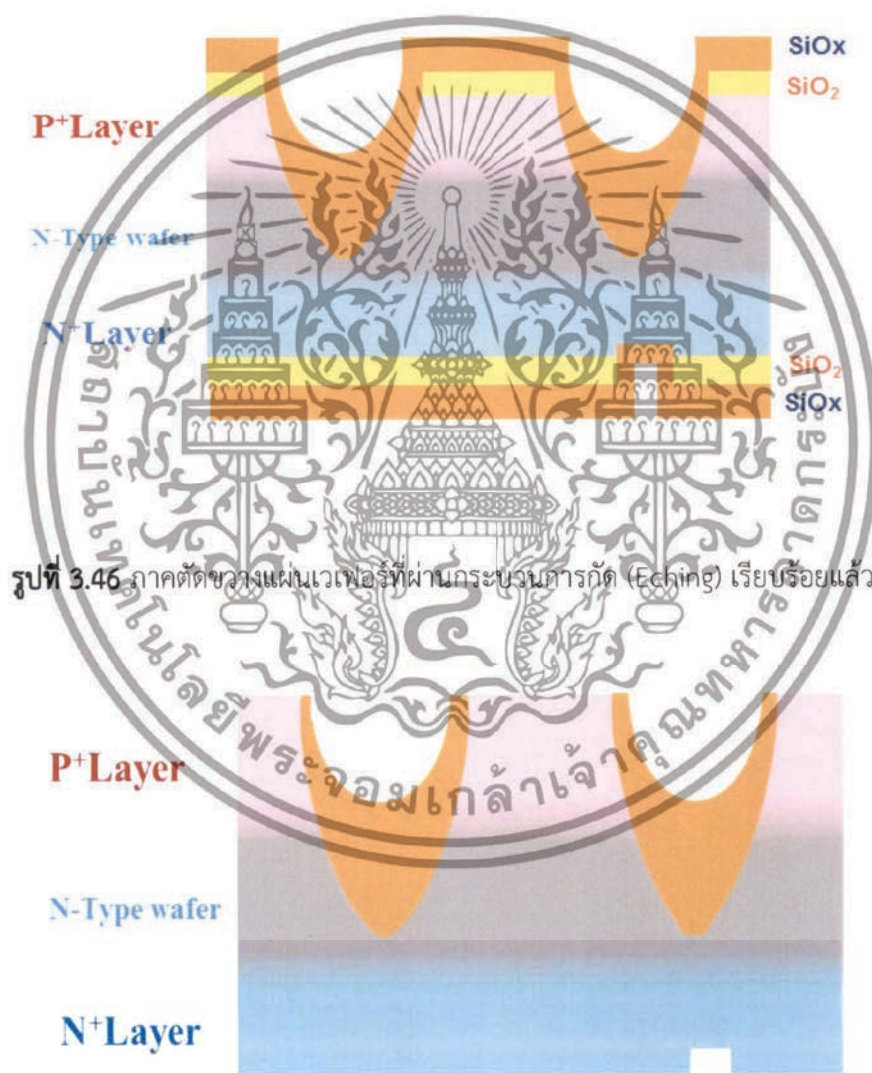
รูปที่ 3.44 ลักษณะอ่างที่ทำการแช่สารละลาย BOE (Buffer of etching)

รูปที่ 3.45 แผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการกัด (Etching) เรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 กระบวนการสร้างชั้นฉนวน

เราจะทำการสร้างชั้นฉนวน SiO_x (เป็นโครงสร้างของซิลิคอน ที่มีอะตอมของออกซิเจนปะปนอยู่) ด้วยกระบวนการ LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) เพื่อป้องกันไม่ให้ รอยต่อ พี-เอ็น เปื้อนสู่อากาศ รูปภาคตัดขวางแผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการกัด (Eching) เรียบร้อยแล้ว แสดงดังรูปที่ 3.46 แล้วจะทำการกัดฉนวนที่ไม่ต้องการออก เพื่อจะเข้าสู่กระบวนการสร้างชั้นโลหะต่อไป แสดงรูปภาคตัดขวางของแผ่นเวเฟอร์เมื่อกัดฉนวนที่ไม่ต้องการออกเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.46 ภาคตัดขวางแผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการกัด (Eching) เรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 3.47 ภาคตัดขวางของแผ่นเวเฟอร์เมื่อกัดฉนวนที่ไม่ต้องการออกเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 กระบวนการสร้างชั้นโลหะ

เราจะทำการสร้างมาร์กคอนแทค (Contact Mark) เพื่อทำการเปิดฉนวนออก โดยเราจะทำไปการเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบ จากนั้นก็ทำการส่องไตกลิ้ง และฉายแสง รูปที่ 3.48 เมื่อเรานำชิ้นงานไปส่องไตกลิ้ง ก่อนทำการฉายแสง จากนั้นก็จะทำการสร้างชั้นโลหะ

- โดยใช้น้ำยาประสานทอง ผสมกับ กรดไฮโดรคลอริก (HF) เพื่อให้กัดบริเวณผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์บางๆก่อน

- เติมนิเกิล (Ni) ลงไปด้วยเพื่อให้ผิวหน้าแผ่นของเวเฟอร์พร้อมทำปฏิกิริยากับนิเกิล (Ni)

- เราจะใช้สารละลายนิเกิล (Ni) ในการเทรด เข้าเตา 400 องศาเซลเซียส เพื่อทำการแพร่สารละลาย ให้ซึมลงไปบนแผ่นเวเฟอร์ของเราอีก 5 μm จากนั้นทำการกัดส่วนด้านบนออกไป และทำซ้ำอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้สารละลายนิเกิลซึมลึกลงไปอีก

- ซุปทอง (Au) เพื่อความคงทน และบัดกรีง่ายผสมเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างชั้นโลหะ แสดงรูปภาพตัดขวางดังรูปที่ 3.49



รูปที่ 3.48 การส่องกลิ้งก่อนทำการเคลือบน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.49 รูปภาคตัดขวางชิ้นงานที่ทำการสร้างชั้นโลหะเรียบร้อยแล้ว

เมื่อทำการสร้างชั้นโลหะเสร็จเรียบร้อยแล้วเราจะทำการตัดแผ่นเวเฟอร์ โดยการตัดนั้นเราจะทำการตัดจากด้านหลัง การตัดนั้นจะใช้การตัดแบบ Half Cut คือการตัดแบบไม่ขาด เพราะถ้าตัดขาดมันจะสับและแตกเกิดความเสียหายได้ง่าย เมื่อทำการตัดเรียบร้อยแล้วเราก็จะนำไปเก็บบรรจุไว้ก่อนประกอบตัวถัง การบรรจุจะดังแสดงในรูปที่ 3.50 และเมื่อทำการประกอบตัวถังเป็นไดโอดสมบูรณ์แล้วจะแสดงดังรูปที่ 3.51



รูปที่ 3.50 การเก็บบรรจุชิ้นงานก่อนนำไปประกอบตัวถัง (Packaging)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.51 ซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่าที่ประกอบตัวถึงสมบูรณ์แล้ว

3.2.8 กระบวนการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

นำตัวอุปกรณ์ที่เราสร้างเสร็จมาทำการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์โดยจะทำการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า โดยตัวอุปกรณ์นั้นยังไม่ได้ทำการแพ็คเกจ (Packaging) มาทำการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์พลังงานสูง (E-beam) ของศูนย์การฉายรังสีอัญมณีแห่งใหม่ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานดังรูปที่ 3.52 และรูปที่ 3.53 จะแสดงลำดับรูปชิ้นงานเพื่อเข้าสู่ระบบลำเรียงไปทอดฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.52 ภาคตัดขวางของชิ้นงานเมื่อนำไปฉายรังสี

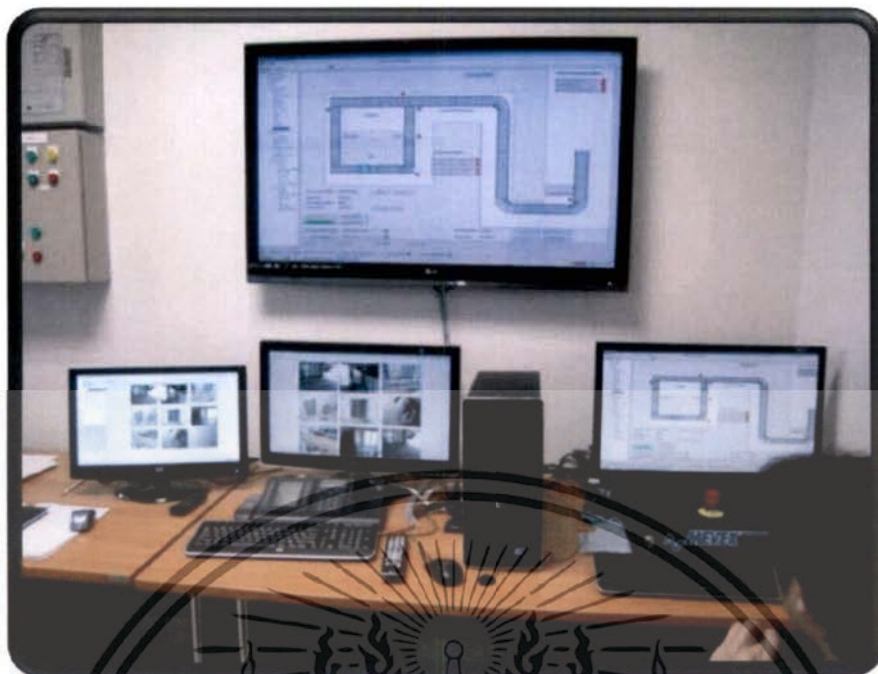
การฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์กระทำที่พลังงาน 12 MeV ที่ปริมาณรังสี เจือปน 7 คือ 50, 75, 100, 150, 200, 250 และ 300 KGy ตามลำดับ โดยเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์พลังงานสูงจะทำงานร่วมกับเครื่องจักรต่างๆรวมเป็นระบบจักรกลฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ ทำการขับเคลื่อนภาคบรรจุเอกสารไปยังอานฉายรังสีกำลังที่พร้อมเป็นระบบจักรกลฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ ทำการขับเคลื่อนภาคบรรจุไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงาน ด้วยระบบแรงดันสูงผ่านกระบอกสุบลม ควบคุมทิศทางด้วยวาล์วไฟฟ้า ซึ่งมีการตรวจสอบ การเคลื่อนที่ของกระบอกสูบด้วยสวิทซ์ไฟฟ้า และมีอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณต่างๆ และระดับความ แรงของรังสีในจุดต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดถูกควบคุมผ่าน PLC หรือ Programmable Logic ซึ่งจะมี การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานทั้งหมดไว้แล้วผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์สั่งการ ดังแสดงในรูป 3.54 และ 3.55



รูปที่ 3.53 ลักษณะของภาคบรรจุชิ้นงาน และระบบลำเลียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งจะผิดลิขสิทธิ์ของเจ้าของลิขสิทธิ์หากนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.55 ห้องควบคุมระบบเครื่องฉายรังสีด้วยโปรแกรมการส่งอัตโนมัติ

สำหรับชิ้นงานทศสองที่นำมาฉายรังสีครั้งแรก จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำมาทำการ Dose mapping เพื่อหาตำแหน่งที่ได้รับปริมาณรังสีต่ำสุด (Minimum Dose) ของชิ้นงานทศสองนั้นๆ ก่อนทำการทำ Dose mapping ใช้เครื่องวัดปริมาณรังสีแบบแผ่นฟิล์ม การตอบสนองของแผ่นฟิล์มเซลลูลอสไตรอะซีเตต (Cellulose Triacetate) ต่อรังสีอิเล็กตรอนได้ในช่วงปริมาณ <math>< 1.0</math> to 150 kGy โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่องยิวิลิสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) รุ่น Genesys 20



รูปที่ 3.56 Spectrophotometer รุ่น Genesys 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการฉายรังสีแผ่นฟิล์มจะมีการตอบสนองต่อรังสีอิเล็กทรอนิกส์ โดยสีของแผ่นฟิล์มจะเปลี่ยนจากสีชมพูเข้ม เป็นสีชมพูอ่อน รูปที่ 3.57 จะแสดงแผ่นฟิล์มสำหรับวัดปริมาณรังสี พร้อมแถบบาร์โค้ดเพื่อบันทึกข้อมูล

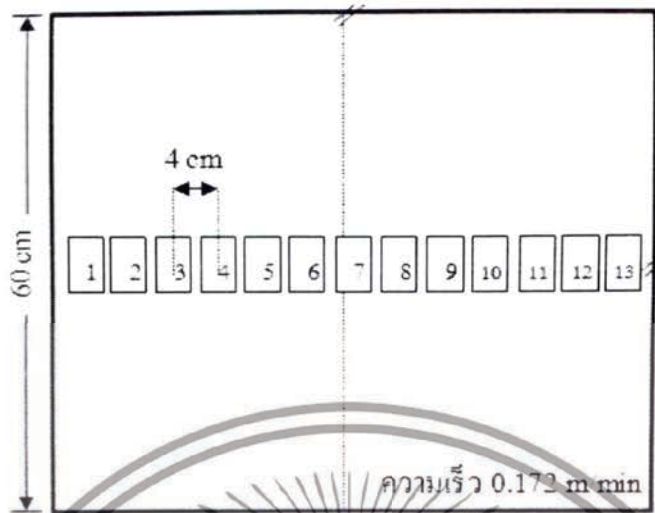


รูปที่ 3.57 แผ่นฟิล์มสำหรับวัดปริมาณรังสี พร้อมแถบบาร์โค้ดเพื่อบันทึกข้อมูล

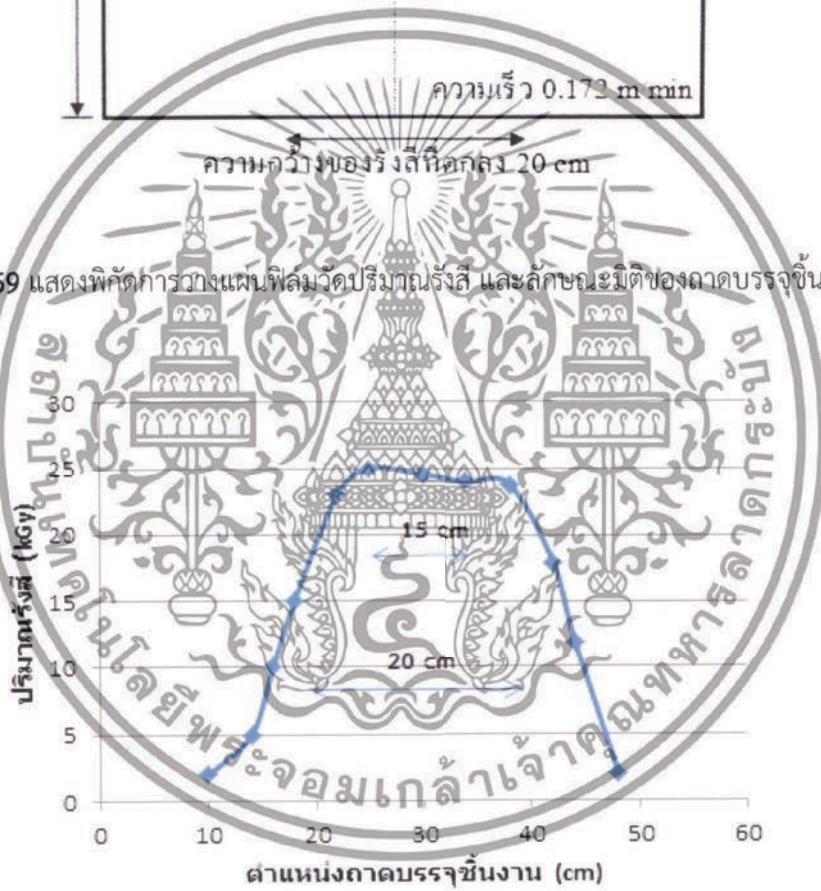
รูปที่ 3.58 การติดตั้งแผ่นฟิล์มสำหรับวัดปริมาณรังสี

หลังจากทำการวัดปริมาณรังสีแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการทำ Dose mapping เพื่อหาตำแหน่งที่ได้รับปริมาณรังสีสูงสุด ตำแหน่งที่ได้รับปริมาณรังสีต่ำสุด ลักษณะ Profile ความสม่ำเสมอของปริมาณรังสีอิเล็กทรอนิกส์ในภาคบรรจุชิ้นงาน โดยการนำแผ่นฟิล์มวัดปริมาณรังสีจำนวน 13 ชั้น ติดลงในบริเวณกึ่งกลางของภาคบรรจุชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือที่สงวนเพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.59 แสดงทิศทางการวางแผ่นฟิล์มวัดปริมาณรังสี และลักษณะมิติของถาดบรรจุชิ้นงาน



รูปที่ 3.60 ลักษณะ Profile ปริมาณรังสีในถาดบรรจุชิ้นงานหลังฉายรังสีด้วยพลังงาน 12 MeV

เมื่อทราบถึงลักษณะ Profile ปริมาณรังสีแล้ว ซึ่งพบว่าบริเวณที่มีความสม่ำเสมอของรังสีอยู่ในช่วง 15 เซนติเมตร ตรงกลางของถาดบรรจุชิ้นงาน ดังนั้นในการทดลองจะใช้บริเวณดังกล่าวสำหรับวางชิ้นงานที่เราต้องการฉายรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลอง

เมื่อเราทำการสร้างซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่าเสร็จแล้ว ก็ได้นำอุปกรณ์ไปทำการฉายรังสีอิเล็กตรอน จากนั้นก็ได้ทำการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆดังนี้

3.3.1 การวัดค่า t_r

ทำการวัดค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ t_r ด้วยเครื่องดิจิตอลมิเตอร์ คือศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้านการตอบสนองการสวิทช์ของซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่าด้วยเครื่อง TVR 6000



รูปที่ 3.61 ลักษณะการวัดขึ้นงานเพื่อทำการวัดค่า t_r ของเครื่อง TVR 6000



รูปที่ 3.62 ลักษณะการหัววัดขึ้นงานเพื่อทำการวัดค่า t_r ของแผ่นเวเฟอร์ ด้วยเครื่อง TVR 6000 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.63 ลักษณะการจับชิ้นงานเพื่อทำการวัดค่า t_{tr} ของไดโอดที่ประกอบตัวถังแล้ว
ด้วยเครื่อง TVR 6000

3.3.2 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความจุไฟฟ้า

ในเรื่องของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความจุไฟฟ้า ทำการวัดค่าโดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A ที่จัดใช้ Cascade Microtech Model M150 โดยมี ERS Aircool SP72-300 thermo chuck เป็นตัวควบคุมและปรับเปลี่ยนอุณหภูมิฐานรอง ซึ่งผลการทดสอบและการอภิปราย จะกล่าวต่อไป



รูปที่ 3.64 เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.65 หัววัด Cascade Microtech Model M150



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

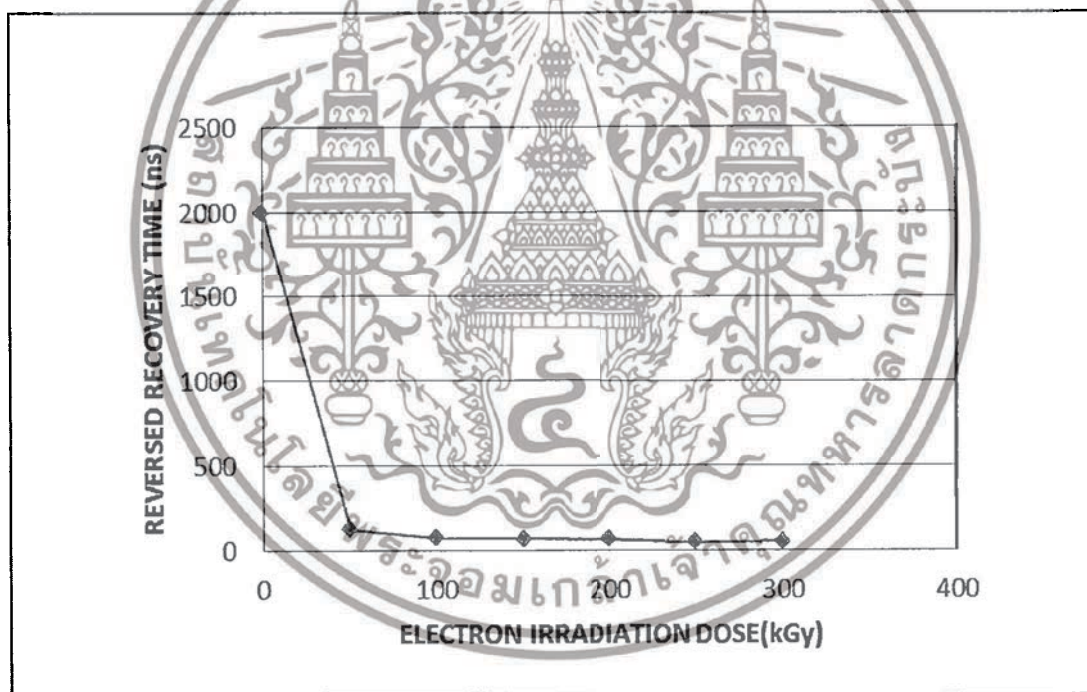
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆของซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า หลังได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน

4.1 คุณลักษณะของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ

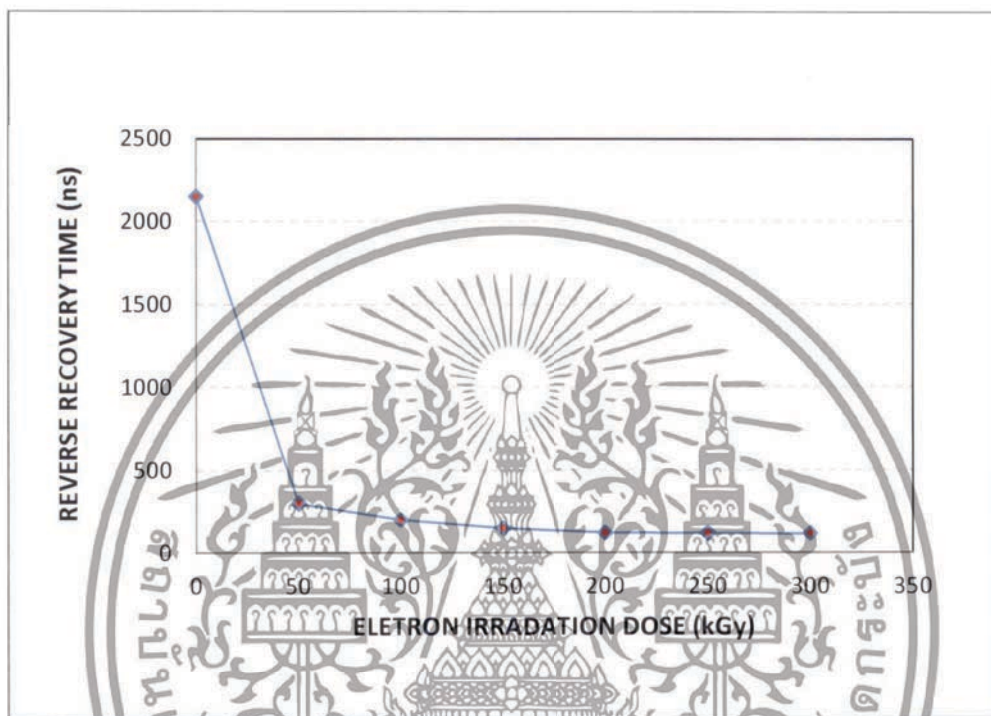
จากการศึกษาผลของซิลิคอนพินไดโอดโครงสร้างแบบเมซ่าเมื่อได้รับการฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 KGy จะส่งผลต่อค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ที่วัดได้จากเครื่อง TVR 6000 ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสี 50 ,100 ,150 ,200 ,250 และ 300 kGy บนแผ่นผลึกซิลิคอน

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสี 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 kGy ของไดโอดบนแผ่นผลึกซิลิคอน พบว่าค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ของอุปกรณ์ลดลงอย่างพหุคูณต่อปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน คือ เมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับจะลดลง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเมื่อเรานำแผ่นซิลิคอนไปเข้ากระบวนการทำการประกอบตัวถังไดโอด แล้วเราจะทำการวัดค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) อีกครั้งหนึ่งแสดงผลการทดลองดังรูป 4.2 ซึ่งเมื่อทำการประกอบตัวถังไดโอด เราจะสังเกตเห็นว่าค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจากที่วัดบนแผ่นผลึกซิลิคอน แต่ยังมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการฉายรังสี

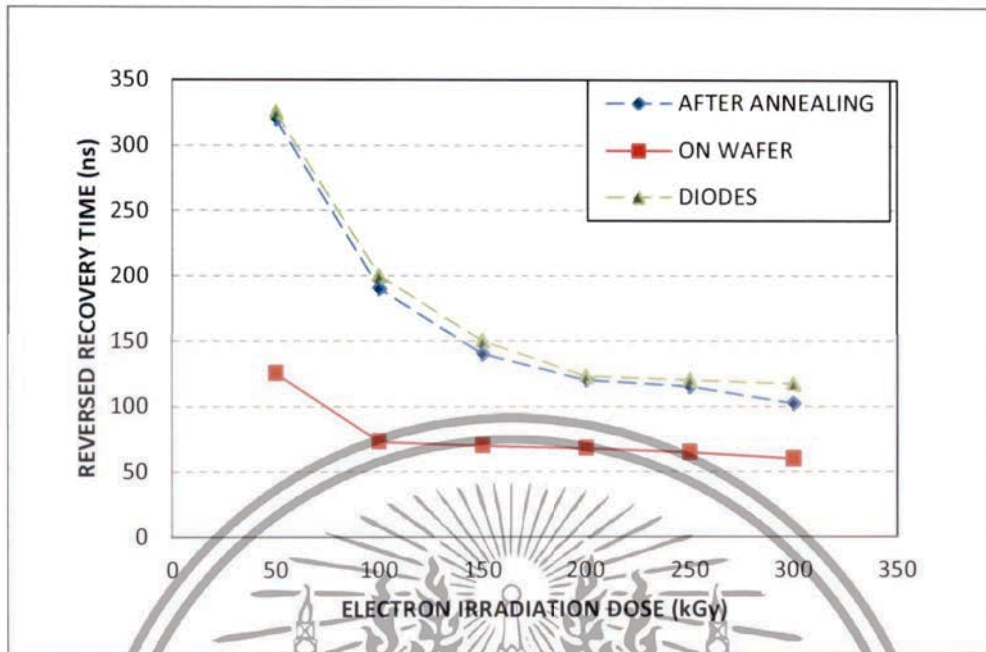


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ที่ปริมาณรังสี 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 kGy ของไดโอดหลังประกอบตัวถัง

หลังจากนั้นเราก็นำไปทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เพื่อให้มั่นใจว่าจุดบกพร่อง (defect) ในอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ในอุณหภูมิสูง เพราะในการใช้งานจริงไดโอดนี้ จะถูกนำไปใช้งานในอุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส จึงมั่นใจได้ว่าจุดบกพร่อง (defect) ที่เกิดขึ้น ไม่เปลี่ยนแปลงแน่นอน ผลของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศา เปรียบเทียบกับ ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ของไดโอดที่ประกอบตัวถังเรียบร้อยแล้ว และค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) บนแผ่นซิลิคอน แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อเราทำการแอนนัลแล้วจะทำให้ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ลดลงจากค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ของไดโอดที่ประกอบตัวถังเรียบร้อยแล้ว เล็กน้อย เนื่องจากการแอนนัลทำให้โครงสร้างอะตอมที่เคยเสียหายเป็นจุดบกพร่อง เกิดการเรียงตัวใหม่ทำให้ ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr})

) ลดลง

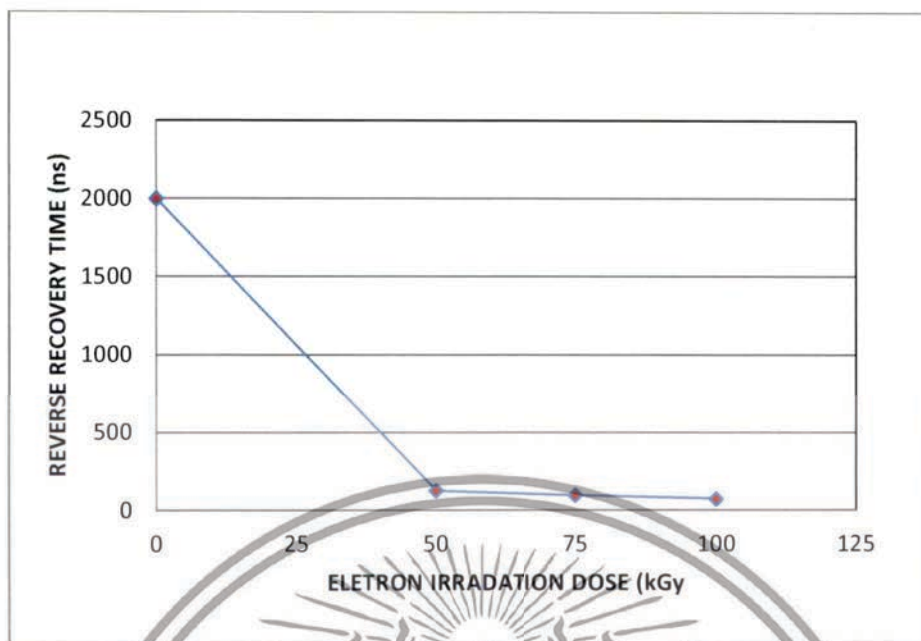
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ที่ปริมาณรังสี 50 ,100 ,150 ,200 ,250 และ 300 kGy ของไดโอดบนแผ่นผลึกซิลิคอน หลังการประกอบตัวถัง และหลังจากการแอนนลิ่ง

จากการทดลองที่ทำการฉายรังสีปริมาณรังสีที่ 50 ,100 ,150 ,200 ,250 และ 300 kGy จะเห็นว่าค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ที่ ฉายรังสีปริมาณ 150 kGy มีการลดลงค่อนข้างน้อยและไม่เป็นนัยสำคัญ เพื่อเป็นการศึกษาค่าแนวโน้มที่ชัดเจนมากขึ้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษา ค่าการยิงลำรังสีอิเล็กตรอนระหว่าง 50 และ 100 kGy ฉายรังสี นั่นคือ ที่ 75 kGy ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ t_r ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 kGy บนแผ่นผลึกซิลิคอน

ซึ่งหลังการฉายรังสีที่ 75 kGy พบว่าค่า t_r ของอุปกรณ์ลดลงอย่างฉับพลันต่อปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่รังสีจะสร้างจุดบกพร่องในโครงสร้างอะตอมของผลึกซิลิคอน และยังรังสีปริมาณมากก็จะมีทำให้เกิดจุดบกพร่องได้มาก จนทำให้ปริมาณศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่า t_r จึงลดลงจากไดโอดกลุ่มที่ไม่ได้ฉายประมาณ 2000 ns ลงมาเหลือที่ประมาณ 125, 97 และ 73 ns ตามลำดับ 50, 75, 100 kGy การฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดอายุพาหะในอุปกรณ์ที่มีพื้นที่ใหญ่ซึ่งการใช้ปริมาณการฉายรังสีมากขึ้น อายุของพาหะจะลดลงเป็นไปตามสมการ 4.1

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + \tau_0 K \phi} \quad (4.1)$$

τ = ค่าอายุพาหะหลังการฉายรังสี

τ_0 = ค่าอายุพาหะก่อนการฉายรังสี

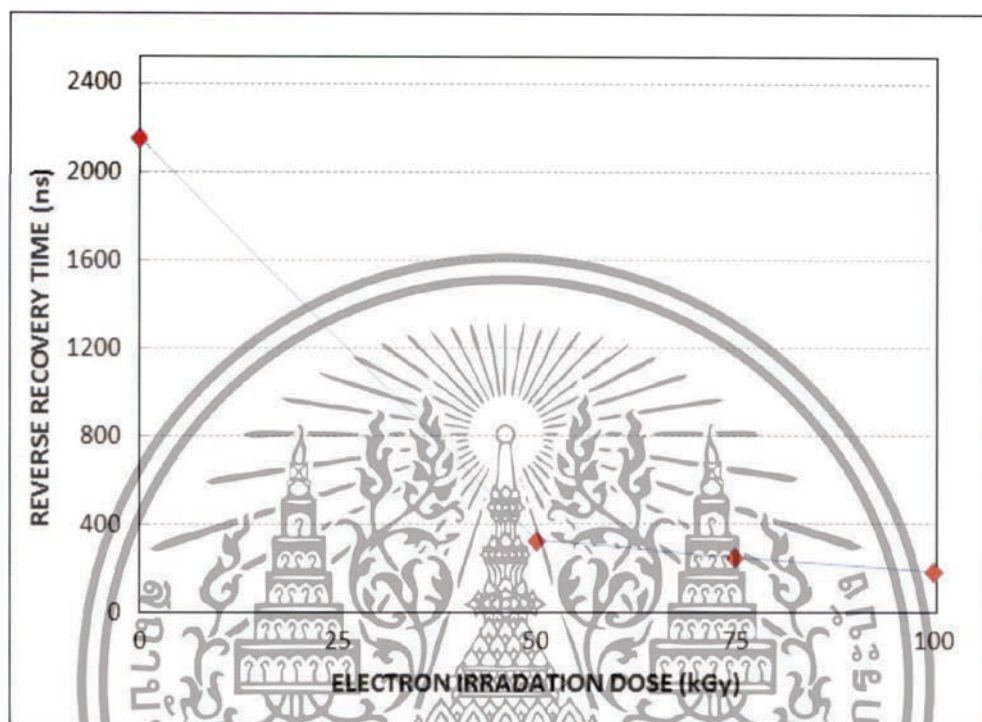
ϕ = ปริมาณรังสี (radiation dose)

K = ค่าตัวแปรสมมติแทนปัจจัยความเสียหาย

จากนั้นเมื่อเรานำแผ่นซิลิคอนไปเข้ากระบวนการทำการประกอบตัวถังไดโอด แล้วเราจะทำการวัดค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_r) อีกครั้งหนึ่งเช่นเดิม แสดงผลการทดลองดังรูป 4.5 ซึ่งเมื่อทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

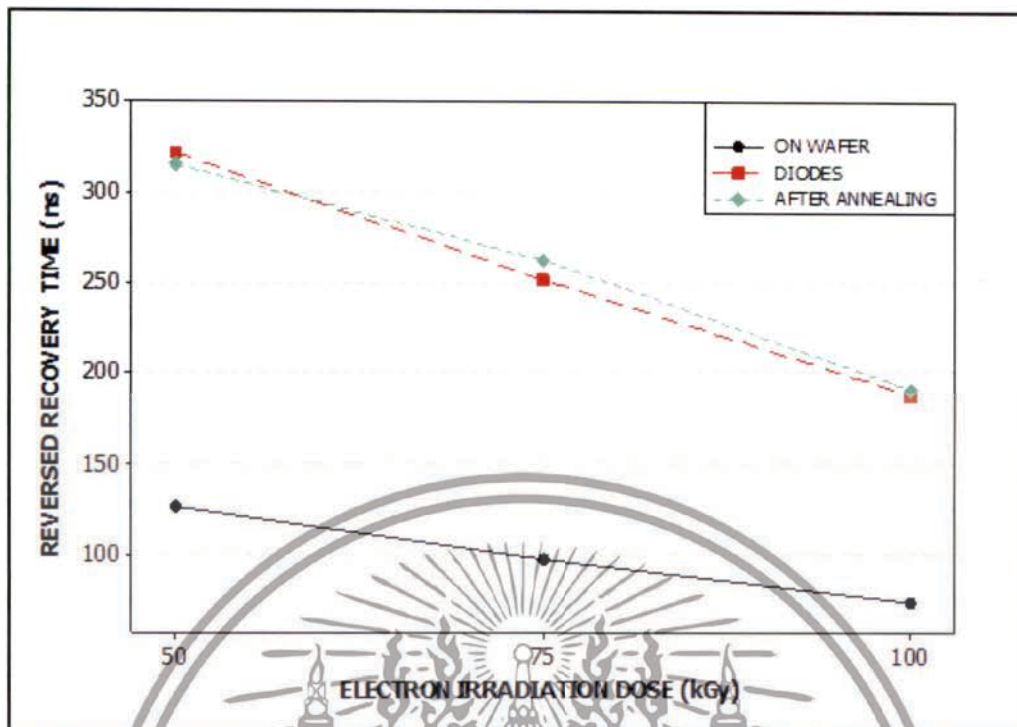
ประกอบตัวถังไดโอด เราจะสังเกตเห็นว่าค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจากที่วัดบนแผ่นผลึกซิลิคอน แต่ยังมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการฉายรังสี



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ t_{rr} ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 kGy ของไดโอดหลังประกอบตัวถัง

การประกอบตัวถังไดโอดจะเป็นการเชื่อมต่อขาโลหะเข้ากับชิป ที่ถูกตัดแบ่ง (dicing) ออกมาจากแผ่นผลึกซิลิคอน จากนั้นจึงทำการปิดทับส่วนที่เป็นชิปและรอยต่อเชื่อมกับขาโลหะด้วยฉนวน (epoxy) กระบวนการ นี้เรียกว่าการ molding ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกทำที่อุณหภูมิสูงราว 180 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าค่า t_{rr} มีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนการประกอบ เป็นอย่างมากซึ่งอาจเป็นผลมาจากความร้อนที่ได้จากกระบวนการประกอบ ตัวถังทำให้โครงสร้างอะตอมที่เสียหายเกิดการเรียงตัวใหม่ (annealing) ทำให้ปริมาณของจุดบกพร่องลดลงดังนั้นค่า t_{rr} จึงเพิ่มขึ้นมาเกือบสองเท่าตัว แต่แนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่า t_{rr} ต่อปริมาณรังสียังคงไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

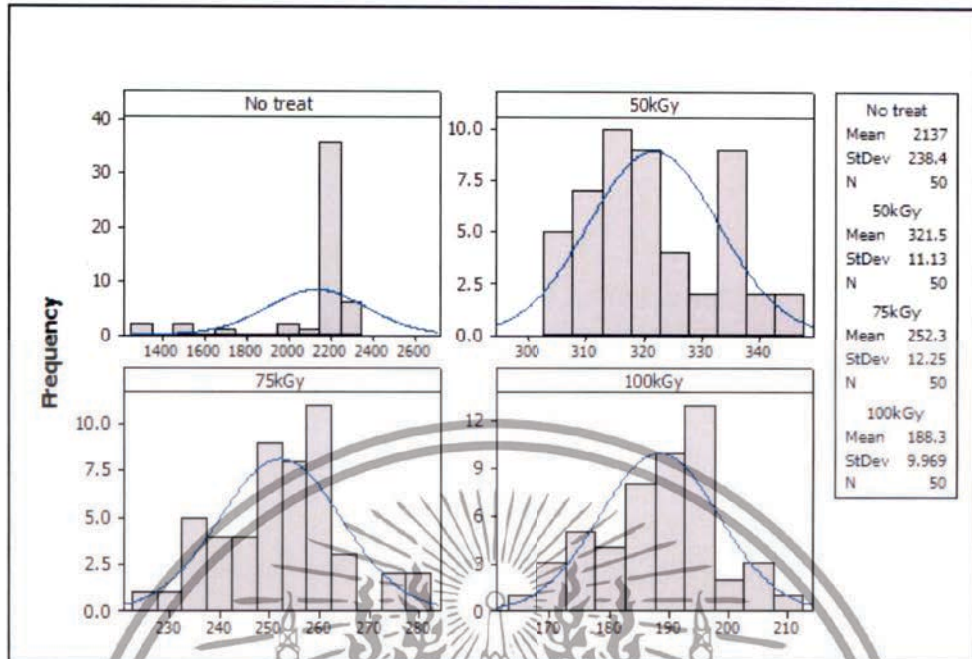


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 kGy ของไดโอดบนแผ่นผลึกซิลิคอน ,หลังการประกอบตัวถัง และหลังจากการแอนนีสล

หลังจากนั้นเราก็นำไปทำการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เพื่อให้มั่นใจว่าจุดบกพร่อง (defect) ในอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในอุณหภูมิสูง เพราะในการใช้งานจริงไดโอดนี้ จะถูกนำไปใช้งานในอุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส จึงมั่นใจได้ว่าจุดบกพร่อง (defect) ที่เกิดขึ้น ไม่เปลี่ยนแปลงแน่นอน ผลของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) เมื่อทำการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 200 องศา เปรียบเทียบกับ ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ของไดโอดที่ประกอบตัวถังเรียบร้อยแล้ว และค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) บนแผ่นซิลิคอน แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่อเราทำการแอนนีสลแล้วจะทำให้ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ลดลงจากค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ของไดโอดที่ประกอบตัวถังเรียบร้อยแล้ว เล็กน้อย เนื่องจากการแอนนีสลทำให้โครงสร้างอะตอมที่เคยเสียหายเป็นจุดบกพร่อง เกิดการเรียงตัวใหม่ทำให้ ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ลดลง

การทำงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการวัดค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ทดสอบกับไดโอดที่ฉายรังสีแต่ละค่าการฉายรังสีจำนวน 50 ตัว แล้วได้นำมาทำการวัดค่าการกระจายตัวของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ของไดโอดที่ประกอบเข้ากับตัวถังหลังการฉายรังสีอิเล็กตรอน แสดงดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



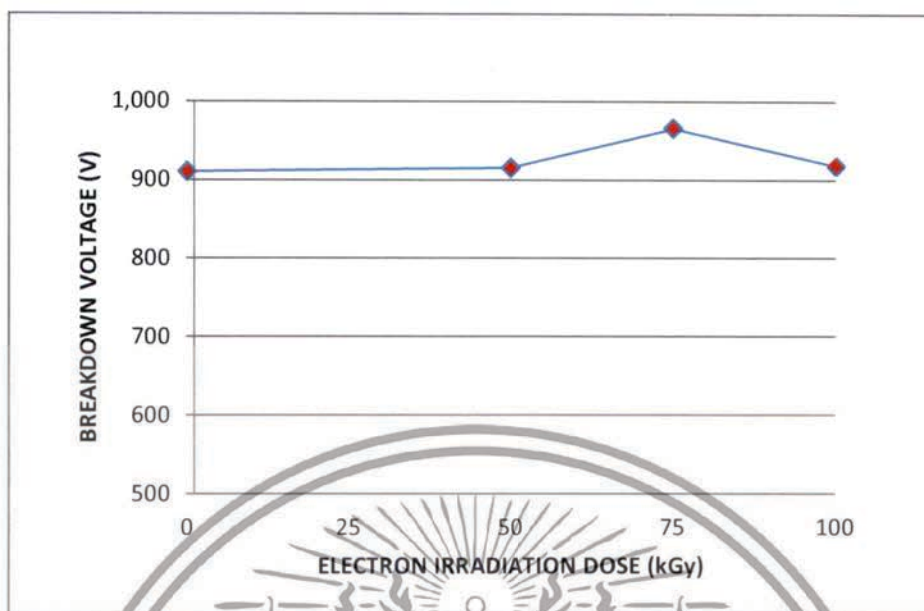
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{τ}) ของไดโอดที่ประกอบเข้ากับตัวถังหลังการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณต่างๆ

ข้อดีของการฉายรังสีอิเล็กตรอนอีกประการสามารถแสดงได้ดัง รูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{τ}) มีอยู่ในช่วงที่แคบ เนื่องจากการ ฉายรังสีจะมีขั้นตอนที่ทำให้รังสีถูกฉายออกมาเป็นลำ ที่มีความเข้มข้นสูง และสม่ำเสมอ และยังการฉายรังสีที่ปริมาณสูงจะทำให้การกระจายตัวของ t_{τ} ลดลง เพราะสาเหตุหลักของการกระจายตัวของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{τ}) เป็นผลมาจากความ ไม่สมบูรณ์เต็มของแผ่นผลึกซิลิคอนซึ่งเป็นไปอย่างสุ่ม ดังนั้นการฉายรังสี ลดค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{τ}) จึงไปชดเชยการกระจายตัวของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{τ}) เนื่องจากความไม่สมบูรณ์เต็ม ของแผ่นผลึก

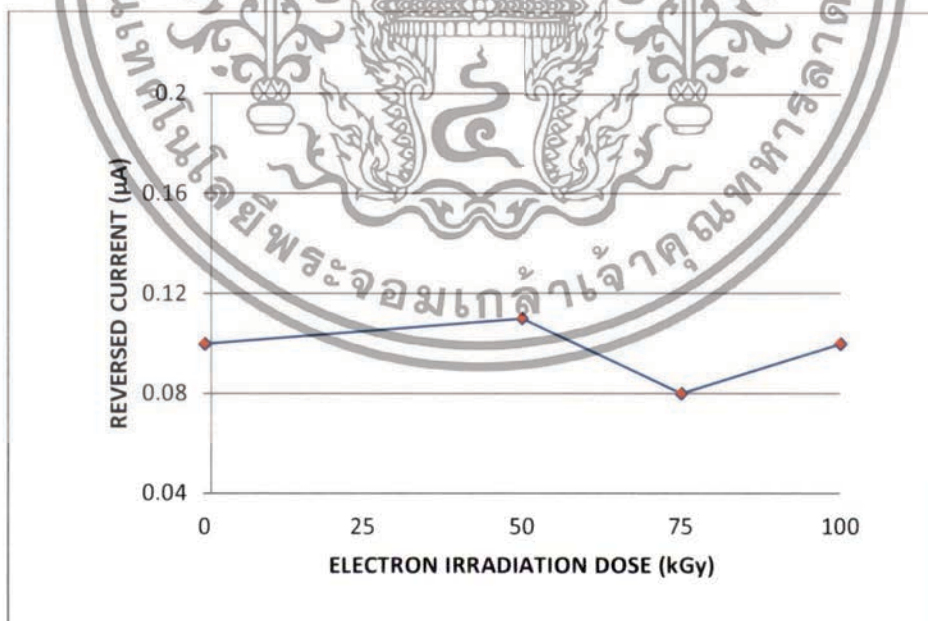
4.2 คุณลักษณะของค่ากระแส และแรงดัน เมื่อได้รับการฉายรังสี

เมื่อนำไดโอดที่ประกอบตัวถังเรียบร้อยแล้วไปทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความจุไฟฟ้า ทำการวัดค่าโดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A หัววัดใช้ Cascade Microtech Model M150 โดยมี ERS Aircool SP72-300 thermo chuck เป็นตัวควบคุมและปรับเปลี่ยนอุณหภูมิฐานรอง ซึ่งผลการทดลองเมื่อทำการวัดค่าแรงดันพังทลาย (V_0) และวัดค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R) แสดงผลดังรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลกระทบของปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อค่าแรงดันพังทลาย (V) หลังการประกอบเข้าตัวถัง ที่ปริมาณรังสี 50,75 และ 100 KGy



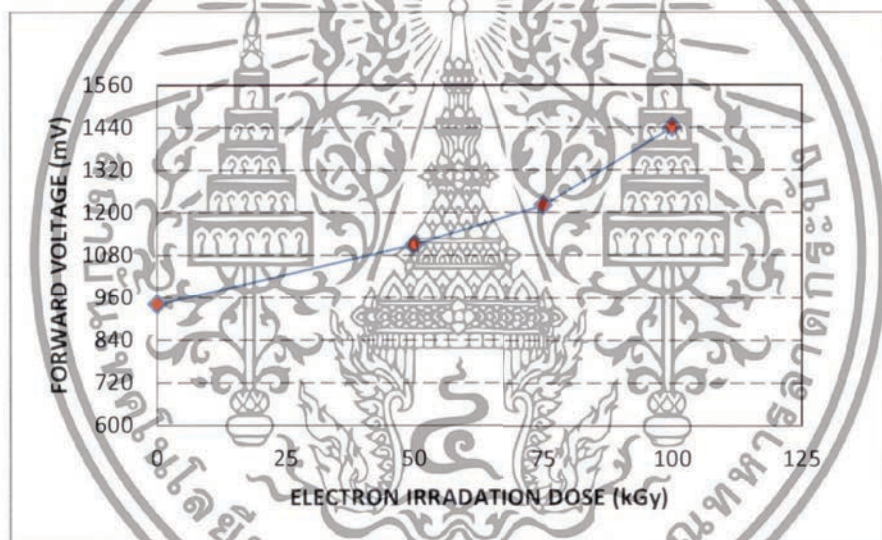
รูปที่ 4.9 ผลกระทบของปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ I_R หลังการ

ประกอบเข้าตัวถังที่ปริมาณรังสี 50,75 และ 100 KGy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของคุณค่าแรงดันพังทลาย (V_D) ถือว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก เพราะการพังทลายของไดโอดแรงดันสูงเป็นการพังทลายแบบอวาลานซ์และปริมาณของจุดบกพร่องถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนแลทธิซ ดังนั้นการฉายรังสีอิเล็กตรอนจึงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันสูง แต่ในส่วนของคุณค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R) ตามทฤษฎีเมื่อโครงสร้างผลึกมีจุดบกพร่องจะมีผลให้คุณค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R) สูงขึ้น แต่ไดโอดที่ผลิตในอุตสาหกรรมมีกระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R) ที่สูงแต่สามารถยอมรับได้ในการใช้งานจริงและกระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R) จากกระบวนการผลิตนี้สูงกว่าผลจากการฉายรังสีมาก จึงทำให้ไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีมีกระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R) ที่ถือได้ว่าไม่เปลี่ยนแปลง

และต่อมาได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) และแรงดันขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า (V_F) โดยทำการวัดค่าแรงดันขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า (V_F) ที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 KGy แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.10



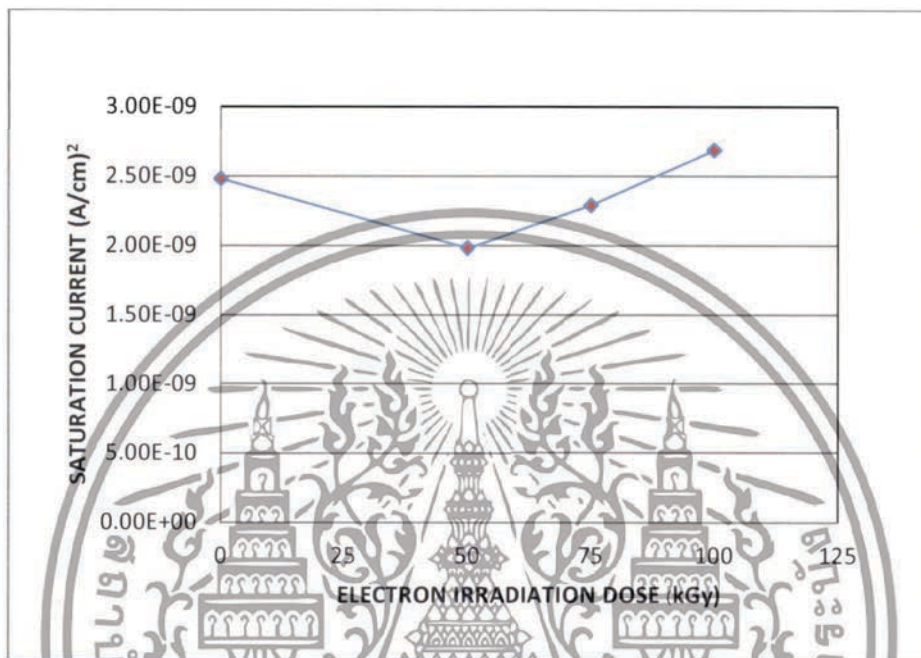
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า (V_F) ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ของไดโอดหลังการประกอบตัวถึงที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 KGy

ในส่วนของคุณค่าแรงดันขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า (V_F) ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการฉายรังสีที่เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนอกบริเวณปลอดพาหะค่าความต้านทานของฐานรองซิลิคอนเพิ่มขึ้น โดยสามารถอธิบายได้จาก ผลของการฉายรังสีที่สร้างจุดบกพร่องในเนื้อซิลิคอนก่อให้เกิดศูนย์การรวมตัว ซึ่งศูนย์กลางนี้เป็นต้นเหตุทำให้อายุพาหะลดลงและทำให้ประสิทธิภาพการสวิตช์ดีขึ้น แรงดันตกคร่อมจึงเพิ่มขึ้นถึง ที่บริเวณนอกเขตปลอดพาหะเมื่อมีการไหลของกระแสสูง จึงมีผลทำให้ค่าค่าแรงดันขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า (V_F) จึงเพิ่มขึ้นตาม

กัน [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะของค่ากระแสอิ่มตัวของซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่า เมื่อได้รับการฉายรังสีหลังการประกอบเข้าตัวถึงที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 KGy แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลกระทบของปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่อค่ากระแสอิ่มตัว (I₀) หลังการประกอบเข้าตัวถึงที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 KGy

จากการทดลองที่ผ่านมาเราจะเห็นว่าเมื่อค่าปริมาณการฉายรังสีเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าแรงดันเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าแรงดันเพิ่มขึ้นก็ทำให้ค่าของกระแสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากสมการของช็อกเคิลีย์ (Shockley' Equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไบอัสของรอยต่อพี-เอ็น ดังนี้ ตามสมการที่ 4.2

$$I = I_0 \cdot e^{qV/kT} - 1 \tag{4.2}$$

โดยที่

$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \tag{4.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

V_A = แรงดันไบอัสที่ป้อน

K = ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ ($1.3806505 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

จากสมการที่ 4.2 ในกรณีที่ $V_A > \frac{kT}{q}$ เช่นที่อุณหภูมิห้อง $T = 300\text{K}$, จะได้ว่า $\frac{kT}{q} = 0.0259 \text{ V}$ ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมาก จึงประมาณสมการที่ (4.2) ได้เป็น

$$I \approx I_0 \cdot e^{qV/kT} \quad (4.4)$$

และ

$$\ln(I) \approx \ln(I_0) + \frac{qV_A}{kT} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 เห็นได้ว่าหาก $V_A > 0$ บนกราฟกึ่งล็อก (Semi-log) ระหว่าง $\ln(I)$ กับ V_A จะปรากฏในช่วงที่เป็นเชิงเส้น โดยเส้นตรงจะตัดแกนกระแสที่ I_0 ซึ่งพบว่าค่ากระแสอิ่มตัวของซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซาที่ไม่ได้รับการฉายรังสีมีค่าเท่ากับ $2.48 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ และที่ได้รับการฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 50, 75 และ 100 kGy มีค่าเท่ากับ $1.98 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$, $2.27 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ และ $2.69 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ ตามลำดับ จากผลการทดลองจะพบว่าค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกระแสในช่วงที่มีการฉีดพาหะที่ระดับต่ำทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสมการกระแสอิ่มตัวของรอยต่อพีเอ็น[6]

$$J_0 = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} \quad 4.6$$

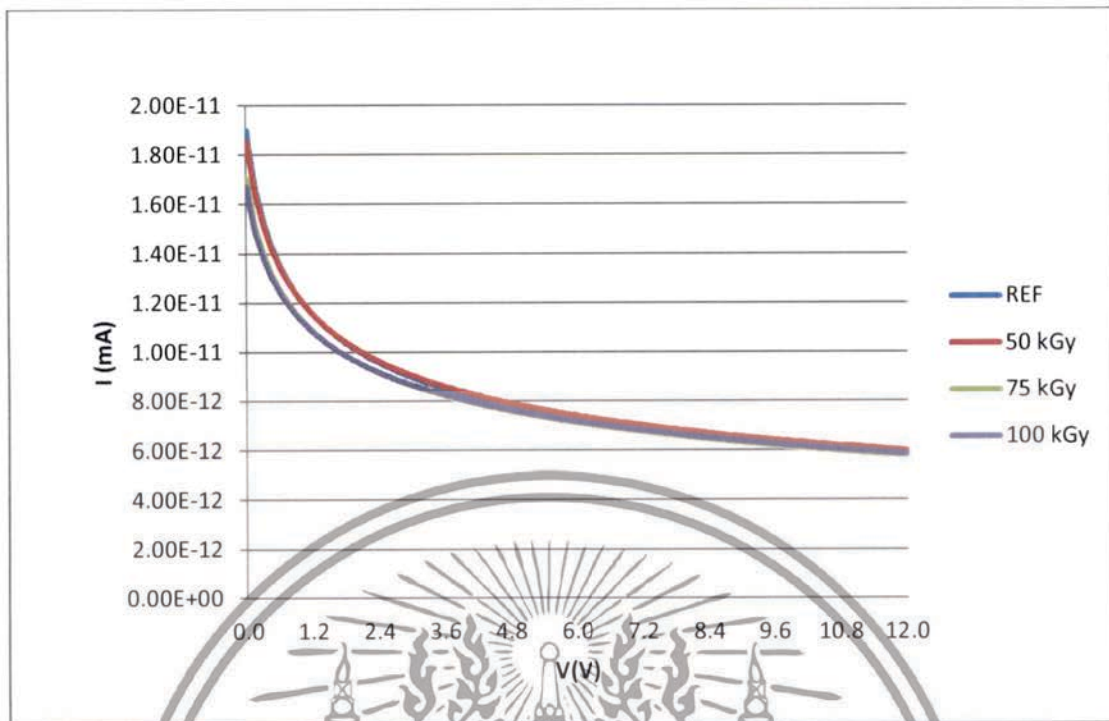
L_p คือระยะการแพร่ของโฮล ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอายุพาหะ

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad 4.7$$

เมื่อเทอมหลังของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก ดังนั้นกระแสอิ่มตัวจึงมีค่าลดลงเมื่อมีการฉายรังสีเพื่อลดอายุพาหะ

จากนั้นทำการพลอตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดัน เพื่อทำการหาค่าความต้านทาน (R) โดยการหาความชัน (Slope) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน (V) และค่ากระแส (I) ของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ของ ไดโอดหลังการประกอบตัวถึงที่ปริมาณรังสี 50,75 และ 100 kGy

เมื่อทำการวัดค่าแรงดันและกระแส เรียบร้อยแล้ว ก็นำมาหาความชัน (slope) เพื่อทำการ ค่าความต้านทานของเมฆาไดโอด แต่ละตัว

จากกราฟที่ 4.12 เห็นได้ว่า เมื่อนำซิลิคอนพินไดโอดทำลิ่งโครงสร้างแบบเมฆา ไปฉายรังสี อิเล็กตรอนจะทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่ฉายรังสี โดยไดโอดที่ไม่ได้รับการ ฉายรังสีมีค่าความต้านทานอนุกรม คือ 2.33×10^{-3} และที่ได้รับการฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 50 , 75 และ 100 kGy มีค่าความต้านทาน 7.67×10^{-3} , 8.33×10^{-3} , 8.78×10^{-3} ตามลำดับ ที่ค่าความต้านทาน เพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าจุดบกพร่องที่เราสร้างขึ้น (Deface) ทำให้โครงสร้างอะตอมเสียหาย จึงทำให้ค่า ความต้านทานมค่าเพิ่มขึ้น

ค่าความต้านทาน (R) ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานของไดโอดที่ได้รับการฉายรังสีที่ปริมาณ 50 ,75 และ 100 kGy

Dose (kGy)	No Treat	50	75	100
Resistivity (Ω)	2.33×10^{-3}	7.67×10^{-3}	8.33×10^{-3}	8.78×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในการสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN โครงสร้างแบบเมซานี้ ถูกสร้างขึ้นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยการนำเอาเทคนิคของการฉายลำรังสีอิเล็กตรอนมาประยุกต์ใช้ และเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติต่างๆกับซิลิคอนพินไดโอดกำลังโครงสร้างแบบเมซ่าที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน เพื่อนำไปสู่การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN โครงสร้างแบบเมซ่าที่ดีขึ้น โดยเมื่อเราทำการฉายลำรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสี 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 Kgy การฉายรังสีนั้นส่งผลต่อค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) จากการทดลองพบว่าหลังการฉายลำรังสีอิเล็กตรอน ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ ค่า t_{rr} ลดลงอย่างผกผันต่อปริมาณการฉายลำรังสีอิเล็กตรอน เพื่อเป็นการศึกษาเพื่อดูค่าแนวโน้มที่ชัดเจนมากขึ้นจึงได้ทำการศึกษา ค่าการยิงลำรังสีอิเล็กตรอนระหว่าง 50 และ 100 kGy ฉายรังสี นั่นคือ ที่ 75 kGy ซึ่งหลังการฉายรังสีที่ 75 kGy พบว่าค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ

(t_{rr}) ของอุปกรณ์ลดลงอย่างผกผันต่อปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอนเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่รังสีจะสร้างจุดบกพร่องในโครงสร้างอะตอมของผลึกซิลิคอนและยิ่งรังสีปริมาณมากก็จะยิ่งทำให้เกิดจุดบกพร่องได้มาก จนทำให้ปริมาณศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) จึงลดลงจากไดโอดกลุ่มที่ไม่ได้ฉายประมาณ 2000 ns ลงมาเหลือที่ประมาณ 125, 97 และ 73 ns ตามลำดับ 50, 75, 100 kGy การฉายรังสีอิเล็กตรอนถูกใช้เพื่อลดอายุพาหะในอุปกรณ์ที่มีพื้นที่ใหญ่ซึ่งการใช้ปริมาณการฉายรังสีมากขึ้น อายุของพาหะจะลดลงเป็นไปตามทฤษฎี

ส่วนความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยของเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ที่ปริมาณรังสี 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 kGy ของไดโอดบนแผ่นผลึกซิลิคอน, หลังการประกอบตัวถัง และหลังจากการแอนนیل การประกอบตัวถังไดโอดจะเป็นการเชื่อมต่อกับโลหะเข้ากับชิพ ที่ถูกตัดแบ่ง (dicing) ออกมาจากแผ่นผลึกซิลิคอน จากนั้นจึงทำการปิดทับ ส่วนที่เป็นชิพและรอยต่อเชื่อมกับขาโลหะด้วยฉนวน (epoxy) กระบวนการ นี้เรียกว่าการ molding ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกทำ ที่อุณหภูมิสูงราว 180 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าค่า t_{rr} มีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนการประกอบ เป็นอย่างมากซึ่งอาจเป็นผลมาจากความร้อนที่ได้จากกระบวนการประกอบ ตัวถังทำให้โครงสร้างอะตอมที่เสียหายเกิดการเรียงตัวใหม่ (annealing) ทำให้ปริมาณของจุดบกพร่องลดลงดังนั้นค่า t_{rr} จึงเพิ่มขึ้นมาเกือบสองเท่าตัว แต่แนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่า t_{rr} ต่อปริมาณรังสียังคงไม่ เปลี่ยนแปลง

เมื่อเราศึกษาค่าการกระจายตัวของค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ t_{rr} ของไดโอดที่ประกอบเข้ากับตัวถังหลังการฉายรังสีอิเล็กตรอน ข้อดีของการฉายรังสีอิเล็กตรอนอีกประการสามารถแสดงได้ดัง รูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของค่า t_{rr} มีอยู่ในช่วงที่แคบ เนื่องจากการ ฉายรังสีจะมีขั้นตอนที่

เอกสารนี้ให้รังสีถูกฉายออกมาเป็นลำที่มีความเข้มข้นสูง และสม่ำเสมอ และยิ่งการฉายรังสีที่ปริมาณสูงจะ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้การกระจายตัวของ t_r ลดลง เพราะสาเหตุหลักของการกระจายตัวของค่า t_r เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์เต็มของแผ่นผลึกซิลิคอนซึ่งเป็นไปอย่างสุ่ม ดังนั้นการฉายรังสี ลดค่า t_r จึงไปชดเชยการกระจายตัวของ t_r เนื่องจากความไม่สมบูรณ์เต็มของแผ่นผลึก

และค่าแรงดันไฟตกคร่อมไปข้างหน้า (V_F) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากการสร้างจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนอกบริเวณที่ปลอดภัยค่าความต้านทานของซิลิคอนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่า V_F เพิ่มขึ้นตามด้วยในส่วน of ค่าแรงดันพังทลาย มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพราะเป็นการพังทลายของไดโอดแรงดันสูงแบบอวาลานซ์ นอกจากนี้การฉายรังสีที่ปริมาณสูงจะทำให้กระบวนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมสามารถคุมค่า t_r ให้ดีขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของค่า t_r จะยิ่งน้อยลงที่ปริมาณรังสีที่สูงผลกระทบของปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่อค่า I_0 หลังการประกอบเข้าตัวถึงที่ปริมาณรังสี 50,100,150,200,250 และ 300 KGy จากการทดลองที่ผ่านมาเราจะเห็นว่าเมื่อค่าปริมาณการฉายรังสีเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าแรงดันเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าแรงดันเพิ่มขึ้นก็ทำให้ค่าของกระแสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. M. Sze, Physical of semiconductor devices", 2nd ed. New york: wilay, 1981.
- [2] D.K.Schroder, "Carrier Lifetimes in Silicon", IEEE Trans. Electron Devices, ED-44, p.160, 1997.
- [3] V.K Khanna, "Physical understanding and tachnological control of carrier lifetimes in semiconductor materials and devices: A critical and conceptual develobment, state of art and applications", Progress in Quantum Electronics 29 p 59-163, 2005.
- [4] S.K. Ghandi, semiconductor Power Devices, Wiley, New York, 1997
- [5] C. Claeys, E. Simoen, Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and devices, Springer, Berlin, 2002.
- [6] R.N.Hall, "Electron-hole recombination in germanium" Phys.Rev.,87,p.387(1952)
- [7] สมเกียรติ ศุภเดช. ซิมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545.
- [8] สธน ผ่องอำไพ, จิรวัดน์ ปราบเขต, วิวัฒน์ อธิธิกุลสมารย์, ภาสภณ มโนสุกฤษกุล, อัมพร โพธิ์ไย และ วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง, "ผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนต่อคุณลักษณะเฟดรมของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด Pin" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่35 "EECON 35), หน้า 759-762

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 สีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆกัน

Film thickness (microns)	Order (5450Å)	Color and comments
0.050		Tan
0.075		Brown
0.100		Dark violet to red-violet
0.125		Royal blue
1.50		Light blue to metallic blue
0.175		Metallic to very light yellow-green
0.200		Light gold or yellow-slightly metallic
0.225		Gold with slight yellow-orange
0.250		Orange to melon
0.275		Red-violet
0.300		blue to violet-blue
0.310		blue
0.325		blue to blue-green
0.345		Light green
0.350		Green to yellow-green
0.365		yellow-green
0.375		green-yellow
0.390		yellow
0.412		Light orange
0.426		Carnation pink
0.443		Violet-red
0.465		Red-violet
0.476		Violet
0.480		Blue-violet
0.493		Blue
0.502		Blue-green

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.520	III	Green (broad)
0.540		Yellow-green
0.560		Green-yellow
0.574		Yellow to "yellowish"
0.585		Light orange or yellow to pink borderlines
0.60		Carnation pink
0.63		Violet-red
0.68		Bluish
0.72		Blue-green to green (quite broad)
0.77		Yellowish
0.80		Orange (rather broad for orange)
0.82		Salmon
0.85		Dull, light red-violet
0.86		Violet
0.87		Blue-Violet
0.89		Blue
0.92		V
0.95		Dull Yellow-green
0.97		Yellow to "Yellowish"
0.99		Orange
1.10	VI	Green
1.11		Yellow-Green
1.12		Green
1.18		Violet
1.19		Red-violet
1.21		Violet-red
1.24		Carnation pink to salmon
1.25		Orange
1.28		"Yellowish"
1.32	VII	Sky blue to green-blue
1.40		Orange

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.45		Violet
1.46		Blue- violet
1.50		Blue
1.54		Dull yellow-green



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์

- [1] **พรหมพักตร์ ดาวัลต์**, สธน ผ่องอำไพ, ปิยะชาติ สดงาม และ วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง “ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON 2013), โรงแรม เฟลิกซ์ ริเวอร์ แคว รีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี, 11-13 ธันวาคม พ.ศ. 2556
- [2] **พรหมพักตร์ ดาวัลต์**, วิวัฒน์ อธิธิกุลมาลย์, ชบา สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง “การประยุกต์ใช้วิธีการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดค่า t_{rr} ในอุตสาหกรรมการผลิตไดโอดแบบพื้นผิวเร็วชนิดซิลิคอนพินโครงสร้างเมซง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6 (EENET 2014), โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี, 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2557
- [3] ภาสภณ มโนสุกฤตกุล, **พรหมพักตร์ ดาวัลต์**, เอกลักษณ์ แฉล้มมนงนุช และ วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง “การศึกษาลักษณะกระแสรั่วที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่างความยาวารอรูปและพื้นที่ประสิทธิผลของไดโอดกำลัง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6 (EENET 2014), โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี, 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2557
- [4] **พรหมพักตร์ ดาวัลต์**, วศิน ปัญญาเลิศ, ชบจ สุริยาอมรานนท์ และ วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง “การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพผลึกเพชรที่สร้างด้วยวิธี HFCVD” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7 (EENET 2015), โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี, 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล **ครั้งที่ ๖**

6th Electrical Engineering Network 2014
of Rajamangala University of Technology Conference

นวัตกรรมวิจัยแห่งเทคโนโลยี คณะสหกรณ์วิชาเครื่องใช้พลังงาน
Technology Research Innovation for Responding
to the Energy Network of 21st

Volume 1

- อิเล็กทรอนิกส์ (EI)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

๒๖ - ๒๘ มีนาคม พ.ศ. ๒๕๕๗

ณ มารีโทม์ พาร์คแอนด์สเปา รีสอร์ท จังหวัดกระบี่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาตจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

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

การประยุกต์ใช้วิธีการฉายลำรังสีอิเล็กตรอนเพื่อลดค่า t_r ในอุตสาหกรรมการผลิตไดโอดแบบฟื้นตัวเร็วชนิดซิลิคอน
พินโครงสร้างเมซ่า

Application of Electron Beam Irradiation for Reducing t_r in Fast Recovery Diodes Manufacturing

ทรงยศศักดิ์ ลาวัลย์, วิวัฒน์ อธิชิตคุณภักดิ์, สภา สุวิภาดาพรหมณี และ วิษุวัต วิจิตรวงษ์¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520, E-mail: tuy_donut2307@hotmail.com

บทคัดย่อ

การฉายลำรังสีอิเล็กตรอนเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของไดโอดแบบฟื้นตัวเร็วเพื่อให้ได้คุณสมบัติการสวิตช์ที่เร็วคือ เวลาฟื้นตัว (t_r) ตามที่ได้ออกการ ซึ่งอาศัยหลักการสร้างจุดบกพร่องในเนื้อซิลิคอน การศึกษาได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN โครงสร้างเมซ่าที่มีขนาดยาวรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณ 50, 75 และ 100 kGy พบว่าค่า t_r ที่วัดได้ออกในช่วง 310-330, 245-255 และ 180-190 ns ตามลำดับ และการฉายรังสีที่มากขึ้นทำให้ค่า t_r ที่ได้อยู่ในช่วงที่แคบมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลของการฉายรังสีได้ทำให้เกิดการลดลงในคุณสมบัติโพสิตรอนิก แรตเทคกร็องไปข้างหน้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการลดลงของไดโอดที่มีความถี่ในการใช้งาน และการฉายลำรังสีอิเล็กตรอนเพื่อลดค่า t_r

คำสำคัญ : ลำรังสีอิเล็กตรอน, ไดโอดแบบฟื้นตัวเร็ว, คุณภาพการผลิตซิลิคอนไดโอด, การลดอายุขาน

Abstract

Electron beam irradiation, a method for improve the fast diodes to controlling t_r by creating the bulk defects. Power Silicon-PIN diodes, mesa structure were fabricated in production line of semiconductor manufacturer. Then were irradiated with electron beam at dose 50, 75, 100 kGy, t_r can measure in range of 310-330, 245-255 and 180-190 ns respectively. And more irradiation dose, t_r will be in more narrow range. However effect of irradiation cause regression in electrical properties is forward voltage drop (V_f) which is importance point to consider electron beam irradiation.

Keywords: Electron irradiation, Fast recovery diodes, Industrial production diode, carrier lifetime decreasing

บทนำ

ความถี่ในตัวย้อนกลับ (Reverse recovery time; t_r) ก็มีความสำคัญยิ่งที่ขมอดถึง ความเร็วในการตอบสนองความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังค่า t_r นี้แปรผันตรงกับอายุขานส่วนน้อยเนื้อสารซิลิคอน (minority carrier lifetime) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดอายุขานเนื้อเนื้อ ไดโอดให้มีค่า t_r ตามต้องการ

ในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรมในปัจจุบันจะใช้เทคนิคการแพร่ของสารเจือปนชนิด n ในเนื้อของไดโอด แต่ด้วยวิธีนี้ทำให้เกิดความสูญเสียของสารเจือปนชนิด n ในเนื้อของไดโอด การแพร่จะลดและผลคือค่า t_r จะเพิ่มขึ้นไม่เกิดจุดบกพร่องในโครงสร้างผลึกที่จะประจุตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะ นำให้อายุขานลดลงและเสียต้นทุนการฉายรังสีอิเล็กตรอนซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลาย อุปกรณ์จะถูกละทิ้งหรืออิเล็กตรอนที่มีพลังงานหลาย MeV ซึ่งทะลุผ่านผลึกซิลิคอนและเกิดจุดบกพร่องเป็นเนื้อเมซ่าขึ้น ทว่าทั้งโครงสร้างของอุปกรณ์ ความเข้มของการระส่ำกนแปรผันกับปริมาณรังสี (radiation dose/ ϕ) ที่ใช้ด้วยเหตุนี้เองผลที่ปรากฏกับปริมาณรังสี ซึ่งวัดค่าด้วยรังสีนี้สามารถกระทำได้ผลปริมาณการระส่ำกนการสร้างอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิคอน (Wafer Fabrication) เดิมทีแล้ว [อินฮิงเปออร์ที (ICMPMIT)] ดังนั้นจึงไม่กระทบต่อกระบวนการผลิตเดิมของไดโอด

การฉายรังสีอิเล็กตรอนถูกใช้เพื่อลดอายุขานในอุปกรณ์ที่มีค่า t_r โดยวิธีการใช้ปริมาณการฉายรังสีที่มากขึ้น อายุขานจะลดลงดังนี้ไปตามสมการ

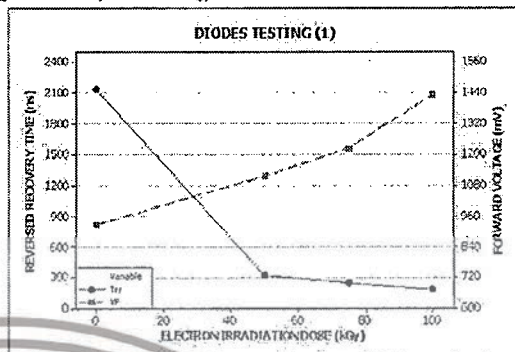
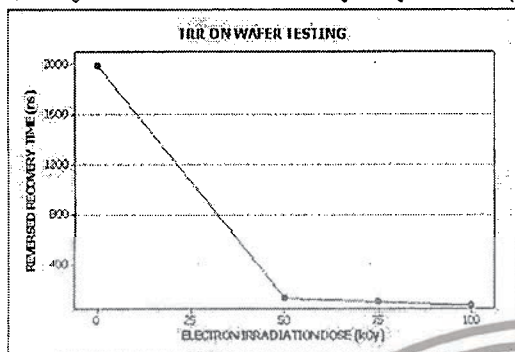
$$\tau = \tau_0 \frac{\tau_0}{1 + \tau_0 K \phi} \tag{1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

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

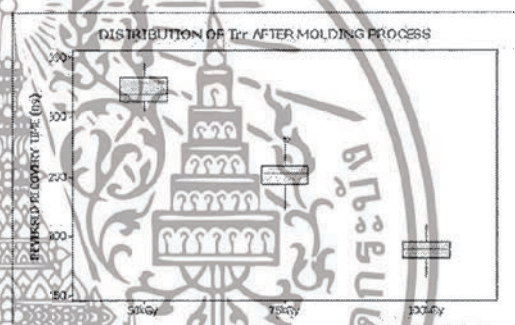


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ t_{rr} ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ของไดโอดบนแผ่นผลึกซิลิคอน

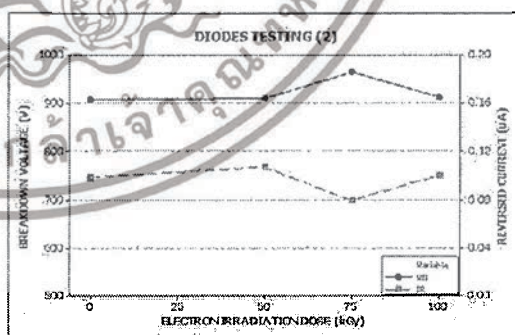
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย t_{rr} และ V_f ต่อปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ของไดโอดถึงการประกอบตัวถึง

การประกอบตัวถึงไดโอดจะเป็นการเชื่อมลงขาโลหะเข้ากับซิลิกอนที่ถูกตัดแบ่ง (dicing) ของแผงจากแผ่นผลึกซิลิคอน จากนั้นจึงทำการปิดทับส่วนที่เป็นซิลิโคนรอยต่อเชื่อมกับซิลิโคนด้วยขบวนการ (epoxy) และขบวนการนี้เรียกว่าการ molding ซึ่งกระบวนการนี้จะดูที่อุณหภูมิสูงราว 180 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าค่า t_{rr} มีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนการประกอบเป็นอย่างมากซึ่งอาจเป็นผลมาจากความร้อนที่ได้จากกระบวนการประกอบตัวถึงทำให้โครงสร้างอะตอมที่เกี่ยวพันเกิดการเรียงตัวใหม่ (annealing) ทำให้ปริมาณของจุดบกพร่องลดลงลงบ้างค่า t_{rr} จึงเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อยจนเท่าตัว แต่แนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่า t_{rr} ต่อปริมาณรังสียังคงไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนของ V_f ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการฉายรังสีสามารถอธิบายได้ว่าจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนอกบริเวณปกคลุมที่หาความเสียหายทางของซิลิคอนเพิ่มขึ้นจึงมีผลทำให้ค่า V_f เพิ่มขึ้นตามกัน (paper: Terl)

ข้อดีของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่กระบวนการนี้มาองผลลงได้คือรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าการกระจายตัวของค่า t_{rr} มีอยู่ในช่วงที่แคบ เนื่องจากการฉายรังสีจะมีขึ้นตอนที่ทำให้รังสีถูกฉายออกมาเป็นลำที่มีความเข้มข้นสูงและสม่ำเสมอ และยิ่งการฉายรังสีที่มีปริมาณสูงจะทำให้การกระจายตัวของ t_{rr} ลดลง เพราะสาเหตุหลักของการกระจายตัวของค่า t_{rr} เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์เดิมของแผ่นผลึกซิลิคอนซึ่งเป็นไปอย่างสุ่ม ดังนั้นการฉายรังสีลดค่า t_{rr} จึงไปลดการกระจายตัวของ t_{rr} เนื่องจากความไม่สมบูรณ์เดิมของแผ่นผลึก



รูปที่ 4 การกระจายตัวของค่า t_{rr} ของไดโอดที่ประกอบเข้าเป็นตัวถึงหลังการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีปริมาณเท่าๆ



รูปที่ 5 ผลกระทบของปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่อค่า V_{br} และ I_r หลังการประกอบเข้าตัวถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

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

ในส่วนของคุณแรงดันพังทลายถือว่ามีเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก เพราะการพังทลายของไดโอดแรงดันสูงเป็นการพังทลายแบบอวลา...

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Ithakusuman, W. Jakpetch, W. Thitiroonguang, "Minority carrier Lifetime Controlling of Mesa Diodes by Electron Beam Irradiation", Advanced Materials Research Vol.811 (2013) pp 200-204.

ประวัติผู้เขียนบทความ

นางสาว พรหมพักตร์ คำวณิช เกิดที่จังหวัดอุดรธานี จบปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโทสาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

นางสาว พรหมพักตร์ คำวณิช จบปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีประสบการณ์การทำงานร่วมกับบริษัท SONY Device Technology (Thailand) Co., Ltd. ศึกษาวิจัยระดับปริญญาโทสาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ดร. วุฒิชัย สุทธิธรรม จบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จาก JOKAI UNIVERSITY ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ระดับ 9 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สรุป

ซิลิคอนไดโอดกำลังแรงดัน PN โครงสร้างแบบ mesa ถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่อผลของ...

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันอุตสาหกรรม สถาบันฟิสิกส์อุตสาหกรรม (มหาชน) สำหรับการสนับสนุนที่จังหวัดอุดรธานี ในโครงการวิจัยและรางวัลตลอดจนวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตไดโอด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์พลังงานสูง สำหรับการผลิตรังสีอิเล็กตรอนในงานวิจัยนี้



คุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ศรีที่ 6

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

การศึกษาลักษณะกระแสรั่วที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่างความยาวรอบรูปและพื้นที่ประสิทธิผลของไดโอดกำลัง

Effect of Junction perimeter to effective area ratio on Diode Properties

ภาสภณ นโณสุกฤตกุลพรหมพิทักษ์ คาวัดดี เอกสิทธิ์ และธัมมณัฐ เวชวิสุทธ์ จูดีรุ่งเรือง²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาลัยชุมชนพระนครศรีอยุธยา จังหวัดชุมพร

²ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถ. ดอกรุ่งเรือง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ :0-2739-0643E-mail:Lucendra@hotmail.com

บทคัดย่อ

Keywords: Reverse leakage current, junction perimeter to effective area ratio, depletion region, generation current

กระแสรั่วเป็นปัญหาสำคัญในการลดอุณหภูมิสมมติทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพของไดโอดกำลัง งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความยาวรอบรูปต่อพื้นที่ประสิทธิผลของตัวไดโอด 3 ลักษณะคือ 0.58, 0.98, 1.72 เซนติเมตรต่อ 0.022, 0.062, 0.192 ตารางเซนติเมตรตามลำดับ จากการทดสอบพบว่ากระแสรั่วย้อนกลับเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวรอบรูปต่อพื้นที่ประสิทธิผลเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่ากระแสรั่วที่เกิดขึ้นบริเวณของตัวไดโอดกำลัง เนื่องจากโครงสร้างของไดโอดกำลังและที่อัตราส่วนความยาวรอบรูปต่อพื้นที่ประสิทธิผลเพิ่มขึ้นทำให้เกิดกระแสรั่วในบริเวณที่อัตราส่วนความยาวรอบรูปต่อพื้นที่ประสิทธิผลเพิ่มขึ้น

โครงสร้างรอยต่อพีเอ็น ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ไดโอดสวิตช์ซึ่งความถี่สูง อุปกรณ์เซ็นเซอร์แสง และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ทฤษฎีของรอยต่อพี-เอ็นถูกใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ลักษณะการของไดโอดกำลัง (1-2) ตัวแปรทางทฤษฎีที่นำมาใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์ของไดโอดกำลังและกระบวนการสร้างหนึ่งปีจากงานที่เขียนโดย [1] ที่สัมพันธ์ระหว่างขอบ (Perimeter) กับพื้นที่ประสิทธิผล (Effective Area) ของตัวอุปกรณ์ (P/A) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระแสรั่วย้อนกลับ (Reverse Leakage Current I_{r}) ตามที่ทราบกันดีอยู่แล้วที่สามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_{r} กับ P/A ได้อย่างไรแล้วไดโอดกำลังที่ดีควรมีกระแสรั่วที่ต่ำที่สุด [2] อย่างไรก็ตามค่าของไดโอดกำลังกระแสรั่วสูงซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณของขอบและพื้นที่ของตัวอุปกรณ์เป็นผลตามรูปที่ 1

คำสำคัญ: กระแสรั่ว, อัตราส่วนระหว่างความยาวรอบรูปต่อพื้นที่ประสิทธิผล, เซลล์ไดโอดกำลัง

Abtrace

Reverse leakage current (I_r) is a problem that deplete electrical characteristics and power diode effective. This paper presents the parameter extraction and analysis reverse leakage current of 3 type silicon power-diodes with different junction perimeter to effective area ratio (P/A). All power diode were tested in 3 perimeter and effective areas as follows: 0.58 cm, 0.98 cm, 1.72 cm and 0.022 cm², 0.062 cm², 0.192 cm², respectively. We found the reverse leakage current increase with the larger P/A ratio that meaning the reverse leakage current increase with perimeter of the junction. Because of depletion region (W_d) extend around the perimeter junction and generate some current from depletion region extending that is generation current (I_{gen}). Furthermore, the generation current increased with larger P/A ratio



รูปที่ 1 ตัวอย่างโครงสร้างพื้นฐานของไดโอดกำลังชนิด P⁺-n และบริเวณที่เกิดกระแสรั่ว

ปัญหาหลักด้านกระแสรั่วที่ค่อนข้างสูงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวอุปกรณ์มาก ดังนั้นจึงมีโอกาสนี้จะศึกษาเพื่อหาแนวทางแก้ไข

26-28 มีนาคม 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

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

รูปของควมร้อน โดยอาจทำให้อุปกรณ์เกิดการเสียหายหรือมีการทำงานที่ผิดปกติขึ้น

จุดประสงค์หลักของบทความนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น และวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่ส่งผลให้เกิดกระแสรวมมากขึ้น โดยการทดลองจะมุ่งเน้นไปยังไดโอดกึ่งตัวนำ ออกแบบให้มีความยาวขอมและพื้นที่ ดังนี้ 0.58 cm, 0.98 cm, 1.72 cm และ 0.022 cm², 0.062 cm², 0.192 cm² ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้โดยใช้กราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าและสมการทางทฤษฎีเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานให้ดีขึ้นต่อไป

การทดลอง

ไดโอดกึ่งตัวนำที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นขอมและพื้นที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กลุ่มอัตราส่วน P/A ของ ไดโอดกึ่งตัวนำที่มีการทดลอง

Perimeter (cm)	Effective area (cm ²)	P/A
0.58	0.022	26.3636
0.98	0.062	15.8164
1.72	0.191	9.0116

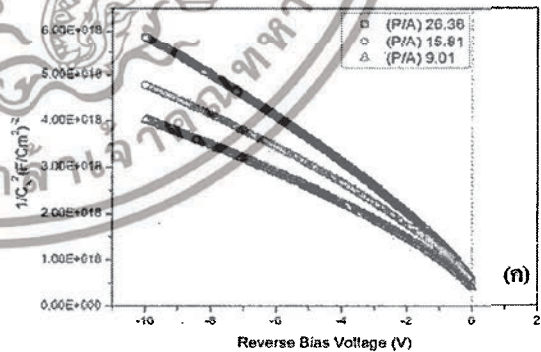
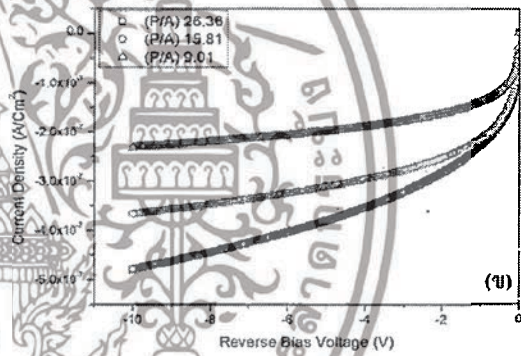
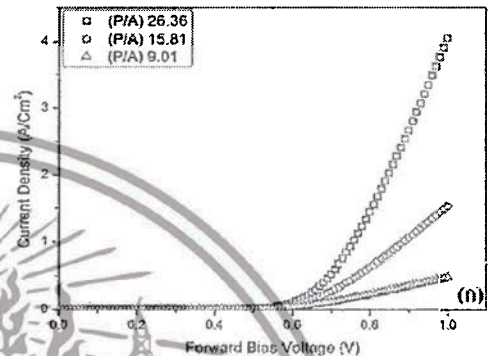
คุณสมบัติทางไฟฟ้า V และ C ของไดโอดกึ่งตัวนำภายใต้เงื่อนไขการจ่ายแรงดันตรงในช่วง 0-2 โวลต์ และแรงดันไบอัสย้อนกลับในช่วง 0 - 10 โวลต์

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นด้วยกราฟกระแส-แรงดันของไดโอดกึ่งตัวนำทั้งในกรณีไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ และกราฟความจุไฟฟ้า-แรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 2 พบว่าไดโอดกึ่งตัวนำแรงดันภายในประมาณ 0.7 โวลต์ นอกจากนี้ยังสามารถหาหาค่ากระแสไดโอดเพื่อหาความหนาแน่นของกระแสในตัวย้อนกลับได้จากสมการ

$$ln(J) = ln(J_0) + \frac{qV_A}{nkT} \quad (1)$$

โดย J₀ คือความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว, V_A คือแรงดันไบอัส, n คือแฟกเตอร์ในอุดมคติ, k คือค่าคงที่โบลทซ์มันน์, q คือประจุอิเล็กตรอน และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์



รูปที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดกึ่งตัวนำ (ก) คุณสมบัติความหนาแน่นกระแส-แรงดันไบอัสตรง (ข) ความหนาแน่นกระแส-แรงดันไบอัสกลับ และ (ค) คุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

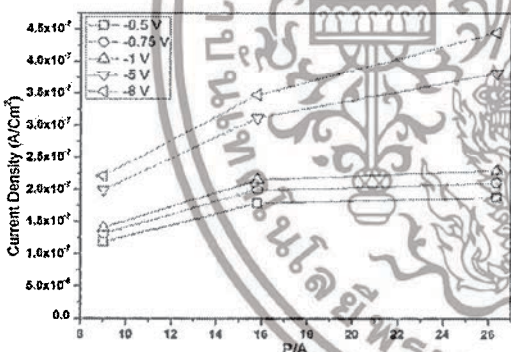
Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

จากคุณสมบัติความหนาแน่นกระแส – แรงดันในรูปที่ 2(ก) และสมการที่ (1) สามารถวิเคราะห์อัตราส่วน P/A ที่มีผลกระทบต่อค่าของ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวและปริมาณกระแสรั่วดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วน P/A ของไดโอดกึ่งตัวนำที่มีผลต่อปริมาณความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวและกระแสรั่ว

P/A	J_0 (A/cm ²)	J_{k_5V} (A/cm ²)
26.3636	7.5750E-08	3.8093E-07
15.8164	6.3943E-08	3.1108E-07
9.0116	4.2279E-08	1.9908E-07

พบว่าเมื่ออัตราส่วน P/A มีค่ามากขึ้น กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ และกระแสรั่วไหลเมื่อทำการไบอัสย้อนกลับจะมีค่ามากขึ้น [4] แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับอัตราส่วน P/A ที่แรงดันต่าง ๆ กัน

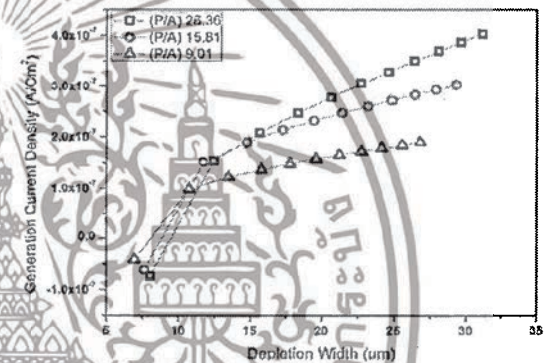
จากผลวิเคราะห์ดังกล่าวทำให้ทราบว่ากระแสรั่วที่เกิดขึ้นจากการไบอัสย้อนกลับนั้น ส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากรอยต่อที่ขอบของรอยค่อนเอง [5] โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$J_r = J_{ra} + J_{rp} \frac{P}{A} \quad (2)$$

ความหนาแน่นกระแสรั่วทั้งหมดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการไบอัสย้อนกลับนอกเหนือจากกระแสอิ่มตัวแล้ว ยังมีกระแสรั่วที่เกิดขึ้นในบริเวณปลดพาหะ (Generation current: J_{gen}) ซึ่งเป็นไปตามความเข้มข้นดังนี้

$$J_R = J_0 + J_{gen} \quad (3)$$

โดยที่กระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสย้อนกลับซึ่งโดยทั่วไปแล้วแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงนอกจากนี้พบว่ากระแสรั่วที่เกิดขึ้นบนส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นในบริเวณเขตปลดพาหะ โดยที่ความสัมพันธ์กับความกว้างของบริเวณปลดพาหะ (Depletion Width: W) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4(ก)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณปลดพาหะกับกระแสรั่วที่เกิดขึ้นในบริเวณปลดพาหะ
 ดังจากรูปที่ 4(ก) พบว่าเมื่อความกว้างของบริเวณปลดพาหะมากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณกระแสในบริเวณปลดพาหะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$J_{gen} = \frac{qn_i W}{2\tau_0} \quad (4)$$

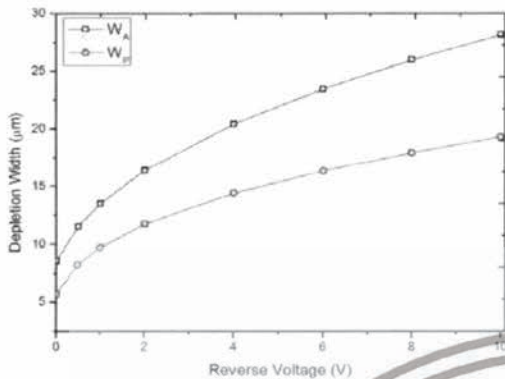
โดย n_i คือความเข้มข้นพาหะอินทรินซิก, q คือความกว้างของบริเวณปลดพาหะ, τ_0 คืออายุการเกิดพาหะ

นอกจากนี้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณเขตปลดพาหะกับแรงดันไบอัสกลับในรูปที่ 4(ข) ยังสามารถทำการแยกวิเคราะห์เขตปลดพาหะที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่หน้าตัด (W_A) กับบริเวณขอบด้านข้าง (W_P) ได้ดังรูปที่ 5

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

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



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า บิลาภรดา คณาจารย์ ที่น้องทุกท่านในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่คอยสนับสนุนค่าปริศนา ตลอดจนเป็นกำลังใจให้สำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

[1] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd ed. New York: Wiley, 1981.

[2] Donald A. Neamen, "Semiconductor Physics and Devices" 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2003

[3] K. Deyal, "Defect assessment in advanced semiconductor materials and devices", PhD thesis, KU Leuven, Belgium, 2002

[4] A. Chai, C. Chammanont, "Effect of Junction Shape on Diode Properties", Advanced Materials Research Vol. 717, (2013), pp 125-129

รูปที่ 5 เปรียบเทียบระหว่าง W_A และ W_P ของไดโอดแรงดันไบโอสกัลป์

ความสัมพันธ์ระหว่าง W_A และ W_P ในรูปที่ 5 นี้มีความสอดคล้องกับสมการทางทฤษฎี ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าความจุไฟฟ้าที่ไดโอดนั้นด้วย ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$W_A = \frac{e \sigma t}{C_A}$$

$$W_P = \frac{e \sigma t \sqrt{1 + \frac{C_A}{C_P}}}{C_P}$$

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ในทางทฤษฎีดังกล่าวในรูปที่ 5 กับสมการ (5) และ (6) พบว่าค่า W_A จะเพิ่มขึ้นตามค่า W_P ที่มากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะเห็นว่า W_A จะเพิ่มขึ้นเร็วกว่า W_P ที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ W_A จะเร็วกว่า W_P ที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างสำคัญคือปริมาณกระแสที่ไหลผ่านไดโอดที่เกิดขึ้นกับไดโอดทั้งสอง

สรุป

จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนของพื้นที่ประจุที่สะสมของขอรอยต่อของไดโอดนั้นมีความสำคัญในกระบวนการออกเบวมัน เมื่ออัตราส่วนมีค่ามากจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณกระแสที่ไหลผ่านไบโอสกัลป์ ซึ่งมีสาเหตุจากเมื่อทำการจ่ายแรงดันไบโอสกัลป์ ทำให้บริเวณเขตปลอดพาหะมีการขยายตัว ซึ่งการขยายตัวนี้ทำให้เกิดกระแสในบริเวณปลอดพาหะด้วย ดังนั้นกระแสที่ย้อนกลับทั้งหมดจึงเป็นผลรวมของกระแสที่กลับตัวกับกระแสที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของเขตปลอดพาหะ จากผลการทดลองที่ได้นั้น สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาคุณสมบัติของอุปกรณ์ไดโอดกำลังให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

ผู้เขียนที่ศูนย์เทคโนโลยี



นางสาวปิยะมาศ บุญคุ้มดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.สมศักดิ์ คาวีรัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.

รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ระดับ 9 สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



EENET2015

Creative Technology for Green Energy

27-29 May 2015, A-one The Royal Cruise Hotel

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

The 7th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajabhat University of Technology



Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)

คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

2 ถนนบางเขน แขวงทุ่งนาคมน เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ศรีวิชัย 7

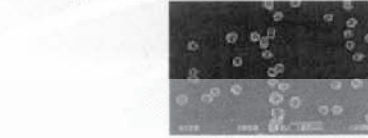
Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (BENET 2016)

และการวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) เป็นเทคนิควิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างและลักษณะผิวของผลึก โดยจะให้ผลวิเคราะห์หรือออกมาในรูปแบบเป็นภาพ ยกยอว่าผลึกไฟฟ้ายิ่งนี้คือพลาสมาไปบนผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิวนั้นๆ

มาก ไม่สามารถนำวัสดุคุณภาพและกระบวนการเร่งต้นได้ เพราะผลึกเพชรที่ได้ปรากฏเป็นแกรไฟต์ซึ่งปนอยู่ซึ่งจะดูได้จาก Raman shift แสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 สเปกตรัมรามานของเพชรสังเคราะห์ด้วยเลเซอร์

ตัวเลขรามาน	ชนิดของคาร์บอน	รายละเอียด
~1,10 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	Steel size (0.1µm)	พบในฟิล์มคาร์บอนที่กระบวนการผลิต (0.01 µm) สี่เหลี่ยม
1,315-1,324 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	Hexagonal diamond	แถบสเปกตรัมที่พบในสารสังเคราะห์แบบ Stack phase
1,332 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	Cubic diamond	พบในฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5-2.0 GPa และอุณหภูมิ 1,700-2,000 °C
1,345 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	ฟิล์มคาร์บอน	พบในฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5-2.0 GPa และอุณหภูมิ 1,700-2,000 °C
1,355 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	Microcrystalline graphite	พบในฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5-2.0 GPa และอุณหภูมิ 1,700-2,000 °C
1,550 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	Diamond-like carbon	พบในฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5-2.0 GPa และอุณหภูมิ 1,700-2,000 °C
1,580 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	แกรไฟต์	พบในฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5-2.0 GPa และอุณหภูมิ 1,700-2,000 °C
2,458 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	Cubic diamond	พบในฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5-2.0 GPa และอุณหภูมิ 1,700-2,000 °C
2710 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	Microcrystalline graphite	พบในฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5-2.0 GPa และอุณหภูมิ 1,700-2,000 °C
3240 $\text{C}77\text{L}^{-1}$	แกรไฟต์	พบในฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5-2.0 GPa และอุณหภูมิ 1,700-2,000 °C



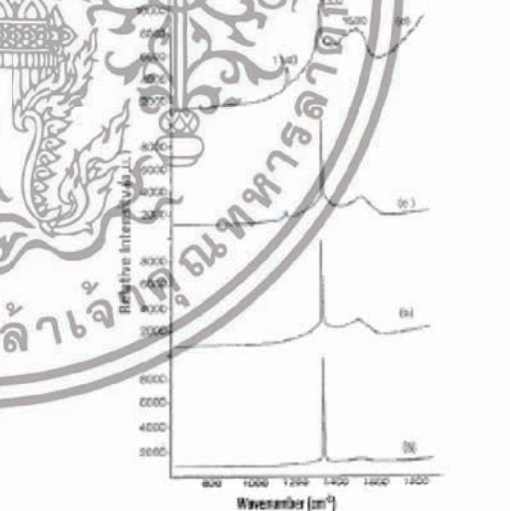
รูปที่ 2 ภาพของผลึกเพชรสังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5 GPa และอุณหภูมิ 1,700 °C



รูปที่ 3 Raman spectrum ของผลึกเพชรสังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ที่ความดัน 1.5 GPa และอุณหภูมิ 1,700 °C แสดงให้เห็นการปนเปื้อนของแกรไฟต์ที่ความดัน 1.5 GPa และอุณหภูมิ 1,700 °C

2. วิธีการทดลอง

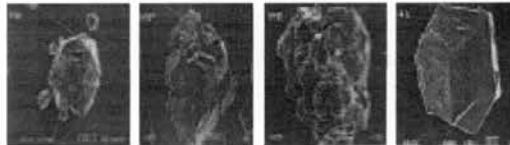
ใช้วิธีการ HFCVD ในการสังเคราะห์ผลึกเพชร โดยใช้น้ำแก๊ส H_2 เป็นตัวนำพาของคาร์บอนที่มีขนาดอนุภาคที่ประมาณ 10-20 nm. เข้าไปในหลอดแล้วให้ความร้อนในภาชนะแก้วของหลอดคาร์บอนด้วยไอโซลด์ทั้งสี่ด้าน เพื่อให้ได้ผลึกเพชรที่มีค่าประมาณ 900 องศาเซลเซียส ใช้ผลึกซิลิกอนเป็นฐานรอง ที่เวลา 2,4,9,14 และ 19 ชั่วโมง จากนั้นทำการวัดคุณภาพของผลึกและเร่งต้นของผลึกเพชรที่ได้ จากนั้นทำการแอนนัลผลึกเพชรเพื่อลดขนาดหรือของผลึก ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน, ไนโตรเจน, ออกซิเจน และแก๊สฮีเลียม ที่เวลาการอนนัล 3, 6 และ 9 นาที ทำการหาคุณภาพที่เหมาะสมในการแอนนัล โดยใช้คุณภาพ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียสและดูด้วยวัดคุณภาพและของกระบวนการเร่งต้นของผลึกเพชรที่ทำการแอนนัล



รูปที่ 4 Raman spectrum ของผลึกเพชรที่ปลูกด้วยกระบวนการแอนนัลในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่ 900 องศาเซลเซียส

3. ผลการทดลองและอภิปราย

จากการวัดผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD เป็นเวลา 2 ชั่วโมง บนฐานรองซิลิกอนขนาดของผลึกเพชรแสดงดัง รูปที่ 2 พบว่ามีขนาดผลึก



บทความวิจัย

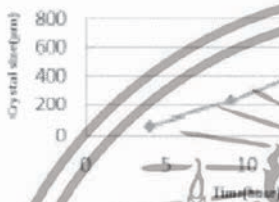
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ศรีวิชัย 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajabongkaj University of Technology 2015 (EENET 2015)

(a) (b) (c) (d)

รูปที่ 5 ลักษณะอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (a) 4 ชั่วโมง, (b) 4 ชั่วโมง, (c) 14 ชั่วโมง, (d) 19 ชั่วโมง

จะเห็นว่า อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุ ซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความถี่และการชาร์จประจุได้ดังรูปที่ 6 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วโดยของอิมพีแดนซ์เวลาการชาร์จประจุที่สามารถแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วการชาร์จประจุกับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วการชาร์จประจุกับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วการชาร์จประจุกับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ



จากการที่อุณหภูมิของตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุ ซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความถี่และการชาร์จประจุได้ดังรูปที่ 6 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วโดยของอิมพีแดนซ์เวลาการชาร์จประจุที่สามารถแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 9 ผลการวัด Raman spectra ของตัวเก็บประจุที่ชาร์จประจุแล้วเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (a) 4 ชั่วโมง, (b) 4 ชั่วโมง, (c) 14 ชั่วโมง, (d) 19 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล น.ส.พรหมพัชร์ ดาวัลต์
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 23 เมษายน พ.ศ.2533 ที่จังหวัดสกลนคร
 ที่อยู่ 133 หมู่ 7 ต.แพด อ.คำตาก้า จ.สกลนคร 47250
 เบอร์โทร 0830948336

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ.2551 จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนอุดรพิชัยรักษ์พิทยา จ.อุดรธานี
- พ.ศ.2552 -2555 จบการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาพลังงานทางเลือก
- พ.ศ.2556-2558 จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- การนำเทคนิคการฉายลำรังสีอิเล็กทรอนิกส์มาพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเมฆาไดโอด

ผลงานวิจัยที่ได้รับตีพิมพ์

- [1] **พรหมพัชร์ ดาวัลต์, สธน ผ่องอำไพ, ปิยะชาติ สดงาม และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง** “ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังที่รับการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON 2013), โรงแรม เฟลิซซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี, 11-13 ธันวาคม พ.ศ. 2556
- [2] **พรหมพัชร์ ดาวัลต์, วิวัฒน์ อธิธิกุลสมาลัย, ชบา สุริยามรรณนธ์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง** “การประยุกต์ใช้วิธีการฉายลำรังสีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดค่า t_r ในอุตสาหกรรมการผลิตไดโอดแบบพื้นตัวเร็วชนิดซิลิคอนพินโครงสร้างเมฆา” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6 (EENET 2014), โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี, 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2557
- [3] ภาสภณ มโนสุกฤตกุล, **พรหมพัชร์ ดาวัลต์, เอกลักษณ์ แฉล้มนงนุช และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง** “การศึกษาลักษณะกระแสรั่วที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่างความยาวรอบรูปและพื้นที่ประสิทธิผลของไดโอดกำลัง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6 (EENET 2014), โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี, 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2557
- [4] **พรหมพัชร์ ดาวัลต์, วศิน ปัญญาเลิศ, ชบา สุริยามรรณนธ์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง** “การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพผลึกเพชรที่สร้างด้วยวิธี HFCVD” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7 (EENET 2015), โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี, 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้