

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงค่าเวลาฟื้นตัวสำหรับซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ใน
กระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรมด้วยวิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอน

REVERSE RECOVERY TIME MODIFICATION OF SILICON PIN POWER DIODES
FOR INDUSTRIAL PROCESSES BY ELECTRON BEAM IRRADIATION



T139561



วิวัฒน์ จึงธนศิริกุล

WIWAT JEUNGTHNASIRIGOOŁ

วพ
๑๗๔๒๗
๑๖๖๘

เลขหมู่.....**139561**
เลขทะเบียน.....
วันเดือนปี.....**110 พ.ย. 2558**

b. 12๗2๕๕๓

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-D-018-111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REVERSE RECOVERY TIME MODIFICATION OF SILICON PIN POWER DIODES
FOR INDUSTRIAL PROCESSES BY ELECTRON BEAM IRRADIATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-EN-D-018-111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงค่าเวลาฟื้นตัวสำหรับซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรมด้วยวิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอน
นักศึกษา	นายวิวัฒน์ จึงธนศิริกุล
รหัสประจำตัว	55610112
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงกระบวนการผลิตไดโอดกำลังชนิดฟื้นตัวเร็วของโรงงานอุตสาหกรรมในส่วนของกรรมวิธีการลดอายุพาหะ จากเดิมที่ใช้วิธีการแพร่อะตอมแพลตตินัม ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาความยุ่งยากต่อกระบวนการผลิตขั้นต่อไป รวมทั้งการกระจายตัวของค่าไฟฟ้าที่ค่อนข้างกว้างและควบคุมได้ยาก งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการใช้รังสีอิเล็กตรอนเข้ามาในกรรมวิธีการลดอายุพาหะ โดยเริ่มต้นจากศึกษาผลกระทบและแนวโน้มที่เกิดขึ้นจากการนำไดโอดกำลังชนิด PIN โครงสร้าง planar ไปฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 50, 100 และ 150 kGy ซึ่งผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่ารังสีอิเล็กตรอนสามารถลดค่าอายุพาหะการเกิด (τ_g) ลงได้ราว 100 เท่า ค่าอายุพาหะการรวมตัวใหม่ (τ_r) สามารถลดลงได้ 10,000 เท่า โดยรังสีจะไปสร้างจุดบกพร่องที่เป็นกับดักประจุ ผลดังกล่าวจะทำให้ค่ากระแสรั่วสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดกระแสแพร่ (diffusion current) ในเนื้อสารซิลิคอนและกระแสการเกิด (generation current) ในบริเวณปลอดพาหะ จากนั้นจึงนำกรรมวิธีฉายรังสีไปประยุกต์กับไดโอดกำลังที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรม EIC, Semiconductor Co., Ltd ซึ่งเป็นซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN โครงสร้างรอยต่อแบบเมซ่า ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าสามารถลดค่าอายุพาหะได้ตามปริมาณรังสีที่ได้รับ โดยผลการทดสอบด้านสวิทชิงด้วยเครื่องทดสอบดีจिटอลมิเตอร์ชี้ว่าสามารถลดค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery time, t_{rr}) ได้จริง โดยที่การฉายรังสีปริมาณ 50kGy สามารถลดค่า t_{rr} จากมากกว่า 2000ns ลงเหลือ ต่ำกว่า 200ns เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไดโอดที่ยังไม่ได้ฉายรังสีกับไดโอดที่ฉายรังสีแล้วพบว่าค่ากระแสรั่วเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 μA เป็นประมาณ 0.3 μA แต่ถือน้อยและไม่มีผลกระทบต่อค่าไฟฟ้าที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดในอุตสาหกรรม (น้อยกว่า 1 μA) ส่วนค่าความต้านทานภายในที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้า (forward voltage drop, V_F) ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยปริมาณรังสีอิเล็กตรอนเช่นกัน ส่วนต่อมาเป็นการใช้กรรมวิธีนี้แก้ไขไดโอดชนิดฟื้นตัวเร็วที่ผ่านการแพร่อะตอมแพลตตินัมแล้ว พบว่าสามารถช่วยลดค่า t_{rr} ลงได้จาก 350ns ลงมาต่ำกว่า 100ns ตามปริมาณการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสารทุกครั้ง

ฉายรังสีและต่ำสุดที่ราว 50ns ที่ปริมาณรังสี 300kGy และยังทำให้การกระจายตัวของค่า t_{rr} ลดลงด้วย เมื่อคำนวณต้นทุนแล้วมีความคุ้มค่า โดยต้นทุนการฉายรังสีต่อหนึ่งพันตัวไดโอดอยู่ที่น้อยกว่า 100 บาท และท้ายที่สุดได้มีการทดลองปรับระดับพลังงานที่ใช้ในการฉายรังสีเป็น 2, 8, และ 12 MeV พบว่าที่ระดับ 8MeV สามารถทำให้ค่า t_{rr} ต่ำที่สุดคือลดจาก 2000ns มาอยู่ในช่วง 100ns



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	REVERSE RECOVERY TIME MODIFICATION OF SILICON PIN POWER DIODES FOR INDUSTRIAL PROCESSES BY ELECTRON BEAM IRRADIATION
Student	Mr. Wiwat Jeungthanasirigool
Student ID.	55610112
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

The purpose of this research is to improve fabrication process of fast recovery power diodes especially in carrier lifetime modification. Nowadays, many industries use platinum atom doped that lead to complicate of following processes and wide distribution in electrical properties.

This research studied electron beam irradiation for carrier lifetime modification. Firstly, we study effect of the irradiation on planar PIN diodes and result indicated that e-beam irradiation can reduce carrier lifetime. The generation carrier lifetime (τ_g) is decreased about 2 orders, and the recombination lifetime is decreased about 4 orders. The irradiation will created lattice defects, which became center traps for kill minority carriers. In contrast, the defect from irradiation leads to diffusion current in Si-bulk and generation current in depletion region, which result in saturation current and increasing in reverse leakage current. Then, e-beam irradiation was applied to manufacturing, EIC semiconductor Co., Ltd. Silicon PIN power diodes, mesa structure, were exposed e-beam irradiation. The result confirmed previous experiment; e-beam irradiation can reduce the lifetime of mesa power diodes and depend on e-beam dose. Switching testing by digital meter show that reverse recovery time (t_{rr}) is decreased after exposed, at 50kGy dose, t_{rr} is decreased from about 2000ns to below 200ns. Leakage current was increased (from about 0.1 μ A to 0.3 μ A), but had no significant with manufacturing standard testing (below 1 μ A). The increasing in series resistance made forward voltage drop risen, which can be control by electron

irradiation dose. Then, e-beam method was applied to reworking of over t_{rr} in fast power diodes that used platinum atom dope. Over t_{rr} diodes can be reduced t_{rr} , t_{rr} was decreased form 350ns to below 100ns and the least 50ns at 300kGy dose. Moreover, the reworking made narrow distribution in t_{rr} . Lastly, irradiation energy levels were experimented at various energy at 2, 8 and 12 MeV. The most effective level is 8MeV, can reduce t_{rr} from 2000ns to below 150ns. Considering this addition process cost us less than 100 Baht per 1000 diodes.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความสามารถจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์หรือ TMEC และพี่ๆ นักวิจัยของศูนย์ TMEC โดยเฉพาะ ดร. จิรวัดน์ปราบเขต ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนความช่วยเหลือทางด้านความรู้ เทคโนโลยีการสร้างและการวัดผลทางไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณวิทยา จักรเพชร และบริษัท อีไอซี เซมิคอนดักเตอร์ หรือ EIC เป็นภาคเอกชน ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ตั้งแต่เริ่มต้น ทั้งเรื่องของงบประมาณ อุปกรณ์ตัวอย่างและเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบที่ใช้ในการศึกษา ตลอดจนเครื่องมือในการวัดผลการทดลองจนสำเร็จ ลุล่วงมาด้วยดี และขอบคุณ คุณศรัณย์ พลชาติ และทีมวิจัยและพัฒนาของ EIC (พี่เอก น้องทิม น้องตอง พี่รัน และพี่น้อง อีกหลายท่านที่ไม่อาจกล่าวนามได้หมด) สำหรับการสนับสนุนและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัยและการทดลอง ตลอดจนพี่น้องทุกคน ภายในห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ KMITL ที่คอยให้ความช่วยเหลือการทำงานและเป็นกำลังใจที่ดีตั้งแต่เริ่มทำการศึกษา

ขอขอบคุณแม่ที่ให้น้ำใจและอบรมบ่มเพาะข้าพเจ้าให้เป็นข้าพเจ้าในทุกวันนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับแม่ ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง พี่ชายและพี่สาวทั้งหมดของข้าพเจ้า และ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

นายวิวัฒน์ จีงธนศิริกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญวิทยานิพนธ์	VI
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูปภาพ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 การทบทวนวรรณกรรม	12
2.2 อายุพาหะส่วนน้อย	13
2.2.1 คำนิยาม	14
2.2.2 อิทธิพลของอายุพาหะต่อลักษณะสมบัติของอุปกรณ์	18
2.2.2.1 ลักษณะสมบัติขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	18
2.2.2.1 ลักษณะสมบัติขณะได้รับไบอัสตรง	18
2.2.2.3 ลักษณะสมบัติด้านการสวิตชิง	19
2.2.3 การวิเคราะห์กระแสการเกิดและการรวมตัวใหม่	19
2.3 ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN	20
2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN	21
2.3.2 การฉีดพาหะระดับสูง	22
2.4 ไดโอดชนิดรอยต่อแบบเมซ่า	23
2.4.1 หลักการพื้นฐาน	24
2.4.2 กระบวนการสร้างเมซ่าไดโอด	26
2.5 การแพร่อะตอมแพลตตินัมทางอุตสาหกรรม	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.5.1 หลักการพื้นฐาน	29
2.5.2 ข้อเสียของการแพร่อะตอมแพลตตินัมในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม	29
2.6 การฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์	30
2.6.1 แหล่งกำเนิดรังสีอิเล็กทรอนิกส์	30
2.6.2 วิธีการฉายรังสี	31
2.6.3 ผลกระทบและความเสียหายจากการฉายรังสี	32
2.7 การทดสอบไดโอดทางอุตสาหกรรม	33
2.7.1 การทดสอบแรงดันไบอัสตรง	33
2.7.1.1 กระแสไฟตรง	33
2.7.1.2 แรงดันตกคร่อมกระแสไฟตรง	33
2.7.2 การทดสอบไบอัสย้อนกลับ	34
2.7.2.1 กระแสทดสอบ	34
2.7.2.2 แรงดันพังทลาย	34
2.7.2.3 กระแสรั่วไหลย้อนกลับและแรงดันย้อนกลับ	34
2.7.2.4 ค่าความแตกต่างแรงดัน	35
2.7.3 การทดสอบด้านการสวิตชิง	35
2.7.3.1 กระแสเสิร์จสูงสุด	35
2.7.3.2 ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ	35
บทที่ 3 การทดลอง	37
3.1 การสร้างไดโอดกำลังชนิด PIN ที่มีโครงสร้างเมซ่า	37
3.2 การฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์	41
3.3 กระบวนการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า	43
3.3.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแสต่ำ	43
3.3.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสูง	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	46
4.1 ผลของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN	46
4.1.1 ผลของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ต่อคุณสมบัติไฟตรง	47
4.1.2 การวิเคราะห์กระแสแบบแยกส่วน	51
4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของไดโอดเมซ่าหลังการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์	53
4.2.1 ผลของปริมาณรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่ไดโอดได้รับ	54
4.2.2 ผลของกระบวนการประกอบไดโอดต่ออุปกรณ์ที่ถูกฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บนแผ่นเวเฟอร์	
4.3 การฉายรังสีเพื่อซ่อมแซมไดโอดที่เสียหายระหว่างขั้นตอนการผลิต	60
4.4 ผลของระดับพลังงานที่ใช้ในการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์	64
บทที่ 5 สรุป	66
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	73
ประวัติผู้เขียน	93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ซึลิกอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่สร้างขึ้นที่ TMEC	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง	5
2.2 ความสัมพันธ์ของระดับของแรงดันและระดับของกระแส สำหรับการใช้งานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในระบบไฟฟ้ากำลัง	6
2.3 รูปลักษณ์ของสวิตช์ไฟฟ้ากำลังในอุดมคติ	7
2.4 รูปลักษณ์ของสวิตช์ไฟฟ้ากำลังในทางปฏิบัติ	7
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของสวิตช์กำลังในทางอุดมคติ	8
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของสวิตช์กำลังในทางปฏิบัติ	9
2.7 โครงสร้างของอุปกรณ์ประเภทรอยต่อซ้อตกี๊ย	10
2.8 โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN	10
2.9 โครงสร้างอุปกรณ์ผสม MPS	11
2.10 ระดับลิ๊กที่เกิดจากการแพร้อตอมทอง แพลตทินัม และการฉายรังสีอิเล็กตรอน	13
2.11 โครงร่างผลึกซิลิคอนและแถบพลังงานที่สัมพันธ์กับโครงร่าง (a) ผลึกที่สมบูรณ์ (b) ผลึกที่มีตำหนิ	14
2.12 แผนผังตำหนิแบบต่างๆ ที่สามารถเกิดในสารกึ่งตัวนำ	15
2.13 (a) ระดับพลังงานปนเปื้อนโลหะ และ (b) ระดับพลังงานโครงร่างมีตำหนิของซิลิคอน	16
2.14 กลไกการรวมตัว-การเกิดของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น (a) ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง และ (b) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	17
2.15 แนวโน้มตามทฤษฎีของอายุของพาหะ ต่อแรงดันตกคร่อมไบอัสตรงของไดโอดกำลังแบบ PIN กับตัวแปรของความหนาของบริเวณอินทรินซิก	19
2.16 แสดงการกระจายตัวของพาหะและการไหลของกระแสภายใต้การฉีกระดับต่ำของซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง PIN	21
2.17 แสดงการกระจายตัวของพาหะและการไหลของกระแสภายใต้การฉีกระดับสูงของซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง PIN	22
2.18 โครงสร้างไดโอด (a) ไดโอดแบบเมซ่า (b) ไดโอดแบบธรรมดา	24
2.19 (a) เป็นโครงสร้างไดโอดชนิดเมซ่า (b) เป็นโครงสร้างไดโอดแบบพลาเนอร์	25
2.20 ลักษณะรอยต่อและบริเวณปลอดพาหะ	26
2.21 การเรียงแผ่นในเตาแพร่สารเจือ	27
2.22 ขั้นตอนการสร้างไดโอดแบบเมซ่า	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
2.23 (a) แสดงการระบายสารละลายแพลตตินัม (b) แสดงเตาสำหรับการแพร่อะตอม แพลตตินัม	29
2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีอิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้าที่ฟิลาเมนต์	31
2.25 แผนผังความสัมพันธ์การกระจายตัวของความเสียหาย (N_d) ของโครงร่างผลึกกับ ความลึกหลังการของรังสีที่ทะลุผ่าน	32
2.26 แสดงการทำงานของเครื่องฉายรังสีอิเล็กตรอน	32
2.27 แสดงการวัดค่า t_{rr}	36
3.1 ร่างส่งถาดที่วางอุปกรณ์เข้าส่วนของการฉายรังสี	42
3.2 เครื่องวัดภาพสเปกตรัม (Spectrophotometer) รุ่น Genesys 20	42
3.3 เครื่องวัดและวิเคราะห์ที่คุณลักษณะทางไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำรุ่น Agilent B1500A	43
3.4 เครื่องโพรบชิ้นงาน (Probe) แบบหัวเข็มพร้อมกล่องจุลทรรศน์รุ่น Cascade Microtech Model M150	44
3.5 เครื่องมือวัดระบบดิจิทัลรุ่น TVR6000	45
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟไปข้างหน้าของไดโอดที่แต่ละปริมาณ การฉายรังสีอิเล็กตรอน	47
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมขณะไบอัสแรงดันไฟไปข้างหน้าและปริมาณ การฉายรังสีอิเล็กตรอน	48
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมภายในของไดโอดและปริมาณการฉายรังสี อิเล็กตรอน	48
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟย้อนกลับของไดโอดที่แต่ละปริมาณ การฉายรังสีอิเล็กตรอน	49
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟย้อนกลับ	50
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสย้อนกลับและค่าความกว้างของบริเวณ ปลอดพาหะ	52
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการเกิดและแรงดันย้อนกลับ	53
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของไดโอดและแรงดันไฟไปข้างหน้า	54
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิมิต์และปริมาณการฉายรังสี	55
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของไดโอดและแรงดันไฟย้อนกลับ	55
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างต่างความจุไฟฟ้าย่อยต่อของไดโอดและแรงดันไฟย้อนกลับ	56
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดและแรงดันไฟย้อนกลับ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับและปริมาณรังสีอิเล็กทรอนิกส์ก่อนการประกอบไดโอด โดยวัดด้วยดีจิตอลมิเตอร์รุ่น TVR6000	58
4.14 ความสัมพันธ์ค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับกับแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าตกคร่อมและปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ ของไดโอดหลังการประกอบไดโอด โดยวัดด้วยดีจิตอลมิเตอร์รุ่น TVR6000	59
4.15 ความสัมพันธ์ค่าแรงดันพังทลายกับกระแสรั่วไหลย้อนกลับ และปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ ของไดโอดหลังการประกอบไดโอด วัดที่กระแสทดสอบ $5\mu\text{A}$ และแรงดันย้อนกลับ 600V	59
4.16 ไดโอดกำลังชนิดพื้นผิวเร็วที่ประกอบตัวถึงหุ่น Axial lead	61
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับและปริมาณการฉายรังสี ด้วยการวัดด้วยเครื่องดีจิตอลมิเตอร์ TVR6000	61
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไปข้างหน้าและปริมาณการฉายรังสีที่กระแสทดสอบ 1mA	62
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันพังทลายและปริมาณการฉายรังสี ที่กระแสทดสอบ $5\mu\text{A}$	63
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับและปริมาณการฉายรังสีที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 1000V	63
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานที่ใช้ในการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์และการฟื้นตัวย้อนกลับที่ปริมาณรังสี 100kGy	64
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานที่ใช้ในการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์และกระแสรั่วไหลย้อนกลับที่แรงดันย้อนกลับ 1050V	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อโลกเรากำลังเผชิญหน้ากับวิกฤตการณ์พลังงานที่ค่อยๆ ก่อตัวขึ้นและทวีคูณความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่พลังงานฟอสซิลหรือปิโตรเลียมที่ค่อยๆ หมดไปและไม่มีทางที่จะกำเนิดขึ้นมาได้ทันความต้องการการใช้พลังงานของโลกอนาคต ไม่เพียงแต่กลุ่มประเทศมหาอำนาจทางอุตสาหกรรมเท่านั้นที่มีการบริโภคพลังงานอย่างมหาศาล ยังมีประเทศมหาอำนาจใหม่เช่น จีน และอินเดีย หรือแม้แต่กลุ่มประเทศกำลังพัฒนาที่มีการเพิ่มขึ้นของการบริโภคพลังงานมากขึ้นในทุกๆ ปีอย่างรวดเร็ว ทำให้มนุษยชาติต้องหันมาหาแหล่งพลังงานทางเลือกอื่น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม หรือแม้กระทั่งพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งไม่ว่าจะมุ่งพัฒนาพลังงานใดเข้ามาทดแทน

และเป็นที่ยอมรับว่าการจัดการพลังงานเหล่านี้ มักจะมีส่วนที่เรียกว่า “ระบบแปลงผันพลังงาน” (inverter system) ซึ่งเป็นการแปลงผันพลังงานระหว่างไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งพลังงานบางส่วนจะมีการสูญเสียไปอย่างสิ้นเปลืองหากระบบดังกล่าวไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอ โดยระบบการแปลงผันพลังงานเป็นที่เข้าใจกันดีว่า จำเป็นต้องใช้งานที่ความถี่ที่สูงเพื่อประสิทธิภาพที่ดีและการประหยัดพลังงานในภาคการแปรผันพลังงาน ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำไฟฟ้ากำลัง (power semiconductor devices) นอกเหนือไปจากคุณสมบัติด้านการรองรับกำลังงานหรือกระแสที่สูงและการต้านทานการไหลของไฟฟ้าในทิศทางย้อนกลับหรือแรงดันพังทลายแล้ว ยังต้องคำนึงถึงเรื่องของการตอบสนองต่อความถี่ที่ทันต่อความถี่สวิตซิง (switching frequency) การแข่งขันกันของผู้ผลิตต่ออุปกรณ์กลุ่มนี้ก็ต้องเพิ่มขีดศักยภาพของตัวเองให้สามารถผลิตได้ตรงตามความต้องการของลูกค้า ยิ่งลูกค้าถัดไปเป็นผู้ผลิตสินค้าอุปกรณ์ไฟฟ้าลำดับถัดไป ยิ่งต้องการอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติที่ตรงตามความต้องการ ความคงทน และที่สำคัญไม่แพ้กันก็คือการกระจายตัวของค่าไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติสวิตซิง เนื่องจากจะเป็นปัญหาในกระบวนการออกแบบอย่างมาก แต่ในกระบวนการผลิตที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อความถี่สวิตซิงที่มีการใช้การแพร่อะตอมแพลตินัมนั้น ถึงแม้จะเป็นวิธีการที่แพร่หลายแต่จุดของวิธีการนี้คือการใช้ความร้อนในการแพร่ของอะตอม นั้นจะทำให้คุณสมบัติของการสวิตซิงมีการกระจายตัวค่อนข้างสูงภายในล็อตการผลิต (production lot) และวิธีนี้เองนั้นก็ไม่สามารถวัดคุณสมบัติการสวิตซิงที่แท้จริงได้จนกว่ากระบวนการสร้างอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิคอนจะเสร็จสิ้น (wafer fabrication) จึงเป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้นงานที่หลุดช่วงของค่าที่ต้องการหรืออาจจะเสียโดยทั้งหมดได้ และเป็นไปได้ว่าการแพร่อะตอมแพลตินัมด้วยความร้อนอาจจะทำให้อะตอมของแพลตินัม

แพร่กระจายอย่างไม่สม่ำเสมออันจะทำให้อุปกรณ์แต่ละตัวมีค่าไฟฟ้าที่ต่างกันจนควบคุมให้อยู่ในสเปกได้ยากลำบาก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ ต้องการที่จะพัฒนากระบวนการสร้างไดโอดชนิดเมฆาเพื่อรองรับการใช้งานในระบบอินเวอร์เตอร์สำหรับการจัดการพลังงานในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ตลอดจนระบบการแปลงผันพลังงานในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟารุ่นใหม่ ที่นิยมใช้ระบบอินเวอร์เตอร์ (inverter system) ซึ่งการใช้งานในระดับนั้นจำเป็นต้องใช้ไดโอดกำลังที่สามารถรองรับการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าระดับสูง การสวิตช์ที่ความถี่สูง และการสูญเสียพลังงานในการสวิตช์ซึ่งต่ำ โดยการใช้วิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอนเข้ามาเพื่อแทนที่หรือใช้ร่วมกับการแพร่อะตอมแพลตตินัมในการปรับปรุงคุณสมบัติการสวิตช์ของไดโอดกำลังที่ผลิตด้วยโครงสร้างเมฆา ซึ่งการแพร่อะตอมแพลตตินัมที่เป็นวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติการสวิตช์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันของโรงงานอุตสาหกรรมไดโอด

โดยต้นแบบของงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตไดโอดกำลังให้มีประสิทธิภาพสูงในขณะที่ต้นทุนการผลิตที่ต่ำลงและมีผลผลิต (Yield) ที่สูงขึ้น สามารถควบคุมอายุพาหะเพื่อให้ค่า “เวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ” ต่ำและอยู่ในช่วงที่ตรงตามการใช้งาน โดยผลข้างเคียงที่จะส่งผลกระทบต่อ การเสื่อมถอยของประสิทธิภาพในการใช้งานด้านการต้านการไหลของกระแสในทิศทางย้อนกลับ และระดับแรงดันตกคร่อมขณะกระแสไหลในสถานะ “On state” จะถูกพิจารณาเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลระหว่างประสิทธิภาพการสวิตช์ที่ดีไวขึ้นและสมรรถภาพการใช้งานด้านอื่นที่จะถดถอยลง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การฉายรังสีอิเล็กตรอนลงบนตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสามารถลดอายุพาหะส่วนน้อย (minority carrier lifetime) ลงได้ เพิ่มขีดความสามารถให้อุปกรณ์มีการตอบสนองต่อความถี่สูงของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้วงจรสวิตช์ในการแปลงผันพลังงาน โดยการฉายรังสีอิเล็กตรอนจะสร้างให้เกิดความเสียหายขึ้นที่แลตทิซของโครงสร้างผลึกซิลิคอนหรือเกิดเป็นจุดบกพร่องขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งจุดบกพร่องเหล่านี้จะก่อให้เกิดกับดักประจุ (trap) ซึ่งจะคอยจับพาหะทำให้อายุพาหะส่วนน้อยลดลงได้ และส่งผลให้คุณสมบัติการสวิตช์ดีขึ้น ค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) น้อยลงและควบคุมได้ตามปริมาณของรังสีที่อุปกรณ์ได้รับ แต่การสร้างจุดบกพร่องดังกล่าวอาจส่งผลต่อการถดถอยของสมรรถนะการใช้งานขณะ “On state” และ “Off state”

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การปรับปรุงอายุพาทะที่นำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายแนวทาง แนวทางหนึ่งคือการทำให้พาทะนำไฟฟ้าถูกดักจับได้โดยกับดักประจุ (traps) นั้นหมายถึงการสร้างกับดักประจุขึ้นในแถบพลังงานของซิลิคอน แนวทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้คือวิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอนแก๊โดโดทกำลังชนิด PIN เนื่องจากรังสีอิเล็กตรอนมีพลังงานสูง เมื่อทะลุผ่านจะทำความเสียหายแก่ผลึกของอุปกรณ์ในระดับโครงสร้างอะตอมทำให้เกิดจุดบกพร่อง (defect) ขึ้นในโครงสร้างแลททิซ โดยจุดบกพร่องนี้จะแสดงคุณลักษณะของกับดักประจุคอยดักจับพาทะนำไฟฟ้าในเนื้อสาร (bulk) ของซิลิคอนทำให้อายุพาทะสั้นลงซึ่งกำหนดอายุพาทะควรจะทำได้ได้จากการควบคุมปริมาณการฉายรังสี (irradiation dose) เพราะปริมาณจุดบกพร่องจะแปรผันตามปริมาณรังสีที่ได้รับ และด้วยการทำความเสียหายแก่โครงสร้างผลึกในระดับแลททิซซึ่งส่งผลสร้างความถดถอยต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์ ดังนั้นจำเป็นต้องหาจุดที่พอดีระหว่างค่าอายุพาทะที่ลดลงได้ และความถดถอยที่เกิดขึ้น

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา การสร้างและปรับปรุง การทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้รังสีอิเล็กตรอนสำหรับการควบคุมค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่มีโครงสร้างของเมฆา และผลกระทบต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้านอื่นๆ ของอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตไดโอดกำลังของโรงงานอุตสาหกรรม โดยการศึกษาจะเริ่มต้นการศึกษาที่ผลกระทบของรังสีต่ออุปกรณ์รอยต่อพีเอ็น ซึ่งใช้ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่สร้างโดยเทคโนโลยีของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center) หรือ TMEC ร่วมกับเครื่องมือฉายรังสีอิเล็กตรอนของศูนย์ฉายรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (0) จากนั้นจึงขยายผลเข้าสู่ไดโอดกำลังที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในส่วนของภาคอุตสาหกรรมนี้ได้รับการสนับสนุนด้านองค์ความรู้กระบวนการผลิตและเครื่องมือที่ใช้ในการการสร้างและการวัดผลจากบริษัท อีไอซี เซมิคอนดักเตอร์ จำกัด (EIC Semiconductor Co.,Ltd)

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอขั้นตอนการศึกษางานวิจัยนี้ โดยแบ่งการนำเสนอออกเป็น 5 บทหลักๆ ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการเกริ่นนำเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับที่มาของปัญหา สมมติฐาน และแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ตลอดจนวางขอบเขตของการศึกษาให้ชัดเจนถึงงานวิจัยที่ทำมา เพื่อให้การศึกษามีแนวทางที่ชัดเจนและตอบโจทย์ปัญหาที่เสนอไว้ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี เป็นการทำความเข้าใจและปูพื้นฐานแก่ผู้อ่านถึงทฤษฎีที่ใช้ในสนับสนุนสมมติฐาน ให้รายละเอียดเกี่ยวกับหลักการที่ใช้ในการทดลอง อภิปรายผลการทดลองและความสอดคล้องต่อทฤษฎี ซึ่งจะทำให้ผู้อ่านได้เข้าใจเกี่ยวกับการทำงานและการสร้างอุปกรณ์ขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง ซึ่งในบทนี้จะอธิบายหลักการการทำงานของไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบเมซ่า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมและมีความง่ายในการผลิตจริง แต่การศึกษาไม่ค่อยที่แพร่หลายในปัจจุบัน ตลอดจนหลักการทำงานของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นวิธีการลดอายุพาหะที่งานวิจัยนี้นำเสนอ

บทที่ 3 การทดลอง บทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีและหลักการจากบทที่ 2 มาใช้ในการสร้างไดโอดกำลังชนิด PIN ที่มีโครงสร้างเมซ่าด้วยการสนับสนุนเครื่องมือและวัสดุในการผลิตจากบริษัท อีไอซี เซมิคอนดักเตอร์ จำกัด และการนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไปฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

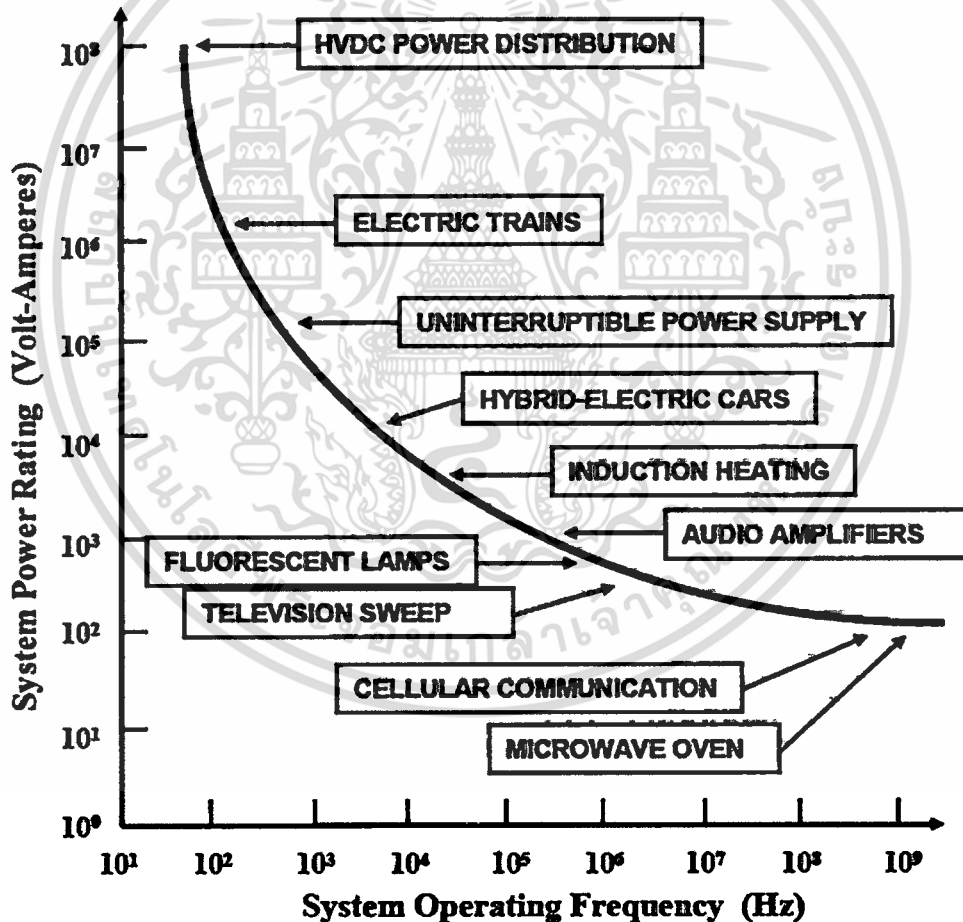
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย บทนี้จะเน้นไปที่การนำทฤษฎีที่ได้ลงรายละเอียดในบทที่ 2 มาอธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นจริงจากการทดลองในบทที่ 3

บทที่ 5 สรุป เป็นบทสุดท้ายที่สรุปผลทั้งหมดเพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานจริง และแนวทางการทำวิจัยเพื่อต่อยอดต่อไป

บทที่ 2

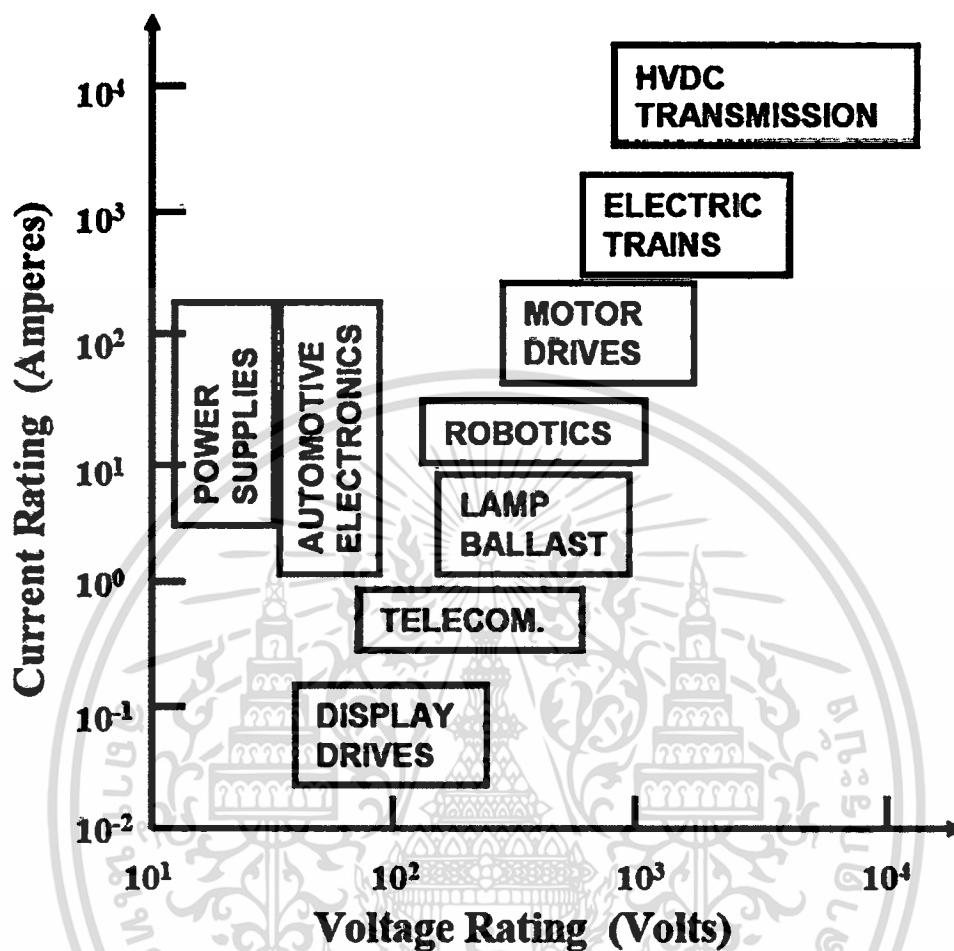
ทฤษฎี

แม้ว่าทฤษฎีของรอยต่อ p-n จะถูกศึกษากันมาเป็นเวลานานหลายทศวรรษแล้ว แต่การศึกษาส่วนมากมักจะมุ่งเน้นไปเพื่ออุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ประเภทวงจรรวม แต่แนวโน้มของเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังสูงบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังเติบโตเพิ่มมากขึ้น ทฤษฎีของรอยต่อ p-n ในส่วนของคุณสมบัติการนำกระแสสูง และการตอบสนองต่อความถี่ที่กระแสสูงจึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจให้มากขึ้นเพื่อการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.1 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

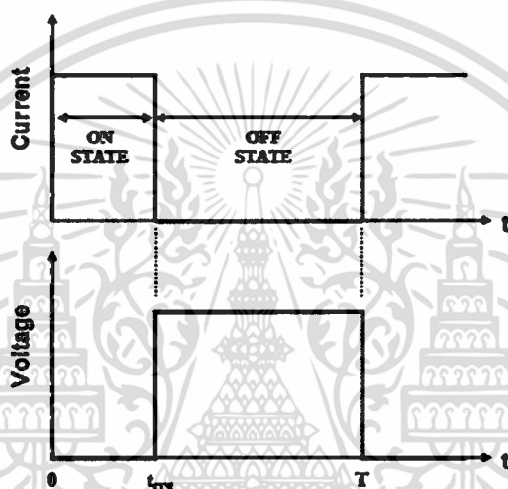


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของระดับของแรงดันและระดับของกระแส สำหรับการใช้งานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในระบบไฟฟ้ากำลัง

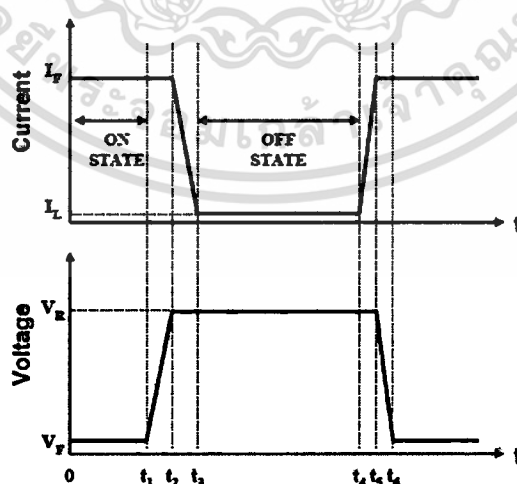
ตั้งแต่การเข้ามาแทนที่การใช้งานหลอดสุญญากาศของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในทศวรรษ 1950s ในด้านการควบคุมกำลังงานระดับต่างๆ ดังรูปที่ 2.1 การใช้งานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทกำลังนี้เป็นฟังก์ชันผกผันกันระหว่างความถี่และการรองรับกำลังงานของระบบ ในระบบกำลังงานที่สูงเช่น การส่งกำลังไฟฟ้าแรงดันสูง หรือระบบขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้า ที่ต้องสามารถรองรับกำลังงานระดับเมกะวัตต์ที่ระดับความถี่ต่ำ ซึ่งสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูงขึ้นไปอีก ระดับกำลังงานที่อุปกรณ์ต้องรองรับจะลดลง เช่น อุปกรณ์จำพวกความถี่ไมโครเวฟที่อาจจะต้องรองรับกำลังงานเพียงแค่ 100 วัตต์ ซึ่งทุกวันนี้การใช้งานดังกล่าวเกือบทั้งหมดจะทดแทนด้วยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังชนิดซิลิคอน

สวิตช์ไฟฟ้ากำลังอุดมคติ

ในทางอุดมคติความต้องการในการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าคือการสูญเสียกำลังงานในการเปิดปิดการไหลของกระแสเป็นศูนย์ จะเห็นได้จากรูปที่ 2.2 เมื่อสถานะนำกระแสหรือ “on-state” กระแสจะไหลได้เต็มที่ และแรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์ทำให้เมื่อคำนวณกำลังงานที่ตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ และเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจากนำกระแสเป็นหยุดนำกระแสหรือ “off-state” กระแสจะหยุดไหล ในทันทีขณะที่แรงดันตกคร่อมนั้นจะสูงขึ้นทันทีเช่นกัน และเช่นเดียวกันคือกำลังงานที่ตกคร่อมสวิตช์จะเป็นศูนย์ ดังนั้นจะไม่มี การสูญเสียกำลังงานในแต่ละรอบการเป็นสถานะ (cycle) ในสวิตช์เลย



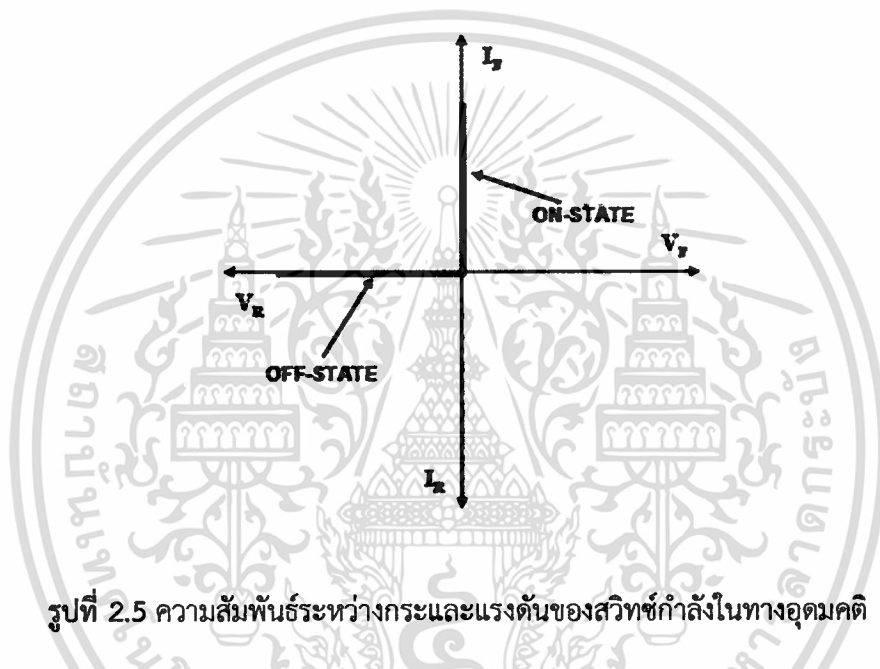
รูปที่ 2.3 รูปคลื่นของสวิตช์ไฟฟ้ากำลังในอุดมคติ



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นของสวิตช์ไฟฟ้ากำลังในทางปฏิบัติ

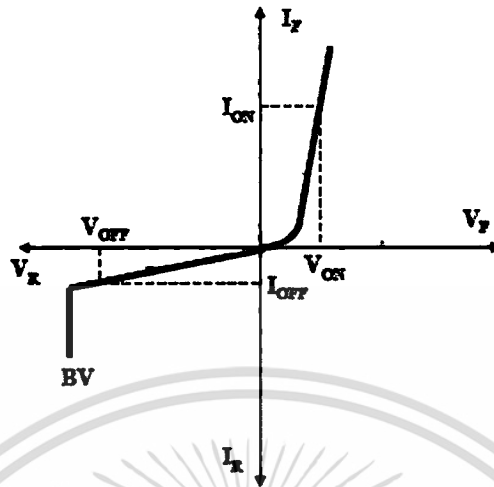
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ในขณะที่สวิตช์นำกระแส นั้นจะมีค่าแรงดันตกคร่อม (forward voltage drop; V_F) อยู่เล็กน้อย การเปลี่ยนสถานะจากนำกระแสเป็นหยุดนำกระแสหรือกลับกัน จะไม่สามารถเปลี่ยนสถานะได้ทันทีจะมีช่วงเวลาที่กระแสและแรงดันค่อยๆเปลี่ยนในทิศทางที่ตรงข้ามกัน ความไม่สมบูรณ์ทั้งสองประการนั้นทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานในสวิตซ์ไฟฟ้กำลังขึ้น ซึ่งทั้งนี้เนื่องมาจากตลอดระยะเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมา ยังไม่มีทางที่จะทำให้อุปกรณ์นั้นมีคุณสมบัติแบบสวิตซ์ในอุดมคติ ดังรูปที่ 2.5 ได้เลย



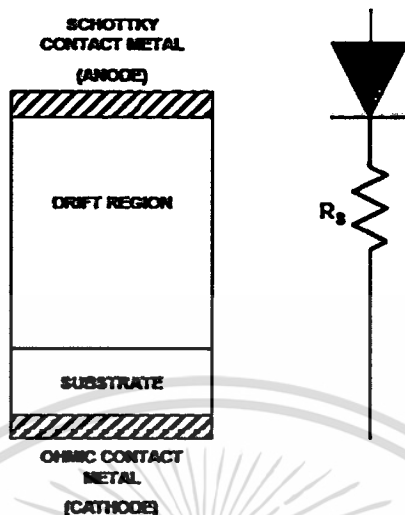
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของสวิตซ์กำลังในทางอุดมคติ

อุปกรณ์ที่สามารถสร้างเป็นสวิตซ์ไฟฟ้กำลังได้จริงจะมีคุณลักษณะกระแสต่อแรงดันดังรูปที่ 04 แรงตกคร่อมขณะนำกระแส V_{ON} หรือ V_F จะเป็นส่วนหนึ่งของการสูญเสียกำลังงานในขณะนำกระแส กระแสรั่วไหลย้อนกลับ I_{OFF} หรือ I_R เมื่อเกิดแรงดันต้านทานการไหลของกระแสจะเป็นส่วนของการสูญเสียกำลังงานขณะหยุดนำกระแส นอกจากนี้ในช่วงเวลาสั้นๆ ระหว่างการเปลี่ยนสถานะจะเกิดการนำกระแสสูงมากเพื่อถ่ายเทประจุคงค้างที่ถูกสร้างขึ้นขณะที่นำกระแส และช่วงเวลาดังกล่าวนี้อเองเรียกว่า ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery time; t_{rr}) ซึ่งหากช่วงเวลานี้ยาวนาน จะยิ่งทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานงานในอุปกรณ์สวิตซ์มากขึ้น



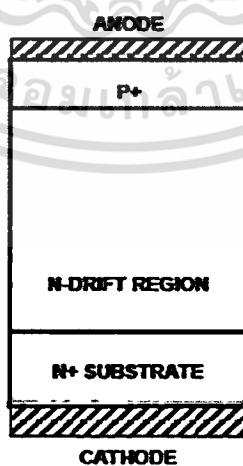
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของสวิตช์กำลังในทางปฏิบัติ

อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังประเภทพหุขั้วเดียว (unipolar devices) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่การนำกระแสที่อาศัยพาหะ “อิเล็กตรอน” หรือ “โฮล” อย่างใดอย่างหนึ่ง ด้วยเหตุนี้การเปลี่ยนสถานะจึงมีการสูญเสียกำลังงานน้อย เพราะมีการถ่ายเทประจุที่มีประสิทธิภาพมากกว่าอุปกรณ์ประเภทพหุขั้วคู่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนิยมใช้อุปกรณ์ชนิดรอยต่อ ช็อดทกี (Schottky junction) ซึ่งอาศัยกำแพงศักย์ของโลหะ-สารกึ่งตัวนำเป็นตัวควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า แต่เพื่อให้อุปกรณ์สามารถต้านทานการไหลของกระแสที่แรงดันสูง (มากกว่า 100 โวลต์) การออกแบบบริเวณรอยเลื่อน (drift region) ให้กว้างมากพอ นั้นเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ จึงจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ประเภทพหุขั้วคู่ เช่น ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN เข้ามาทดแทน แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่สามารถทดแทนในส่วนของการเปลี่ยนสถานะที่ความถี่สูงมากได้ดีเท่าอุปกรณ์ประเภทพหุขั้วเดียว



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอุปกรณ์ประเภทรอยต่อช็อตกีย์

เมื่อการออกแบบให้บริเวณรอยเลื่อนของช็อตกีย์ให้กว้างมากพอรองรับแรงดันนั้นเป็นไปได้ การใช้งานที่แรงดันสูงเกิน 100 โวลต์ จึงจำเป็นต้องเบนมาหาทางอุปกรณ์ประเภทพหุขั้ว (bipolar devices) ซึ่งอาศัยพาหะทั้ง อิเล็กตรอน และโฮล ในการนำกระแสไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้ที่นิยมใช้กันมากคือ ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ซึ่งมีชั้น I เป็นบริเวณรอยเลื่อนซึ่งสามารถออกแบบให้รองรับแรงดันที่สูงได้สะดวกและเป็นไปได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งสามารถออกแบบให้สามารถต้านทานแรงดันได้สูงถึงระดับสิบลักโวลต์



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่อย่างไรก็ตามข้อดีของอุปกรณ์ประเภทนี้คือความเร็วในการเปลี่ยนสถานะที่ช้าเนื่องจากมีกระแสพื้นตัวย้อนกลับที่สูง การเปลี่ยนสถานะนี้เองทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าไปในอุปกรณ์ แต่ด้วยข้อดีของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่รองรับแรงดันสูงมากได้จึงทำให้เกิดการพัฒนาให้อุปกรณ์ประเภทนี้สามารถทำงานที่การเปลี่ยนสถานะที่ความถี่สูงได้ งานวิจัยต่างๆ จึงมุ่งเน้นไปที่การลดอายุพาหะ (carrier lifetime) ที่เป็นตัวแปรสำคัญของค่าเวลาพื้นตัวย้อนกลับ ด้วยการสร้างจุดบกพร่อง (defects) ขึ้นภายในเนื้อสารซิลิคอน เพื่อเป็นศูนย์กลางกับดักประจุ (center traps) คอยดักจับพาหะส่วนน้อยให้มีอายุพาหะที่ลดลง

นอกจากนี้ มีการรวมข้อดีของทั้งรอยต่อข้อดีก็ยและซิลิคอนไดโอดชนิด PIN เข้าด้วยกันเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ขึ้นคือ MPS (Merged PIN Schottky) ขึ้น โดยอาศัยข้อดีในการรองรับแรงดันด้านทานย้อนกลับที่สูงมากของโครงสร้าง PIN และการเปลี่ยนสถานะการนำกระแสที่เร็วมากของ Schottky จึงทำให้ได้อุปกรณ์ชนิดใหม่ที่มีข้อดีของทั้งสองโครงสร้างรวมอยู่ด้วยกัน และต่างชดเชยข้อดีของอีกโครงสร้างหนึ่งด้วยเช่นกัน แต่อุปกรณ์ดังกล่าวนี้โครงสร้างค่อนข้างซับซ้อนและนำมาผลิตจริงยุ่งยากกว่าโครงสร้างของ PIN



รูปที่ 2.9 โครงสร้างอุปกรณ์ผสม MPS

ดังจะเห็นว่าการแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ในวงจรไฟฟ้ากำลังนั้นกำลังเน้นไปที่การเพิ่มขีดความสามารถด้านการรองรับกำลังงานที่สูงขึ้น ขนาดของการนำกระแสที่ใหญ่ขึ้น การต้านทานการไหลของกระแสขณะไบอัสย้อนกลับหรือแรงดันพังทลายที่สูง และส่วนที่สำคัญคือความสามารถในการ

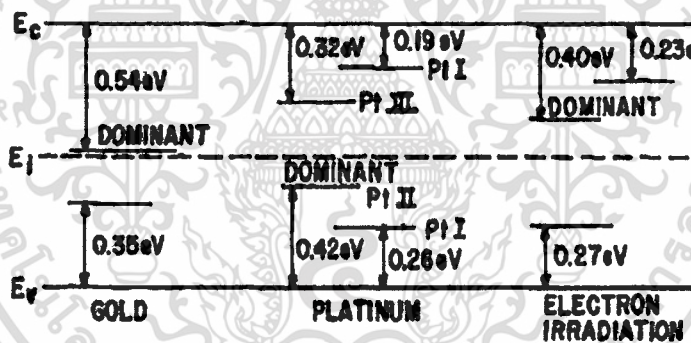
ตอบสนองการเปลี่ยนสถานะนำกระแสเป็นหยุดนำกระแส หรือกลับกันที่ต้องทำได้เร็วมากขึ้น เพื่อประสิทธิภาพรวมของวงจรไฟฟ้าที่จะช่วยเรื่องของการสิ้นเปลืองพลังงานที่น้อยลง จึงจำเป็นต้องพิจารณาหลักการต่างที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ในวงจรไฟฟ้ากำลัง

2.1 การทบทวนวรรณกรรม

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นว่า อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่จะนำมาใช้ในวงจรไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องปรับปรุงในส่วนของคุณสมบัติการฟื้นตัวให้สามารถตอบสนองต่อความถี่สวิทช์ที่สูงๆได้ ซึ่งตามที่ได้ศึกษากันมาก่อนหน้านี้จะพบว่าค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse Recovery Time) หรือ t_{rr} จะมีการแปรผันตรงกับค่าอายุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ [1, 2] ดังนั้นการศึกษาและวิจัยยุคต่อมาจึงเป็นการวิจัยเพื่อหาวิธีลดค่าอายุพาหะในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยการปรับปรุงอายุพาหะส่วนในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในยุคแรกนั้นเป็นการใช้อะตอมของทองแพร่เข้าไปในเนื้อซิลิคอนด้วยความร้อนสูงราว 900 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเมื่อปี 1975 M.D Miller [3, 4] ได้พิสูจน์ถึงการแพร่อะตอมแพลตตินัมที่อุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าอายุพาหะส่วนน้อย ณ อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ไมโครวินาที ถึง 10 นาโนวินาที สำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทไฟฟ้ากำลัง และได้พบว่าศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ในแถบพลังงานอยู่สองตำแหน่ง คือที่ 0.26 eV ได้แถบนำไฟฟ้าสำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิด n และอีกตำแหน่งอยู่ที่ 0.32 eV เหนือแถบวาเลนซ์สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิด p และเมื่อเปรียบเทียบกับการแพร่อะตอมของทอง ที่ซึ่งทั้งแพลตตินัมและทองมีกระบวนการแพร่ที่เหมือนกัน แต่สิ่งที่ต่างกันของทั้งสองชนิดสารเจือคือระดับลึกในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิด n ซึ่งทองจะไปสร้างระดับลึกที่ตำแหน่ง $E_c - 0.54$ eV ใกล้กึ่งกลางของแถบพลังงาน แต่ในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิด p ตำแหน่งของทองจะอยู่ใกล้กับตำแหน่งของแพลตตินัมคือ 0.35 eV เหนือแถบวาเลนซ์ ซึ่งระดับของแพลตตินัมอยู่ตื้นกว่าระดับของทองทำให้อัตราการเกิดที่ต่ำกว่า ซึ่งยังผลให้กระแสรั่วของการแพร่อะตอมแพลตตินัมต่ำกว่าการแพร่อะตอมทองด้วยที่อุณหภูมิการใช้งาน การฉีดระดับสูงจะทำให้ค่าอายุพาหะสั้นลงกว่าการฉีดระดับต่ำประมาณสองถึงสามเท่าตัว ซึ่งปัจจัยระดับของการฉีดนั้นไม่มีผลเมื่อแพร่อะตอมทอง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแพลตตินัมจะให้ประสิทธิภาพด้านการสวิทช์ซึ่งดีกว่าที่การฉีดระดับสูง ต่อมาในปี 1977 S. Lingkon [5] ได้ออกมานำเสนอการใช้พัลลาเดียม (palladium) แทนทองคำและแพลตตินัม เนื่องจากความง่ายในการควบคุมอายุพาหะและกระแสรั่วที่ต่ำกว่าหลายสิบเท่า เมื่อเทียบกับทอง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากตำแหน่งในแถบพลังงานอยู่ค่อนข้างสูง การหาจุดสมดุลระหว่างค่าเวลาฟื้นตัวกลับกับค่าแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสจะทำได้ยากเมื่อเทียบกับการแพร่อะตอมแพลตตินัมหรือทอง

การฉายรังสีเริ่มมีเข้ามามีบทบาทกับการควบคุมค่าเวลาการฟื้นตัวในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังมากขึ้น ในปี 1977 B.J. Baliga [6-9] ได้นำเสนอการควบคุมอายุพาหะระหว่างวิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอน ซึ่งมี

การวิเคราะห์ตำแหน่งระดับลิกระดับของกาศายรังสีอิเล็กตรอนไว้ที่ 0.40eV ได้แถบนำไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าสามารถควบคุมอายุพาหะได้ดีไม่ต่างกับการแพร่อะตอม แต่ข้อดีคือการควบคุมสมดุลกับแรงดันตกค่อมขณะนำกระแส ซึ่งยังทำได้ไม่ดี แต่ด้วยข้อดีของกระบวนการฉายรังสีที่ไม่ยุ่งยากเท่าการแพร่อะตอมที่ยังคงต้องใช้ระบายสารละลายที่มีอะตอมที่ต้องการลงบนแผ่นเวเฟอร์ การฉายรังสีจึงยังคงเป็นที่สนใจกับการศึกษาซึ่งในปีเดียวกันนั้นเอง R.O. Carlson [10] ได้นำเสนอผลของการฉายแกมมาเพิ่มเติมเข้ามาเปรียบเทียบกับรังสีอิเล็กตรอน ซึ่งการศึกษาที่ยืนยันว่าการฉายรังสีนั้นจะมีต้นทุนของกระบวนการผลิตที่ต่ำกว่า ได้ผลิตผลที่สูงกว่า และการกระจายตัวของค่าพารามิเตอร์ที่แคบกว่า อีกทั้งสามารถนำกลับมาแก้ไขใหม่ได้ นอกจากนี้ยังมีการเสนอแนะนำอุปกรณ์ที่ฉายรังสีไปอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อกระแสรั่วไหลและเสถียรภาพของอุปกรณ์ในระยะยาว นอกจากนี้ยังมีการนำการฉายรังสีนิวตรอน [11] ที่ให้ผลการฉายได้ใกล้เคียงกับรังสีอิเล็กตรอนแต่ว่ากระบวนการฉายค่อนข้างยุ่งยาก ไม่สามารถทำกับอุปกรณ์ที่ประกอบเข้ากับโลหะแล้วเนื่องจากอาจจะเกิดปฏิกิริยาการแผ่รังสีที่เป็นอันตรายออกมา ซึ่งยืนยันอีกทางว่ารังสีอิเล็กตรอนน่าสนใจกว่า



รูปที่ 2.10 ระดับลิกระดับที่เกิดจากการแพร่อะตอมทอง แพลตตินัม และการฉายรังสีอิเล็กตรอน [6]

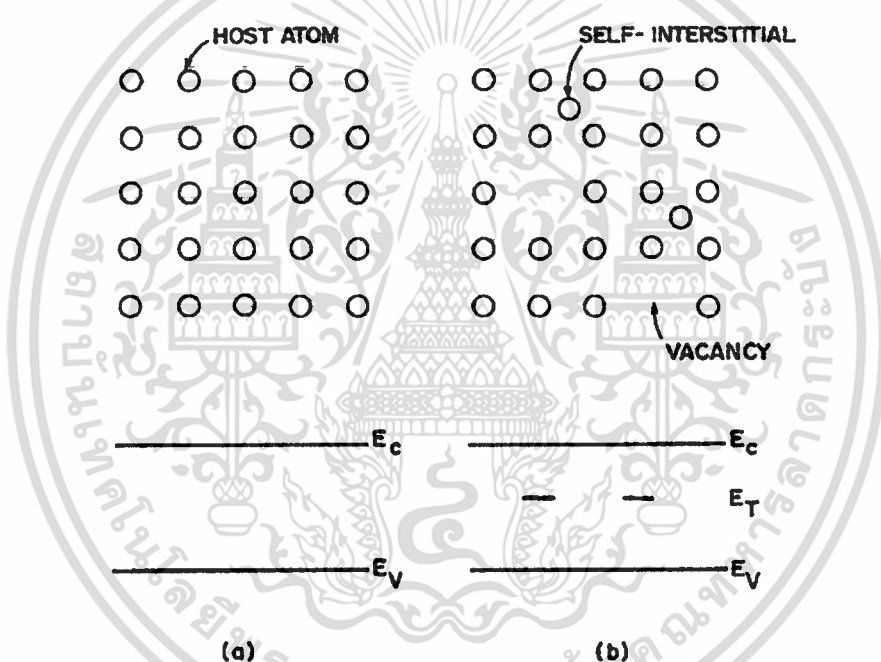
2.2 อายุพาหะส่วนน้อย (Minority carrier lifetime)

อายุพาหะเป็นพารามิเตอร์หนึ่งบ่งชี้ถึงความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ ซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือ “ตำหนิ (defect)” จะเป็นศูนย์กลางการเกิด-รวมตัว (generation-recombination center, G-R) ของพาหะส่วนเกินในสารกึ่งตัวนำ โดยอายุพาหะส่วนเกินนี้แบ่งออกเป็นสองกลุ่มได้แก่ อายุการรวมตัว (recombination lifetime: τ_r) เป็นแนวคิดที่อธิบายการลดลงของพาหะที่เป็นผลมาจากการรวมตัว และอายุการเกิด (generation lifetime : τ_g) จะมีผลต่อพาหะส่วนน้อยที่อยู่ในบริเวณปลอดพาหะในช่วงที่อุปกรณ์ได้รับการไบอัสย้อนกลับ ซึ่งทั้งสองกลุ่มดังกล่าวใช้ในการอธิบาย

ความพยายามเข้าสู่สมดุลของอุปกรณ์เมื่อมีการไบอัสทั้งย้อนกลับและไบอัสตรง และยังมีผลต่อคุณสมบัติด้านการสวิตช์อีกด้วย

2.2.1 ตำหนิ (Defect)

ตำหนิในที่นี้หมายถึงอะตอมที่มีสิ่งปนเปื้อนในโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปแท่งผลึก หรืออาจเกิดจากความตั้งใจเช่น อะตอมสารเจือซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนระดับตื้น (shallow level), ศูนย์กลางการรวมตัวซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนระดับลึก (deep level) มีผลให้อายุพาหะในอุปกรณ์ลดลงและสามารถทำให้สภาพต้านทานของฐานรองซิลิคอนเพิ่มขึ้นได้



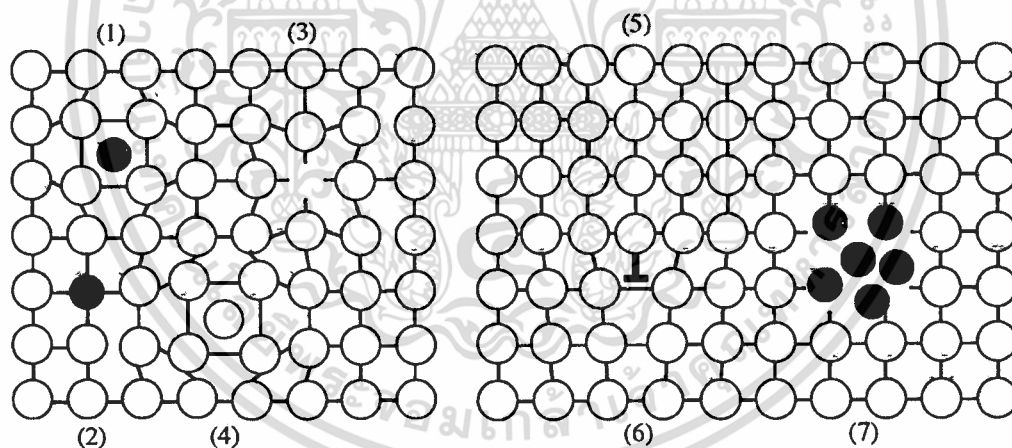
รูปที่ 2.11 โครงร่างผลึกซิลิคอนและแถบพลังงานที่สัมพันธ์กับโครงสร้าง (a) ผลึกที่สมบูรณ์ (b) ผลึกที่มีตำหนิ

ในผลึกที่สมบูรณ์มีลักษณะแสดงเป็นแผนผังดังในรูปที่ 2.11(a) อะตอมข้างเคียงทั้งหมดอยู่ในตำแหน่งซึ่งมีโครงสร้างอะตอมที่เหมาะสม และผลึกที่ไม่มีทั้งอะตอมเจือปน และโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะแถบพลังงานของผลึกดังกล่าวประกอบด้วย แถบนำไฟฟ้า และแถบวาเลนซ์ ไม่มีพลังงานระดับภายในแถบช่องว่างพลังงาน แต่ผลึกจริงไม่เช่นนั้น ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์ โครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์อย่างเช่นอะตอมเจือปนแปลกปลอม ทั้งนี้อะตอมเจือปนแปลกปลอมอาจเกิดจากความ

จงใจเกิดเพื่อเป็นอะตอมสารเจือ และไม่ตั้งใจให้เกิดขึ้น เช่น โครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการสร้างแท่งผลึกและในระหว่างกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์

โครงสร้างที่มีตำหนิบางอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เนื่องจากขึ้นกับกระบวนการสร้าง ในหลักการแล้วเป็นไปได้ที่จะขจัดอะตอมเจือปนแปลกปลอม และโครงสร้างที่มีตำหนิได้ทั้งหมดให้หมดไป เมื่อพิจารณาในด้านเทอร์โมไดนามิกส์ การแทรกตัวระหว่างอะตอม และตำแหน่งว่าง แสดงในรูปที่ 2.11b พูดย่างๆ ในผลึกที่สมบูรณ์อย่างในรูปที่ 2.11a นั้นในด้านเทอร์โมไดนามิกส์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เพราะการแทรกตัวระหว่างโครงร่างอะตอมเกิดจากอะตอมโครงร่างใกล้เคียงของอะตอมซิลิคอนในผลึกซิลิคอนเคลื่อนที่จากตำแหน่งแทนที่โครงร่างปกติไปการแทรกตัวระหว่างโครงร่างอะตอมจึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น

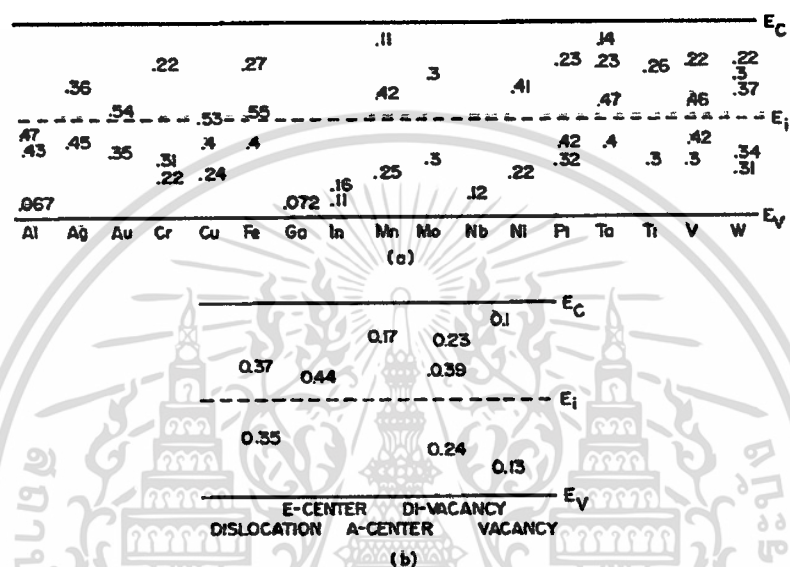
นอกจากนี้ ตำแหน่งว่าง และการแทรกตัวระหว่างโครงร่างอะตอม แล้ว ยังมีตำหนิแบบอื่นๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นตำหนิแบบต่างๆ มีลักษณะแสดงเป็นแผนผังดังในรูปที่ 2.12 ตำหนิแบบ (1) อะตอมเจือปนแปลกปลอมแทรกตัวระหว่างโครงร่างอะตอม (foreign interstitial) เช่น ออกซิเจนในซิลิคอน, (2) อะตอมเจือปนแปลกปลอมแทนที่ (foreign substitution) เช่น อะตอมสารเจือ, (3) ตำแหน่งว่าง, (4) การแทรกตัวระหว่างโครงร่างอะตอม, (5) stacking fault, (6) edge dislocation, และ (7) กลุ่ม



รูปที่ 2.12 แผนผังตำหนิแบบต่างๆ ที่สามารถเกิดในสารกึ่งตัวนำ

ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ประกอบด้วย แถบนำไฟฟ้า และแถบวาเลนซ์ซึ่งถูกแยกออกจากกันด้วยช่องว่างพลังงาน ไม่มีระดับพลังงานภายในแถบช่องว่างพลังงาน เมื่อไรที่ผลึกรูปเดี่ยวมีอะตอมแปลกปลอม หรือตำหนิในผลึก ทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นในช่องว่างพลังงาน ดังแสดงเส้น E_T ในรูปที่ 2.11b โดยแต่ละเส้นทำหน้าที่แทนแต่ละตำหนิ ตำหนิเช่นนี้ปกติการเรียกว่า ศูนย์กลางการเกิด-รวมตัว (generation-recombination (G-R) center) ซึ่งเป็นระดับลึกในแถบพลังงาน

และเป็นพลังงานสิ่งแปลกปลอมระดับลึก (deep energy level impurity) หรือเรียกสั้นๆ ว่า สิ่งแปลกปลอมระดับลึก (deep-level impurity) ซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะส่วนเกินในสารกึ่งตัวนำ และเป็นศูนย์กลางการรวมตัวเมื่อความหนาแน่นพาหะต่ำกว่าระดับสมดุลในบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของไดโอดรอยต่อแบบพี-เอ็น หรือตัวเก็บประจุแบบ MOS

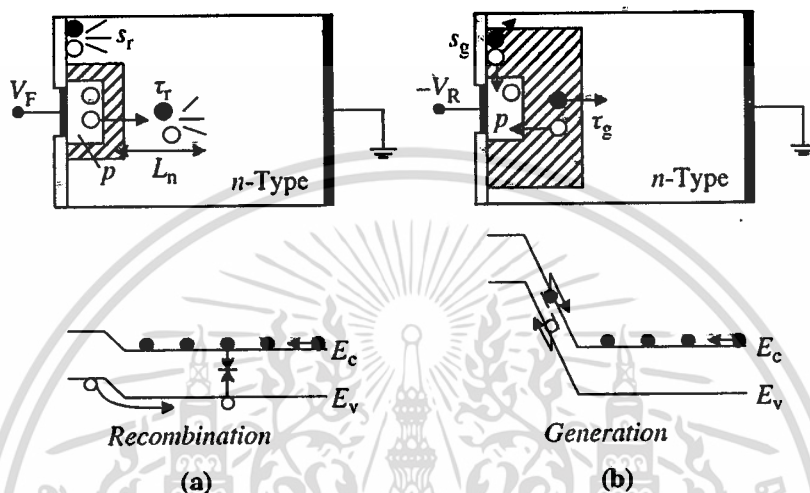


รูปที่ 2.13 (a) ระดับพลังงานปนเปื้อนโลหะ และ (b) ระดับพลังงานโครงสร้างมีตำหนิของซิลิคอน [12]

จากรูปที่ 2.13a แสดงระดับพลังงานของสิ่งปนเปื้อนโลหะชนิดต่างๆ ในซิลิคอน และในรูปที่ 2.13b เป็นระดับพลังงานของโครงสร้างผลึกไม่สมบูรณ์ จะเห็นได้ว่าระดับพลังงานที่ปรากฏมีความแตกต่างกันชัดเจน และจากรูปที่ 2.13b และรูป 2.10 แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีอิเล็กตรอนน่าจะทำให้เกิดจุดบกพร่องชนิดช่องว่าง Di-Vacancy นั้นเอง

ถึงแม้ว่าแนวความคิดของอายุที่ปรากฏดูเหมือนจะเข้าใจง่าย แต่น่าเสียดายเกิดปัญหาขึ้นกับวิธีการวัดที่ต่างกัน ทำให้ได้ค่าที่ต่างกัน ถึงแม้จะเป็นวัสดุ หรือโครงสร้างอุปกรณ์เดียวกัน โดยส่วนใหญ่แล้วสาเหตุของความแตกต่างเหล่านี้มาจากพื้นฐาน และไม่ก็เกิดความขาดแคลนเนื่องจากของการวัด ความยากในการกำหนดอายุนั้นสามารถบอกถึงคุณสมบัติของพาหะภายในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ รวมถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเอง ถึงแม้ว่าโดยปกติแล้วค่าตัวเลขออกมาเป็นค่าเดี่ยว แต่การวัดเป็นค่าเฉลี่ยของพฤติกรรมของพาหะที่มีอิทธิพลมาจากผิวหน้า, รอยสัมผัสร่วม, กำแพงศักย์ และความหนาแน่นของพาหะ นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากคุณสมบัติของวัสดุสารกึ่งตัวนำ และค่าอุณหภูมิด้วย ยังมีประเด็นอื่นที่เข้าใจยากในการกำหนดเทรมของอายุยังเกี่ยวข้องกับทั้งอายุการรวมตัว (recombination

lifetimes) และอายุการเกิด (generation lifetimes) ความแน่นอน ความเข้ใจระยการแพรของพาหะ ส่วนน้อยน้ันสัมพันธ์กับอายุ และมีความเท่าเทียมกันของตัวแปรซึ่งมีผลต่อการแสดงลักษณะอุปกรณ์ หรือ วัสดุ เช่นกัน



รูปที่ 2.14 กลไกการรวมตัว-การเกิดของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น (a) ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง และ (b) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

อายุพาหะสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ อายุการรวมตัว และ อายุการเกิด แนวความคิดของอายุการรวมตัว (recombination lifetime: τ_r) ใช้เมื่อพาหะส่วนเกินค่อยๆลดลงจากผลของการรวมตัว ส่วนอายุการเกิด (generation lifetime : τ_g) ใช้เมื่อพาหะจำนวนเล็กน้อยในบริเวณปลอดพาหะขณะอุปกรณ์ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และอุปกรณ์พยายามเข้าสู่ภาวะสมดุล ในระหว่างเกิดการรวมกันของตัวคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล หลังจากเลยช่วงเวลาเฉลี่ยการรวมตัว แสดงในรูปที่ 2.14 (a) ในทำนองเดียวกัน อายุการเกิดเป็นเวลาเฉลี่ยที่คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลเกิด แสดงในรูปที่ 2.14 (b) เมื่อเหตุการณ์การรวมตัว และการเกิด ในเนื้อสาร จะแสดงลักษณะสมบัติจาก τ_r และ τ_g และเมื่อเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิว จะแสดงลักษณะสมบัติจากความเร็วการรวมตัวพื้นผิว (surface recombination velocity : s_r) และความเร็วการเกิดพื้นผิว (surface generation velocity : s_g) ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 2.14 ดังนั้นในการวัดค่าอายุพาหะเป็นค่าอายุยังผลเสมอ ซึ่งเป็นส่วนประกอบในเนื้อสารและพื้นผิว

2.2.2 อิทธิพลของอายุของพาหะต่อลักษณะสมบัติของอุปกรณ์

ศูนย์กลางการรวมตัวมีอิทธิพลต่อทุกลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ ทั้งลักษณะสมบัติขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ, ลักษณะสมบัติขณะได้รับไบอัสตรง, และลักษณะสมบัติด้านการสวิตช์ ระหว่างกระบวนการขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ และไบอัสตรง

2.2.2.1 ลักษณะสมบัติขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ [13]

ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ หรือ สถานะหยุดนำกระแส ของอุปกรณ์ทุกชนิด ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของรอยต่อพีเอ็น ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ ดังนั้น จึงอิทธิพลจากการเกิดใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในชั้นปลอดพาหะ รวมถึงความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อก็เกิดจากผลของกระบวนการนี้ เรียกว่า กระแสการเกิด-การรวมตัวใหม่ (generation-recombination current: J_{gr}) ซึ่งขึ้นกับขนาดของแรงดันไบอัสย้อนกลับตลอดความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (W) และ อาจแสดง ดังนี้

$$J_{gr} = e \int_0^W G dx = \frac{qn_i W}{\tau_{sc}} \quad (2.1)$$

โดยความหนาแน่นกระแสรวม (J_R) ที่ไหลผ่านรอยต่อที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ เป็นผลรวมของ J_0 และ J_{gr}

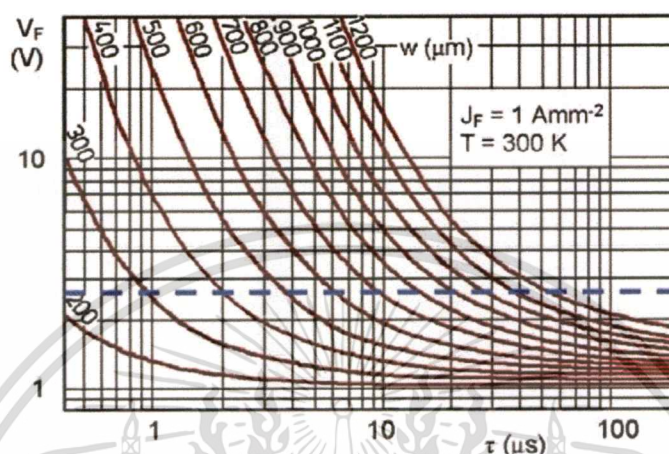
$$J_R = n_i^2 q \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{1}{p_{p0}} + \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{p_{n0}} \right) + \frac{qn_i W}{\tau_{sc}} \quad (2.2)$$

เพื่อให้กระแสย้อนกลับมีค่าน้อยพอ ซึ่งจำเป็นต้องให้อายุของพาหะการเกิดมีค่าสูง (τ_{sc}) จากการศึกษาวิเคราะห์ (6) พบว่าระดับพลังงานควรอยู่ห่างจากตำแหน่งของระดับเฟอร์มิในวัสดุอินทรีนซิก (E_i) ซึ่งควรอยู่นอกส่วนกลางของแถบช่องว่างพลังงาน

2.2.2.2 ลักษณะสมบัติขณะได้รับไบอัสตรง

ลักษณะสมบัติขณะได้รับไบอัสตรง หรือ สถานะนำกระแสของอุปกรณ์ ขึ้นอยู่กับอายุของพาหะเป็นอย่างมาก (โดยเฉพาะอายุของพาหะในขณะฉีดระดับสูง เนื่องจากเงื่อนไขการฉีดระดับสูงเกิดขึ้นเมื่ออุปกรณ์อยู่ในสถานะนำกระแสปริมาณมาก) ซึ่งการลดอายุของพาหะทำให้ความเข้มข้นของพาหะส่วนเกินลดลง และด้วยเหตุนี้แรงดันตกคร่อมในสถานะนำกระแสจึงเพิ่มขึ้น ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมไบอัสตรง และอายุของพาหะ ในไดโอดกำลัง แสดงในรูปที่ 2.15 ดังนั้น ค่าอายุของพาหะ

ยาวเป็นสิ่งที่ต้องการ ดูได้จากกราฟนี้ ค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุดที่ยอมรับได้ดูจากเส้นประที่ขีด จากเส้นนี้สามารถหาอายุของพาหะน้อยสุดสำหรับอุปกรณ์แต่ละความหนาได้



รูปที่ 2.15 แนวโน้มตามทฤษฎีของอายุของพาหะ ต่อแรงดันตกคร่อมไบอัสตรงของไดโอดกำลังแบบ PIN กับตัวแปรของความหนาของบริเวณอินทรินซิก [14]

2.2.2.3 ลักษณะสมบัติด้านการสวิตชิง

ลักษณะสมบัติด้านการสวิตชิง หรือ ทรานเซียนท์ ระหว่างกระบวนการขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ และไบอัสตรง สำหรับอุปกรณ์สวิตชิงมีความต้องการให้มีช่วงเวลาสภาวะนำกระแส และการหยุดนำกระแสสั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเวลาการหยุดนำกระแสขึ้นกับอายุของพาหะเป็นอย่างมาก เนื่องจากบริเวณปลอดประจุพาหะที่รอยต่อพีเอ็นจะเพิ่มขึ้นหลังการลดความเข้มข้นของพาหะไปสู่ค่าสมดุลความร้อนพลศาสตร์ ระหว่างกระบวนการทรานเซียนท์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังอายุการฉีดยุติระดับสูงควรได้รับการพิจารณาอย่างถี่ถ้วน จากประเด็นนี้เอง อายุของพาหะที่สั้นมากๆ เป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับอุปกรณ์สวิตชิงความเร็วสูง ในทางตรงข้าม การลดลงของอายุของพาหะมีผลให้ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในสถานะนำกระแสเลวลง เพราะฉะนั้น ควรจะการเลือกทั้งโครงสร้าง และเทคโนโลยีที่ดี เพื่อจะได้ค่าที่ทั้งสองเหมาะสม

2.2.3 การวิเคราะห์กระแสการเกิดและการรวมตัวใหม่ [15]

ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าอายุพาหะส่วนน้อยนั้น บางครั้งเราไม่สามารถทำได้โดยตรงได้ เนื่องจากเรื่องของอุปกรณ์และความเหมาะสมต่ออุปกรณ์ แต่อาจสามารถวิเคราะห์เพื่อพิจารณาแนวโน้มได้ด้วย

วิธีการวิเคราะห์แบบแยกกระแสการเกิดและกระแสแพร่ออกจากกระแสย้อนกลับ โดยความสัมพันธ์ของกระแสย้อนกลับอธิบายได้ดังนี้

$$J_A = J_{dA} + \frac{qn_i W_A}{\tau_g} \quad (2.3)$$

โดยที่ J_A คือความหนาแน่นกระแสของไดโอด ภายใต้การไบอัสย้อนกลับ ซึ่งประกอบด้วยกระแสสองส่วน คือได้แก่กระแสแพร่ (diffusion current density), J_{dA} ที่มีแหล่งกำเนิดในเนื้อสารซิลิคอน และอีกส่วนหนึ่งเรียกว่ากระแสการเกิด (generation current density), J_{gA} ที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะซึ่งเห็นได้ว่าแปรผันตรงกับควมกว้างของบริเวณปลอดพาหะภายใต้แรงดันไบอัสย้อนกลับ (depletion region, W_A) และแปรผกผันต่อค่าอายุพาหะการเกิด ซึ่งในการวิเคราะห์ที่ไดโอดอุดมคติแล้ว กระแสในส่วนนี้จะถูกละทิ้ง ว่ากระบวนการเกิดพาหะนั้นน้อยมากภายใต้เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) แต่หากมีการรบกวนสภาวะอุดมคติของไดโอดเช่นการเติมอะตอมแพลตตินัม ทำให้อายุพาหะการเกิดสั้นลงจะมีผลโดยตรงให้กระแสส่วนนี้มีผลเด่นชัดขึ้นมา ส่วนกระแสการแพร่นั้นสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$J_{dA} = \frac{qn_i^2}{N_B} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_r}} \quad (2.4)$$

ซึ่ง จะพบว่า J_{dA} นั้นหาได้จากกราฟความสัมพันธ์กระแสแรงดัน (I-V Characteristics) ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์อายุพาหะการรวมตัวใหม่ (recombination lifetime, τ_r) ได้โดย

$$\tau_r = \left(\frac{qn_i^2}{J_{dA} N_B} \sqrt{D_n} \right)^2 \quad (2.5)$$

โดย J_{dA} คือจุดตัดแกน Y ของคุณลักษณะกระแสต่อแรงดัน

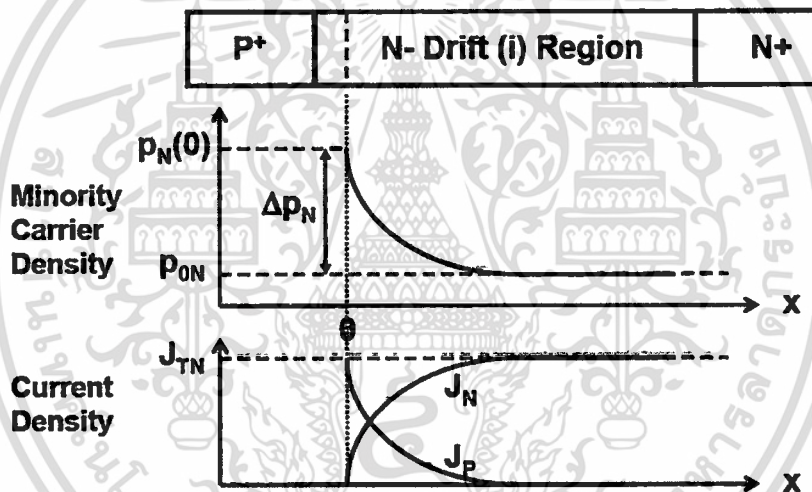
2.3 ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN

ด้วยเหตุผลด้านการใช้งานในวงจรไฟฟ้ากำลังสูง ที่จำเป็นต้องรองรับการป้อนแรงดันย้อนกลับที่สูงมาก บางครั้งอาจสูงหลายพันโวลต์ ดังนั้นโครงสร้างของอุปกรณ์จำเป็นต้องรองรับการใช้งานด้านการไหลของกระแสได้ ไดโอดชนิด PIN จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการด้านทานการไหลของกระแสที่แรงดันสูง โดยมีชั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) หรือสารกึ่งตัวนำที่มีการเจืออะตอมสารเจือ

ด้วยความเข้มข้นน้อยมากๆ แทรกระหว่างชั้น P เข้มข้น และชั้น N เข้มข้น หรือเรียกชั้น I นี้อีกอย่างว่า บริเวณลอยเลื่อน (drift region) โดยการออกแบบซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN จำเป็นต้องคำนึงถึงการรองรับแรงดันสูงได้โดยที่กระแสรั่วที่ต่ำในสภาวะ หยุดนำกระแส และสภาพการนำกระแสสูงในสภาวะ นำกระแส

2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN

รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของ PIN ใน 1 มิติ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาของชั้น I จะถูกออกแบบไว้เพื่อรักษาแรงดันทั้งหลายภายใต้สมมติฐานที่ว่าบริเวณปลอดพาหะจะขยายไปยังบริเวณ N^+ แรงดันตกคร่อมขณะที่อุปกรณ์นำกระแสจะขึ้นอยู่กับแรงดันตกคร่อมในส่วนบริเวณลอยเลื่อนนี้



รูปที่ 2.16 แสดงการกระจายตัวของพาหะและการไหลของกระแสภายใต้การฉีดระดับต่ำของซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง PIN

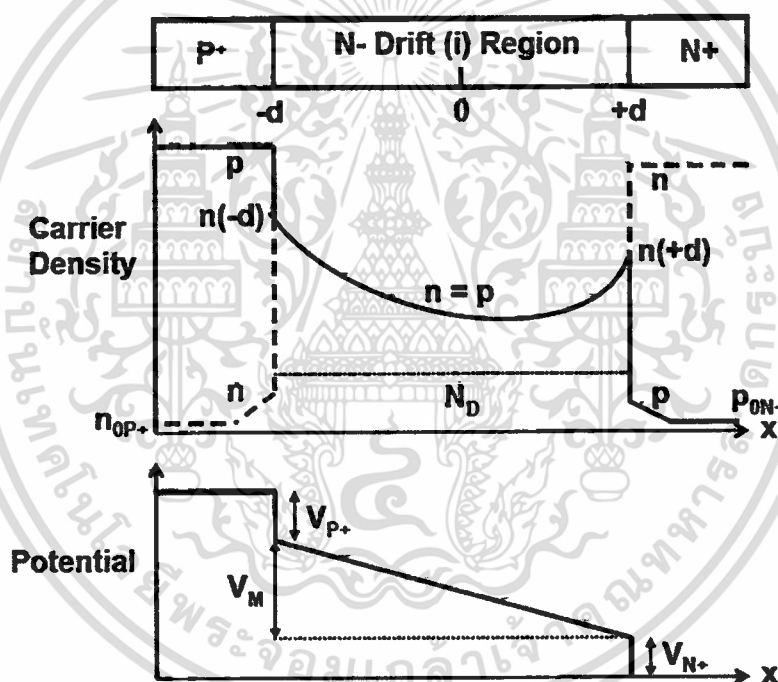
โดยการวิเคราะห์กระแสที่ไหลผ่าน PIN ขณะนำกระแส สามารถกระทำได้ผ่านทางกลไกการส่งผ่านกระแส 3 กลไกได้แก่

1. ที่การนำกระแสระดับต่ำมาก การไหลของกระแสจะเป็นผลเด่นของกระบวนการรวมตัวใหม่ภายในบริเวณปลอดพาหะ
2. ที่การนำกระแสระดับต่ำ การไหลของกระแส เป็นผลเด่นมาจากการแพร่ของพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปยังบริเวณลอยเลื่อน เรียกว่า กระแสการแพร่ (diffusion current)

3. ที่การนำกระแสสูง การไหลของกระแสถูกควบคุมโดยความเข้มข้นสูงของทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ในบริเวณลอยเลื่อน เรียกว่า กระแสการฉีดระดับสูง (high-laser injection current)

2.3.2 การฉีดพาหะระดับสูง [16-17]

โดยทั่วบริเวณด้านเอ็นในซิลิคอนไดโอดกำลังมักจะมี ความเข้มข้นสารเจือในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ เพื่อต้านทานแรงดันย้อนกลับได้สูง แต่ในสภาวะ นำกระแส แรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของการฉีดพาหะส่วนน้อยเพิ่มขึ้นตามจนทำให้ความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยมีมากกว่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือเดิม (N_D) จะเรียกสภาวะนี้ว่า การฉีดพาหะระดับสูง (high injection)



รูปที่ 2.17 แสดงการกระจายตัวของพาหะและการไหลของกระแสภายใต้การฉีดระดับสูงของซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง PIN

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและค่าอายุพาหะในการฉีดพาหะระดับสูงสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$J_T = \frac{2qn_a d}{\tau_{HL}} \quad (2.6)$$

ค่าความต้านทานของบริเวณลอยเลื่อน (drift region) สามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นพาหะเคลื่อนที่ (n_a) กับค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮล

$$R_i = \frac{2d}{q(\mu_n + \mu_p)n_a} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.6 และ 2.7 จึงทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันตกคร่อมบริเวณลอยเลื่อน ได้คือ

$$V_M = J_T R_i = \frac{4d^2}{(\mu_n + \mu_p)\tau_{HL}} \quad (2.8)$$

และเมื่อความหนาแน่นของกระแสที่ไหลขณะ นำกระแส จึงเป็นดังสมการ

$$J_T = \frac{2qD_a n_i}{d} F\left(\frac{d}{L_a}\right) e^{qV_{ON}/2kT} \quad (2.1X)$$

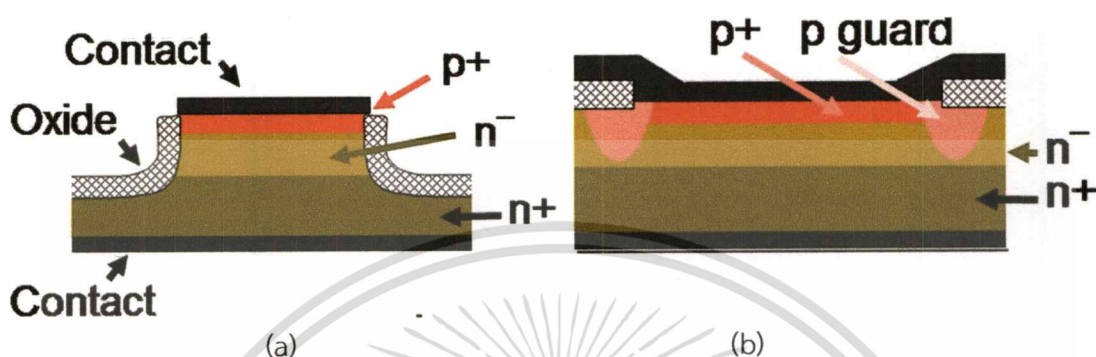
นั่นหมายความว่า ค่าแรงดันตกคร่อมบริเวณลอยเลื่อนจะเพิ่มขึ้นหากมีการลดลงของค่าอายุพาหะและแรงดันตกคร่อมขณะ นำกระแส จะประกอบด้วยแรงดันตกคร่อมบริเวณขอบรวมกับบริเวณลอยเลื่อน ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสขณะ นำกระแส (J_T) และ แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแส ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN สามารถคำนวณได้จากคือ

$$V_{ON} = \frac{2kT}{q} \ln \left[\frac{J_T d}{2qD_a n_i F(d/L_a)} \right] \quad (2.10)$$

2.4 ไดโอดชนิดรอยต่อแบบเมซ่า

ตามที่เรารู้กันดีเกี่ยวกับวิธีการสร้างไดโอดแบบทั่วไปจะใช้แพร่สารเจือเข้าไปเฉพาะส่วนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น ณ จุดที่ต้องการ แต่วิธีการนี้อาจไม่เหมาะสมในปัจจุบันเนื่องจากต้นทุนที่สูงเนื่องจากต้องใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มาก ทำให้ความสามารถทางด้านการแข่งขันในตลาดอุปกรณ์เดี่ยว (discrete devices) ลดลง ในขณะที่กระบวนการผลิตไดโอดแบบรอยต่อเมซ่า (Mesa structure) จะใช้

กระบวนการสร้างที่ประหยัดกว่าและผลิตได้คราวละมากๆ เนื่องจากสามารถแพร่สารเจือได้ง่ายกว่าดังจะกล่าวต่อไป

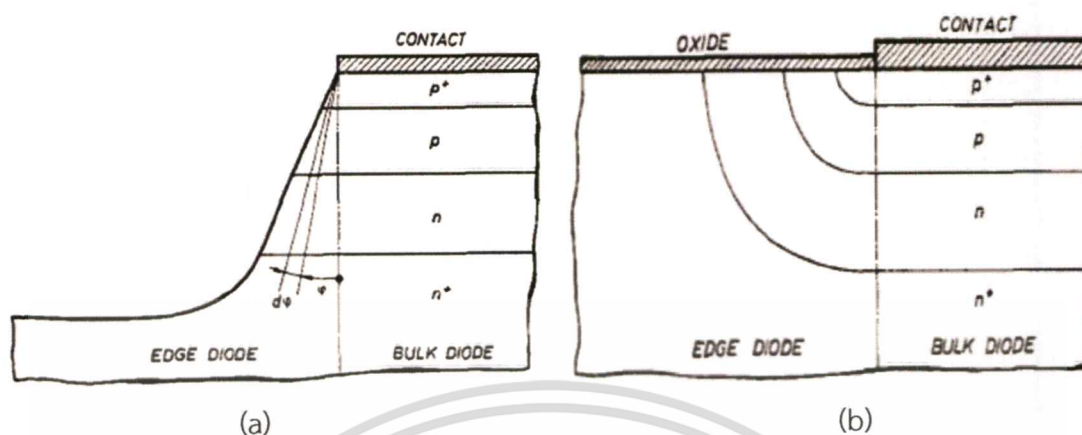


รูปที่ 2.18 โครงสร้างไดโอด (a) ไดโอดแบบเมซ่า (b) ไดโอดแบบธรรมดา

2.4.1 หลักการพื้นฐาน [17-19]

ไดโอดแบบเมซ่านี้อย่างคงอาศัยทฤษฎีรอยต่อพีเอ็นในการทำงานทั้งด้านไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ เพียงแต่กระบวนการสร้างจะแพร่สารเจือทั่วทั้งแผ่นตั้งแต่เริ่มแรกเพื่อสร้างรอยต่อ และใช้การกัดร่องเมซ่าให้ลึกถึงรอยต่อพีเอ็นเพื่อแบ่งไดโอดแต่ละตัวออกจากกันขณะที่ยังอยู่บนแผ่นเวเฟอร์ แต่การแบ่งตัวไดโอดด้วยการกัดนี้จะทำให้เกิดกระแสรั่วสูง เนื่องจากอาจจะมีสิ่งแปลกปลอมเป็นสื่อนำไฟฟ้า และอาจทำให้เกิดการพังทลายก่อนจะถึงจุดพังทลายของฐานรองเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่สูงบริเวณขอบ [18-19] ดังนั้นจึงต้องมีชั้นฉนวนมาปิดรอยต่อพีเอ็นบริเวณร่องเมซ่า เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว

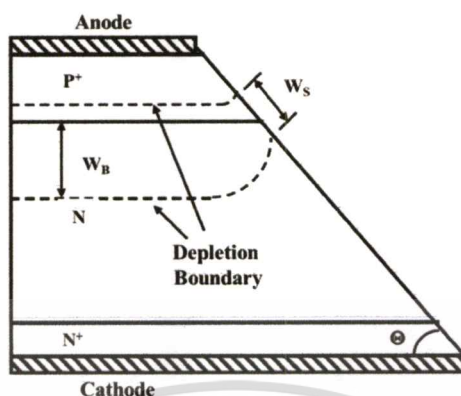
การทำงานของไดโอดแบบเมซ่าจะต่างจากไดโอดทั่วไป ในบริเวณร่องเมซ่า จากรูปที่ 2.8 ไดโอดทั้งจะมีผิวหน้าที่เรียบเสมอกัน แต่มีการแพร่สารเจือแบบการแพร่เฉพาะที่ด้วยการใช้หน้ากากป้องกันการแพร่ แต่ไดโอดชนิดเมซ่าจะแพร่ด้วยวิธีแพร่ทั้งแผ่นพร้อมๆกันจำนวนมาก แล้วใช้การกัดร่องแบ่งแต่ละตัวแต่ร่องเมซ่านี้ ไม่เพียงแค่ว่าใช้แบ่งอุปกรณ์แต่ละตัวออกจากกันบนแผ่นเวเฟอร์ แต่ยังใช้ในการเพิ่มความสามารถต้านทานการไหลของกระแสเมื่ออุปกรณ์ถูกไบอัสด้วยแรงดันย้อนกลับ



รูปที่ 2.19 (a) เป็นโครงสร้างไดโอดชนิดเมซ่า (b) เป็นโครงสร้างไดโอดแบบพลาเนอร์ [18]

เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับร่องเมซ่าจะใช้รูปที่ 2.9(a) และ 2.9(b) ในการอธิบายทฤษฎี เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบพลาเนอร์ รูปที่ 2.9(b) ที่ขอบของส่วนที่แพร่สารเจือจะมีความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่สูงมากเนื่องจากเป็นมุมหักงอทำให้ความหนาแน่นกระแสสูง จึงเป็นเหตุให้เกิดการพังทลายก่อนส่วนกลางของอุปกรณ์ แต่จากรูปที่ 2.9(a) รอยต่อ PN ที่อยู่บริเวณผิวของร่องเมซ่าจะเห็นว่า ผลรวมอะตอมฝั่ง n จะมีมากกว่าฝั่ง p เนื่องจากมีเนื้อซิลิคอนเยอะกว่า ดังนั้นบริเวณปลอดพาหะที่เกิดจากการรวมตัวของพาหะที่ฉีดเข้ามาที่ประจุในแลททิซ จะมีอิเล็กตรอนฉีดจากฝั่ง n เข้าไปฝั่ง p มากขึ้นดังนั้นเพื่อให้เกิดการรวมตัวกับประจุบวกของฝั่ง p มากขึ้นจำเป็นต้องกินพื้นที่หรือแลททิซฝั่ง p มากขึ้นทำให้บริเวณปลอดพาหะฝั่ง p ขยายและโค้งงอกว้างขึ้น ดังรูปที่ 2.10 ส่วนบริเวณปลอดพาหะฝั่ง n บริเวณร่องเมซ่าที่โค้งงอแคบลงเนื่องจากปริมาณโฮลจากฝั่ง p มีน้อยเนื่องจากเนื้อซิลิคอนน้อย จึงแพร่ข้ามไปน้อยและจับตัวกับประจุในแลททิซอีกฝั่งได้น้อย บริเวณปลอดพาหะจึงโค้งงอแคบลง ซึ่งโดยมากสนามไฟฟ้าฝั่ง P+ สูงกว่าฝั่ง N- ดังนั้นเมื่อบริเวณปลอดพาหะฝั่ง P+ กว้างขึ้น ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อเมซ่าจึงลดลง ผลให้ค่ากระแสรั่วลดลงและแรงดันพังทลายสูงขึ้นเข้าใกล้ค่าแรงดันพังทลายบริเวณเนื้อส่วนกลางของอุปกรณ์ตามความสัมพันธ์สมการ (2.11) เมื่อ E_{MNB} เป็นสนามไฟฟ้าสูงสุดของส่วนที่เป็นร่องเมซ่า และ E_{MB} เป็นสนามไฟฟ้าสูงสุดของโครงสร้างที่ไม่มีเมซ่า

$$E_{mNB} \equiv E_{mB} \left(\frac{W_B}{W_S} \right) \equiv E_{mB} \left(\frac{W_B}{W_P} \right) \sin\theta \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.20 ลักษณะรอยต่อและบริเวณปลอดพาหะ [17]

อีกวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้แรงดันพังทลายมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี นั่นคือการสร้างชั้นกึ่งฉนวนปิดที่รอยต่อบริเวณผิวเมฆา วิธีการนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณผิวเมฆาถูกลดทอนลงทำให้แรงดันพังทลายสูงขึ้นใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากขึ้น โดยชั้นฉนวนนี้สามารถสร้างด้วยวิธี LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) ด้วยไอของ SiH_4 และ N_2O เข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นชั้น SIPOS (Semi-Insulating Polycrystalline Silicon) หรือชั้น SiO_x ซึ่งเป็นชั้นกึ่งฉนวนที่เป็นประกอบของซิลิคอนที่มีอะตอมของออกซิเจนปิดที่รอยต่อ ดังสมการปฏิกิริยาเคมี [20]



ซึ่งการควบคุมอัตราส่วนของ $\text{N}_2\text{O}:\text{SiH}_4$ จะเป็นการกำหนดความเป็นฉนวนที่ยอมให้กระแสไหลได้บ้างเพื่อลดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อเมฆา จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของ $\text{N}_2\text{O}:\text{SiH}_4$ ให้สูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนของออกซิเจนใน SIPOS สูงขึ้นทำให้ความเป็นฉนวนมากขึ้นและทำให้กระแสรั่วไหลย้อนกลับต่ำลง แต่ข้อเสียที่ตามคือแรงดันพังทลายจะไม่สูงหรือต่ำกว่าการลดอัตราส่วนดังกล่าว เพราะเมื่อความเป็นฉนวนของชั้น SIPOS สูง ชั้นกึ่งฉนวนนี้จะยอมให้กระแสไหลผ่านได้น้อยลงทำให้ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสูงขึ้นและเป็นเหตุให้เกิดการพังทลายง่ายขึ้น

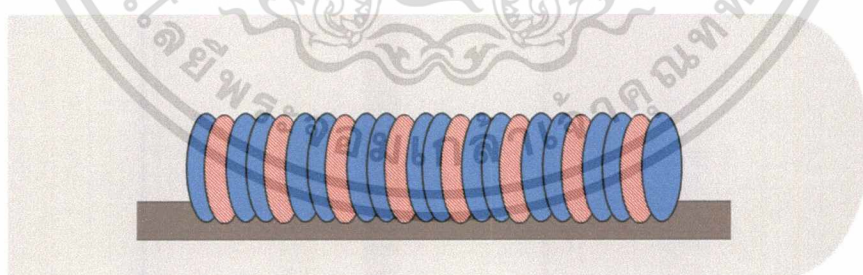
2.4.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างไดโอดแบบเมฆาสามารถทำให้ต้นทุนถูกลงได้เพราะการแพร์สารเจือที่สามารถทำได้ทั่วทั้งแผ่นโดยไม่ต้องมีหน้ากาก (mask) เพื่อเปิดช่องแพร์สารเจือ ทำให้ลดขั้นตอนการสร้างได้มาก โดยกระบวนการสร้างจะเริ่มจากการนำแผ่นเวเฟอร์ชนิด CZ เป็นฐานรอง มาแพร์สารเจือทั่วทั้งแผ่น โดยการ

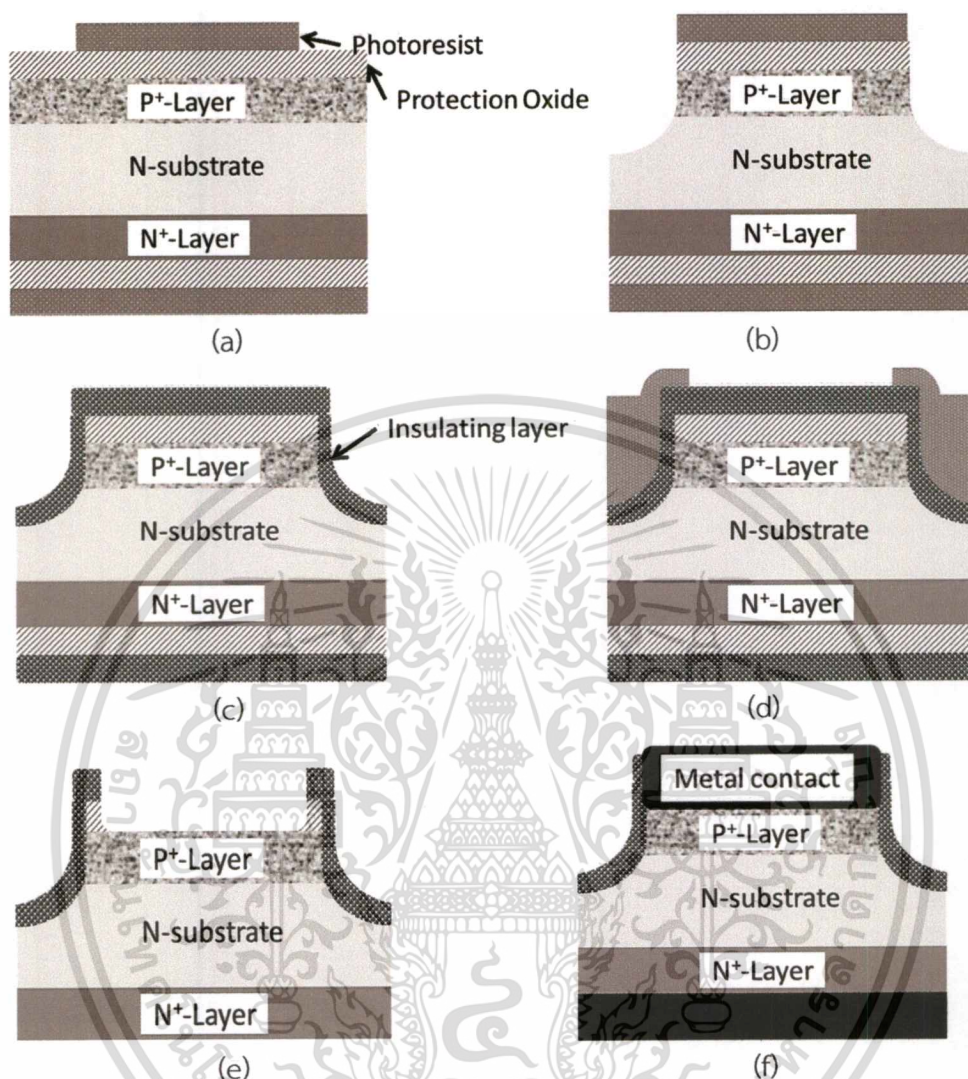
แพร์สารเจือจะทำรอยต่อทั้งสองข้างของไดโอดชนิด PIN ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการสร้างรอยต่อจะสามารถทำได้ตั้งแต่กระบวนการแรกของการสร้างไดโอด ซึ่งข้อดีสามารถสร้างไดโอดเก็บไว้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการต่อได้ทีละหลายๆ และยังสามารถปรับปรุงค่าแรงดันพังทลาย (V_B) และแรงดันไฟตรงตกคร่อม (V_F) ได้หลังการแพร์สารเจือทั้งสองด้านเสร็จ กล่าวคือเราอาจสร้างไดโอดที่มีการแพร์สารเจือแล้วมาเป็นวัตถุดิบสำหรับไดโอดที่มีแรงดันพังทลายที่ต่างกันพร้อมกันได้ จะเห็นว่าเป็นวิธีที่ลดต้นทุนในกระบวนการผลิตไปได้มาก

ขั้นตอนต่อมาหลังจากได้รอยต่อชนิด PIN และคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการแล้ว จึงนำมาสร้างชั้นออกไซด์ (oxide) สำหรับป้องกันการกัดกร่อน ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก (wet oxidation) แล้วจึงทำมาสก์ที่หนึ่ง (mask1) สำหรับการเปิดช่องเพื่อการกัดเมฆาตามรูปที่ 2.22 (a) ซึ่งมาสก์นี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของไดโอด จากนั้นจึงนำแผ่นเวเฟอร์ที่มีมาสก์แล้วไปลง BOE (buffer oxide etch) เพื่อกัดเปิดชั้นออกไซด์ก่อนใช้สารละลายผสมระหว่าง HNO_3 , HF และ CH_3COOH เพื่อกัดเนื้อซิลิคอนให้เป็นร่องลึกตามหลักการของเมฆา รูปที่ 2.22 (b)

หลังจากได้ร่องเมฆาจึงสร้างชั้นฉนวนเพื่อป้องกันรอยต่อ ชั้นฉนวนนี้อาจจะใช้การสร้างชั้นออกไซด์บางหรืออาจจะเป็น LPCVD (low pressure chemical vapor disposition) ในการสร้างชั้นฉนวน จากนั้นจึงทำมาสก์ที่สองเพื่อกัดชั้นฉนวนและชั้นป้องกันบริเวณช่องขั้วสัมผัส (contact window) แล้วจึงทำกระบวนการโลหะ ซึ่งในกระบวนการทางอุตสาหกรรมเลือกใช้แบบไม่ใช้ไฟฟ้า (electroless plating) ในการทำขั้วโลหะ จากนั้นการนำไปประกอบ จะตัดแบ่งไดโอดแต่ละตัวตามร่องเมฆา โดยระมัดระวังไม่ให้บริเวณชั้นฉนวนเสียหาย



รูปที่ 2.21 การเรียงแผ่นในเตาแพร์สารเจือ



รูปที่ 2.22 ขั้นตอนการสร้างไดโอดแบบเมซ่า

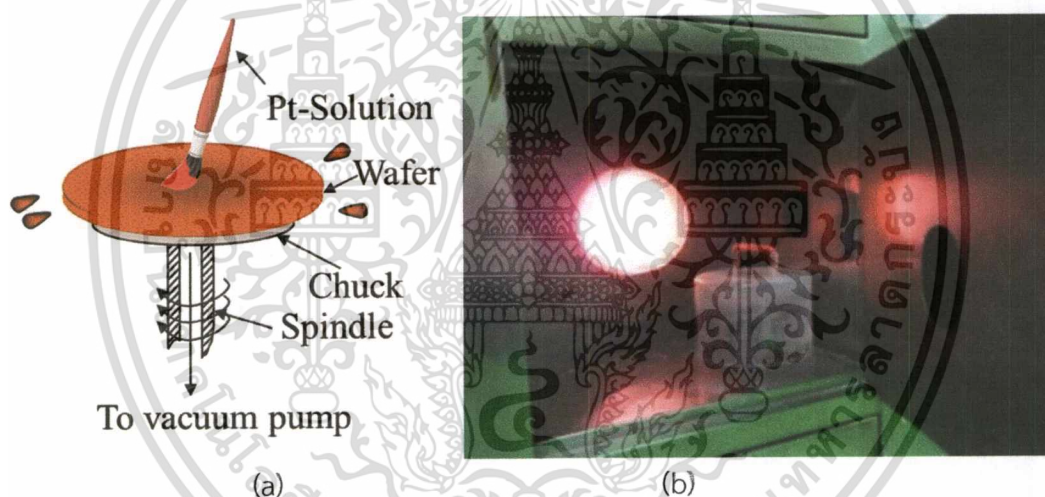
2.5 การแพร่อะตอมแพลตตินัมทางอุตสาหกรรม

การแพร่อะตอมแพลตตินัมเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ถูกศึกษากันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องด้วยแพลตตินัมเป็นโลหะที่มีต้นทุนที่สูง และกรรมวิธีที่ใช้ในการทดลอง ล้วนแล้วแต่มีมูลค่าที่สูง ดังนั้นการที่จะนำองค์ความรู้เกี่ยวกับการแพร่อะตอมแพลตตินัมมาใช้ในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรมจึงต้องมีการปรับปรุงเป็นอย่างมากเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มขีดศักยภาพในการแข่งขันในตลาดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดตัวเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 หลักการพื้นฐาน

ในการศึกษา เพื่อให้อะตอมแพลตตินัมสามารถเกาะที่ผิวของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหรือแผ่นเวเฟอร์ จำเป็นต้องใช้วิธี E-beam หรือการยิงรังสีอิเล็กตรอนไปที่แหล่งจ่ายแพลตตินัม (Pt-Source) ให้เกิดการไอออไนซ์ให้อะตอมแพลตตินัมมาเกาะที่แผ่นเวเฟอร์ก่อนนำไปเข้าเตาความร้อนสูงเพื่อให้อะตอมแพลตตินัมแพร่เข้าไปในฐานรอง กรรมวิธีนี้ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาสูง และจำนวนการผลิตทำได้น้อย แต่วิธีที่อุตสาหกรรมใช้สำหรับการผลิตคราวละมาก ๆ จะใช้สารละลายที่มีแพลตตินัมเป็นส่วนประกอบในการระบายลงบนแผ่นเวเฟอร์ ให้ทั่วทั้งแผ่นแล้วจึงนำไปเข้าเตาความร้อนสูงเพื่อให้อะตอมแพลตตินัมแพร่เข้าไปยังฐานรอง โดยกระบวนการนี้จะเหมาะสำหรับการสร้างไดโอดด้วยวิธีการแบบเมซ่า ซึ่งจะทำให้การแพร่อะตอมแพลตตินัมเข้าไปหลังการแพร่อะตอมสารเจือจันเสร็จสิ้น การควบคุมปริมาณและระยะเวลาการแพร่ที่เหมาะสมสามารถควบคุมได้ด้วยการผสมสารละลาย อุณหภูมิของเตา (800-900°C) และเวลาที่ใช้ในเตา



รูปที่ 2.23 (a) แสดงการระบายสารละลายแพลตตินัม (b) แสดงเตาสำหรับการแพร่อะตอมแพลตตินัม

2.5.2 ข้อเสียของการแพร่อะตอมแพลตตินัมในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม

ในขั้นตอนการนำแผ่นเวเฟอร์ที่ระบายสารละลายแพลตตินัมทั่วทั้งแผ่นแล้วเข้าเตาความร้อนสูง อาจเกิดการกระจายของอะตอมแพลตตินัมที่ไม่ทั่วสม่ำเสมอทั้งแผ่น ทั้งนี้เนื่องจากมีหลายขั้นตอนที่สามารถส่งผลต่อการแพร่ได้ เช่น ในการนำแผ่นเวเฟอร์ออกจากเตา แผ่นเวเฟอร์จะเย็นตัวลงไม่พร้อมกันทั้งแผ่น ทำให้อะตอมแพลตตินัมส่วนที่ร้อนกว่ามีการแพร่กระจายต่อ ทำให้การควบคุมอายุพาหะด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ค่าไฟฟ้าที่สม่ำเสมอทั้งทั้งแผ่นได้ยากการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะทำได้ก็ต่อเมื่อ

การผลิตสำเร็จแล้ว ซึ่งทำให้การปรับแก้กระบวนการแพร่อะตอมแพลตตินัมทำได้ง่ายและซ้ำ
ต้นทุนการผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเสมอ

2.6 การฉายรังสีอิเล็กตรอน

ตามที่เข้าใจกันเป็นอย่างดีว่าอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคพื้นฐานหนึ่งในธรรมชาติของอะตอม มีประจุ
ไฟฟ้าที่เป็นลบ และมีมวลและขนาดน้อยมาก แม้ว่าเราจะพูดถึงถึงขนาดของมันมากเท่าไร แต่ก็ยังไม่มี
การทดลองใดที่สามารถอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของมันได้ตราบใดถึงกระนั้นเราก็ยังสามารถศึกษาเกี่ยวกับ
การหมุนของมันได้อย่างน่าสนใจ

อิเล็กตรอนถูกค้นพบโดย ธรรมชาติ ในปี 1897 และประมาณ 6 ปีหลังการนำเสนอสมมติฐานจึงมีการ
ตั้งชื่อว่า “อิเล็กตรอน” โดยนักฟิสิกส์ชาวไอริช จอร์จ สโตนี จากนั้นทฤษฎีได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยเอเนส
รีเธอร์ฟอร์ด และนิล โบห์ร์ ว่าอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียสเป็นชั้นๆ หรือ “ออบิต”

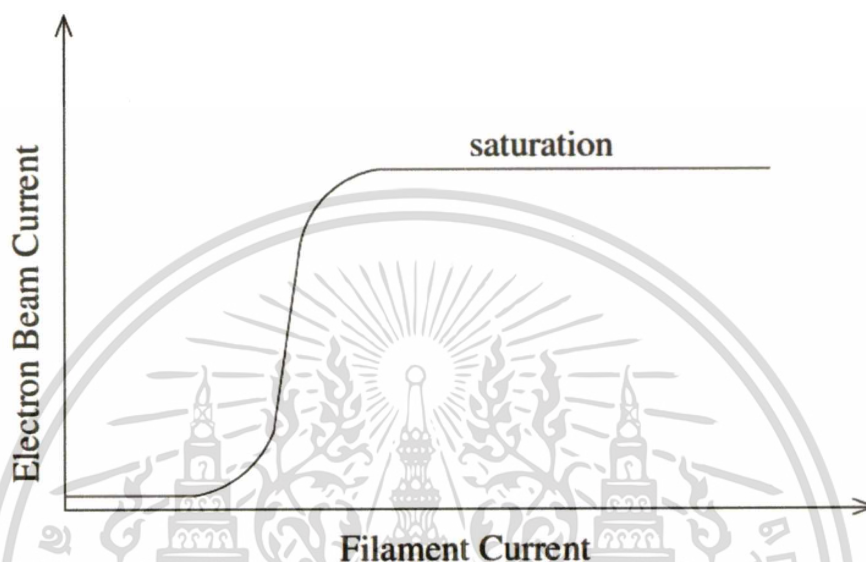
2.6.1 แหล่งกำเนิดรังสีอิเล็กตรอน

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนถูกเรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ถูกนำมาใช้สร้างลำอิเล็กตรอน
พลังงานสูงที่เข้มข้น โดยการใช้สองชนิดรวมกันได้แก่ ชนิดใช้ความร้อน (thermionic electron gun)
และชนิดการปลดปล่อยสนามพลังงาน (field emission electron gun) นอกจากนี้ยังมีแบบที่สามคือ
การปลดปล่อยด้วยแสง (photo emission electron gun) ซึ่งได้รับความนิยมในการค้นคว้ารังสีที่
พลังงานสูง

พื้นฐานของปืนอิเล็กตรอนเป็นกระบวนการที่เพิ่มพลังงานจลน์ให้อิเล็กตรอนเพื่อจะหลุดพ้นจาก
สนามไฟฟ้าภายในของวัสดุ สามชนิดของปืนอิเล็กตรอนจึงเป็นวิธีที่กระตุ้นให้วัสดุคายอิเล็กตรอนออกมา
กระบวนการดังกล่าวจะง่ายที่สุดสำหรับวัสดุที่เป็นโลหะซึ่งมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มากมาย อิเล็กตรอนเหล่านี้
จะมีพันธะที่หลวมๆ ที่ซึ่งแค่ให้ความร้อนไม่มากก็สามารถดึงอิเล็กตรอนออกมาได้ โดยแต่ละชนิดโลหะมี
ระดับพลังงานขีดเริ่มที่สามารถทำลายพันธะของอิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน พลังงานนี้เรียกว่า เวิร์กฟังก์ชัน
(work function) แทนด้วย W

ปืนอิเล็กตรอนชนิดความร้อนจะทำให้โลหะซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เป็นทั้งสแตนท์ที่เป็นเส้นบางๆ เรียกว่า ฟิ
ลาเมนต์ (filament) ไปทำให้ร้อน ทำให้อิเล็กตรอนสามารถทำลายพันธะหลุดจากวัสดุไปรวมกลุ่มกันเป็น
หมอกของอิเล็กตรอน จากนั้นจึงใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปเพื่อให้พลังงานไฟฟ้าแก่อิเล็กตรอนและทำให้อิ
เล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นลำอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดที่เป็นลบไปยังขั้วแอโนดที่เป็นบวก ความเข้มข้นของ
รังสีอิเล็กตรอนจะขึ้นอยู่กับฟิลาเมนต์และอุณหภูมิของฟิลาเมนต์ ซึ่งจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านฟิลาเมนต์

จะเป็นตัวควบคุมความเข้มข้นของรังสี ภายในปืนอิเล็กตรอน จะมีโลหะที่มีสนามไฟฟ้าเข้มข้นสูงมาก (ราว 10^9 V/m) เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูง



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีอิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้าที่ฟิลาเมนต์ [21]

นอกจากนี้สามารถสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้จากกระบวนการทางแสงของโฟตอน เรียกว่าการปลดปล่อยด้วยแสง (photoelectric emission) โดยใช้แสงซึ่งเป็นเลเซอร์

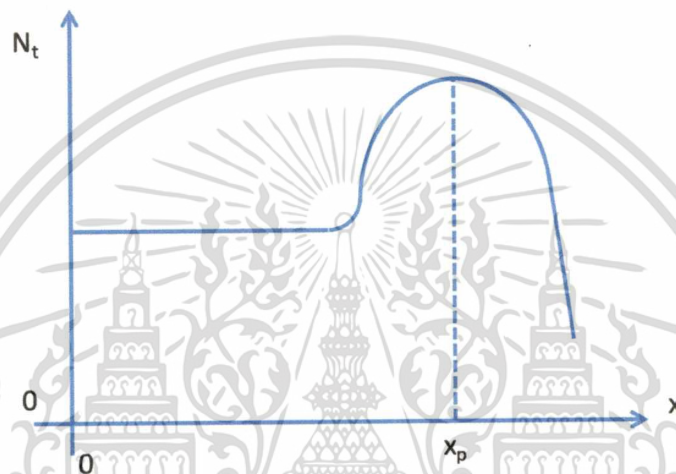
2.6.2 วิธีการฉายรังสี

ตามหลักการของต้นกำเนิดรังสีอิเล็กตรอน เราสามารถควบคุมปริมาณหรือ dose ของรังสีได้ด้วยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ฟิลาเมนต์ ส่วนการวัดปริมาณรังสีจะวัดในหน่วยของกิโลเกย์ (kilogays; kGy) ซึ่งในการฉายแต่ละครั้ง นอกจากการควบคุมปริมาณรังสีจากกระแสฟิลาเมนต์ ยังสามารถคุมได้ด้วยเวลาที่ใช้ในการฉาย ซึ่งเครื่องฉายรังสีอิเล็กตรอนส่วนมากจะเป็นลักษณะรางวิ่งส่งวัสดุเป้าหมายที่ต้องการฉายวิ่งผ่านหน้าต่างที่รังสีอิเล็กตรอนพุ่งออกมา ดังนั้นการปรับความเร็วของรางก็มีผลต่อปริมาณรังสีที่เป้าหมายจะได้รับ

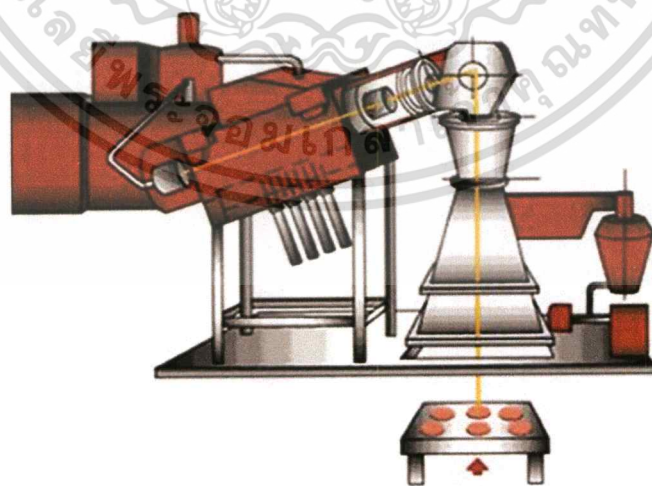
พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกประการคือพลังงานที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน ซึ่งวัดได้ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งการฉายสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อปรับปรุงค่าไฟฟ้ามักจะฉายด้วยพลังงานระดับล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ระดับพลังงานนี้ จะมีผลต่อการทะลุทะลวงและการสร้างความเสียหายให้แก่เป้าหมาย

2.6.3 ผลกระทบและความเสียหายจากการฉายรังสี

เมื่อสสารหรืออุปกรณ์ได้รับรังสีจากแหล่งกำเนิด อนุภาคพลังงานสูงจะทะลุผ่านโครงสร้างผลึก และสูญเสียพลังงานบางส่วนไปกับการทำปฏิกิริยากับโครงร่างอะตอม ซึ่งทำให้เกิดการผิดเพี้ยนในโครงสร้างไปจากเดิม เช่นการย้ายตำแหน่งหรือการบิดเบี้ยวของแลตทิซ และเกิดเป็นตำหนิดั้งที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นของบทนี้ ซึ่งทั้งหมดนี้นำไปสู่การเกิดศูนย์กลางการรวมตัวในเนื้อสารซิลิคอน



รูปที่ 2.25 แผนผังความสัมพันธ์การกระจายตัวของความเสียหาย (N_t) ของโครงร่างผลึกกับความลึกหลังการของรังสีที่ทะลุผ่าน [22]



รูปที่ 2.26 แสดงการทำงานของเครื่องฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การทดสอบไดโอดทางอุตสาหกรรม

ในการทดสอบไดโอดตามทฤษฎีแล้วจะเน้นไปที่กราฟคุณลักษณะกระแสต่อแรงดันไฟฟ้าทั้งไบอัสตรงและย้อนกลับ ซึ่งมักจะพิจารณาตามเส้นโค้งของกราฟเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทั้งทางไฟฟ้าเช่น กระแสอิ่มตัว กระแสไดโอด แรงดันขีดเริ่ม เป็นต้น และทางฟิสิกส์เช่น ค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ค่า ideality factor เป็นต้น มาประกอบการวิเคราะห์คุณภาพของไดโอด แต่ในการใช้งานจริงผู้ใช้งานไดโอดจะมีความต้องการคุณสมบัติเพียงบางประการซึ่งเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อการออกแบบวงจรไฟฟ้าอันได้แก่ ค่าแรงดันพังทลาย (V_B) ณ กระแสทดสอบ (I_T) ค่ากระแสรั่ว (I_R) ณ แรงดันย้อนกลับ (V_R) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหล่านี้จะต้องถูกทดสอบทั้งระหว่างกระบวนการสร้างและหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างไดโอด เพื่อผู้ใช้งานจะสามารถเลือกใช้ไดโอดที่ต้องการไปใส่ไว้ในวงจรไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ ทั้งนี้ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ทดสอบนั้นมักจะเป็นคุณภาพขั้นต่ำของไดโอด เนื่องจากในกระบวนการผลิตได้ออกแบบไว้ให้ได้คุณภาพเกินจากคุณสมบัติที่ทดสอบได้อยู่เสมอ

2.7.1 การทดสอบแรงดันไบอัสตรง (Forward Biased Testing)

การใช้งานไดโอดส่วนมากมักใช้งานเป็นไดโอดเรียงกระแส (rectifier diodes) หรือใช้เป็นไดโอดที่ใช้ติงกระแสเช่น freewheel diodes ในวงจรสวิตช์ซึ่งร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง ล้วนแล้วแต่มีการใช้งานแบบไบอัสตรง ดังนั้นคุณสมบัติที่สำคัญและจำเป็นต่อการออกแบบจึงต้องพิจารณาด้านไบอัสกระแสตรง

2.7.1.1 กระแสไฟตรง (Forward current: I_F) คุณสมบัตินี้มักจะถูกพิจารณาเป็นเงื่อนไขแรกสำหรับการเลือกใช้ไดโอด เนื่องจากกระแสตรงนี้จะเป็นตัวกำหนดว่าไดโอดจะสามารถรองรับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ได้สูงสุดเท่าใด

2.7.1.2 แรงดันตกคร่อมกระแสไฟตรง (Forward Voltage Drop: V_F) คุณสมบัตินี้จะสัมพันธ์กับ I_F เนื่องจากการทดสอบแรงดันนี้จะทดสอบโดยการป้อนกระแสไฟตรงเท่ากับ I_F แล้ววัดแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วไดโอด โดย V_F นี้จะเป็นค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่มีการออกแบบวงจรต้องคำนึงถึงเนื่องจากหากค่า V_F มีค่าสูงเกินไปจะทำให้วงจรมีการกินพลังงานระหว่างที่ไดโอดทำงาน (on-state) มากซึ่งนอกจากจะเปลืองพลังงานแล้ว ยังมีส่วนทำให้เกิดความร้อนสะสมในไดโอดและอาจจะส่งผลเสียหายต่อวงจรทั้งหมดได้

2.7.2 การทดสอบไบอัสย้อนกลับ (Reverse Biased Testing)

แม้ว่าไดโอดส่วนมาก (ยกเว้นกลุ่มซีเนอร์ไดโอด) จะไม่ต้องการให้เกิดกระแสไหลผ่านในทิศย้อนกลับ แต่การทดสอบไบอัสย้อนกลับก็สามารถบ่งชี้ถึงคุณภาพที่สำคัญ กล่าวคือในการใช้งาน เช่น วงจรเรียงกระแส ความต้องการของอุปกรณ์คือต้องการให้ไดโอดสามารถต้านทานแรงดันย้อนกลับได้สูงมากกว่าแรงดันย้อนกลับที่สามารถเป็นไปได้ในวงจร ดังนั้นการทดสอบเรื่องของแรงดันพังทลายจึงจำเป็นอย่างมาก เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ได้อย่างที่ต้องการ

2.7.2.1 กระแสทดสอบ (Testing Current: I_T) ในการทดสอบแรงดันพังทลาย ตามทฤษฎีแล้วเมื่อไดโอดเกิดการพังทลาย จะเกิดกระแสไหลอย่างมากจนทำให้เส้นกราฟเมื่อเกิดการพังทลายเสมือนตั้งฉากกับแกนของแรงดัน นั่นคือแรงดันจะคงที่ ณ จุดที่เกิดการพังทลาย แต่ในทางปฏิบัติแล้ว การพังทลายของไดโอดไม่สามารถทำให้แรงดันตกคร่อมของไดโอดคงที่เมื่อมีการเพิ่มระดับของกระแส แต่แรงดันตกคร่อมนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนต่อกระแสย้อนกลับ ดังนั้นการทดสอบแรงดันพังทลายจึงจำเป็นต้องกำหนด I_T ขึ้นเพื่อเป็นจุดอ้างอิงให้ผู้ใช้งานได้เลือกใช้ที่เหมาะสม โดย I_T นี้มักกำหนดให้มีค่าอยู่ที่ราว 10-20% ของกระแสย้อนกลับสูงสุด (maximum current: I_{max}) ที่ไดโอดทนได้ก่อนเกิดความเสียหาย

2.7.2.2 แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage: V_B) ตามที่ได้กล่าวข้างต้นเกี่ยวกับแรงดันพังทลาย ซึ่งการทดสอบคุณสมบัตินี้จะสัมพันธ์กับค่า I_T แต่ทั้งนี้ค่า V_B จะมีความสัมพันธ์ต่อ V_F แบบแปรผกผันตรง อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่ไดโอดที่มีค่า V_B สูง จะมีค่า V_F ที่สูงตามด้วยเนื่องจากไดโอดที่มี V_B สูง จะต้องใช้ฐานรองที่มีค่าสภาพต้านทานที่สูงมาก ดังนั้น V_F ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสภาพต้านทานนี้จึงสูงขึ้นตามด้วย

2.7.2.3 กระแสรั่วไหลย้อนกลับ (Reverse Leakage Current: I_R) และแรงดันย้อนกลับ (Reverse Voltage: V_R) เมื่อไดโอดได้กลับการไบอัสย้อนกลับที่แรงดันต่ำจะมีกระแสรั่วไหลที่รอยต่อเกิดขึ้น และกระแสนี้แปรผันตามค่ากระแสอิมพัลส์ย้อนกลับและแรงดันย้อนกลับ ซึ่งในการใช้งานในย่านไบอัสย้อนกลับจะเป็นช่วงที่ไดโอดอยู่สถานะไม่นำกระแส (off-state) จึงต้องการให้กระแสรั่วไหลนี้มีค่าที่ต่ำมาก เพื่อสร้างความมั่นใจแก่ผู้ใช้งาน โรงงานผลิตไดโอดจึงเลือกจุดทดสอบกระแสรั่วไหลย้อนกลับให้ใกล้ค่า V_B ให้มากที่สุด โดยอาจจะมียุทธศาสตร์ค่าอยู่ที่ราว 90% ของ V_B

2.7.2.4 ค่าความแตกต่างแรงดัน (Different Voltage: DV) คุณสมบัตินี้มีลักษณะการทดสอบที่ต้องอาศัยการเปรียบเทียบค่าแรงดันสองจุด โดยจุดหนึ่งนั้นจะอยู่ที่ I_T หรือใกล้เคียง ส่วนที่อีกจุดเป็นจะทดสอบที่กระแสที่มากกว่า I_T พอสมควร อาจจะมีมากกว่าหลายสิบเท่า ทั้งนี้เพื่อทดสอบว่าการพังทลายนั้นมีความใกล้เคียงทฤษฎีเพียงใด ซึ่งหากมีความต่างของแรงดันนี้มากนั้นหมายถึง เมื่อเกิดการพังทลายขึ้น ไม่ว่าจะด้วยความตั้งใจหรือความไม่เสถียรของวงจร จะเกิดการสูญเสียพลังงานที่ไดโอดอย่างมากจะเห็นได้จากพื้นที่ใต้กราฟขณะที่ไดโอดพังทลาย

$$P = IV \quad (2.12)$$

ซึ่งจะหมายถึงอุปกรณ์อาจจะเสียหายได้ทันทีที่เกิดการพังทลาย แต่ถ้า DV มีค่าต่ำแสดงว่า ไดโอดสามารถทนต่อการเกิดการพังทลายที่รอยต่อได้ดี

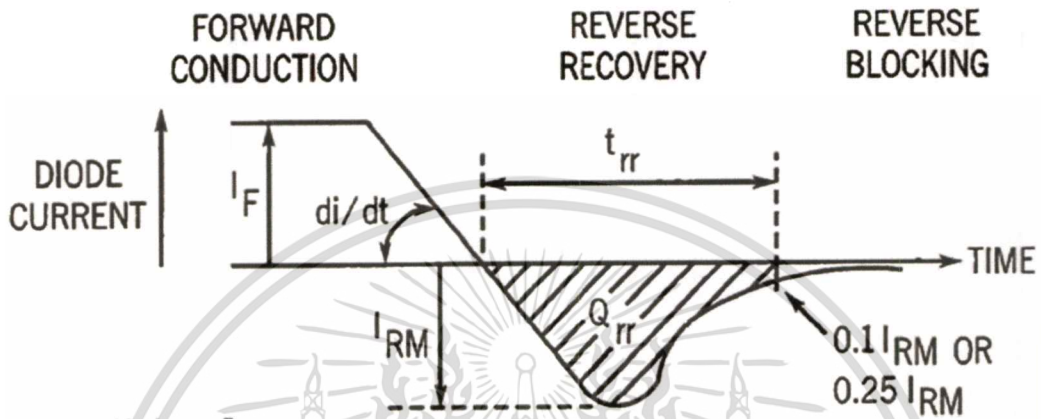
2.7.3 การทดสอบด้านสวิทชิง (Switching Testing)

แม้ว่าการทดสอบด้วยการไบอัสทั้งย่านไบอัสตรงและย้อนกลับจะทำให้ผู้ใช้งานเลือกไปใช้ในวงจรที่ออกแบบได้แล้ว แต่เพื่อความเสถียรและคงทนของการใช้งานจริง โรงงานจำเป็นต้องทดสอบเพิ่มเติมอีกเพื่อสร้างความเชื่อมั่นว่าอุปกรณ์มีเสถียรภาพและคงทนต่อการใช้งาน

2.7.3.1 กระแสเล็รจสูงสุด (Peak Forward Surge Current: I_{FSM}) I_{FSM} นี้หมายถึงกระแสเล็รจสูงสุดที่ไดโอดสามารถรองรับได้ โดยการทดสอบจะป้อนพัลส์รูปครึ่งลูกคลื่นสัญญาณไซน์ มีความกว้างสัญญาณที่ 8.3 ms โดยการทดสอบจะเริ่มจากพัลส์ตั้งกล่าวที่มีแอมพลิจูดต่ำๆ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนอุปกรณ์เกิดความเสียหาย ที่จุดสูงสุดของพัลส์ที่ทำให้อุปกรณ์เสียหายจะถูกบันทึกว่าเป็น I_{FSM}

2.7.3.2 ค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Time: t_{rr}) สำหรับวงจรสวิทชิงหรือวงจรไฟฟ้ากำลัง ในการออกแบบยังสามารถใช้ความถี่ให้สูงได้มากเท่าใด จะหมายถึงสมรรถนะของวงจรจะยิ่งดีมากขึ้นด้วย แต่ในการใช้งานจริง ขณะที่ไดโอดทำงานนำกระแส แรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเป็น V_F และเมื่อมีการเปลี่ยนทิศของการไบอัสที่ไดโอดหรือทำให้ไดโอดหยุดนำกระแส ไดโอดจะไม่ได้หยุดนำกระแสทันที ต้องอาศัยเวลาในการลดทอนกระแสเป็นเวลาอย่างน้อยเท่ากับ t_{rr} ถึงจะสามารถทำให้ไดโอดทำงานนำกระแสได้อีกครั้งโดยที่การทำงานของวงจรไม่ผิดเพี้ยนจากที่ออกแบบไว้ ดังนั้นไดโอดทั่วไปอาจจะไม่สามารถรองรับการใช้งานประเภทนี้ได้ เนื่องจาก t_{rr} มีค่าสูงเกินไป การทดสอบค่า t_{rr}

โดยมากจะป้อน I_F เป็นพัลส์ขนาด 0.5A แล้วจับเวลาตั้งแต่ที่กระแสไดโอดลดลงจนเป็นศูนย์ครั้งแรกจนกระแสเพิ่มขึ้นเป็น I_{RRM} และ ลดลงมาจนเหลือ $0.25 I_{RRM}$ เป็นค่าเวลาฟื้นตัวหรือ t_{rr} ดังรูป



รูปที่ 2.27 แสดงการวัดค่า t_{rr} [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

ความมุ่งหวังของวิทยานิพนธ์นี้ต้องการนำวิธีการฉายรังสีมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตไดโอดกำลังชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบเมฆา โดยการทดลองนั้นจะแบ่งออกเป็นสองช่วงคือช่วงแรกคือการสร้างไดโอดกำลังชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบเมฆา แล้วนำไปทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ รวมไปถึงคุณสมบัติการสวิตชิง แล้วจากนั้นจึงนำฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ค่าปริมาณรังสีและพลังงานค่าต่างๆ และวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเก็บข้อมูลคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากก่อนที่ทำการฉายรังสี เพื่อศึกษาแนวโน้มของคุณสมบัติสวิตชิงที่ต้องการต่อค่าปริมาณรังสี โดยที่มีการถดถอยของประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ไม่มากเกินไปจนการยอมรับได้ของการใช้งาน

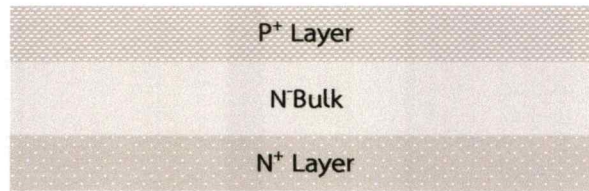
3.1 การสร้างไดโอดกำลังชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบเมฆา

ตามที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ข้อเด่นของการใช้โครงสร้างแบบเมฆา คือต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า ในขณะที่คุณสมบัติทางไฟฟ้ายังอยู่ในช่วงที่ใช้งาน กระบวนการสร้างจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องศึกษาอย่างถี่ถ้วนก่อนการทดลองในลำดับต่อไป โดยกระบวนการผลิตเริ่มต้นกระบวนการผลิตจากแผ่นผลึกซิลิคอนหรือเวเฟอร์ (silicon wafer) ชนิด N ที่ผลิตด้วยกรรมวิธีแบบ Czochralski ความหนาประมาณ 250 μm

N-Type CZ wafer

จากนั้นทำการแพร่สารเจือ (diffusion process) เพื่อทำชั้น P เข้มข้นและ N เข้มข้น ขั้นตอนนี้จะมีกระบวนการขับเคลื่อน (drive-in process) เพื่อให้สารเจือลงไปลึกพอให้รอยต่อ $P^+ - N^-$ และ รอยต่อ $N^- - N^+$ อยู่ลึกลงไปจากผิวจนทำให้ชั้นเนื้อซิลิคอน (N-Bulk) เหลือความกว้างแค่เพียงพอให้รองรับการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) เมื่อทำการให้ไบอัสย้อนกลับ และลดการเกิดการพังทลายก่อนการพังทลายที่แท้จริงของเนื้อสารซิลิคอน (early breakdown) แต่ไม่มากเกินไปจนทำให้ค่าความต้านทานแฉงสูงจนไม่สามารถนำไปใช้งานได้

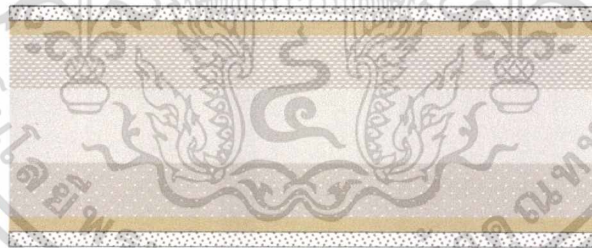
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



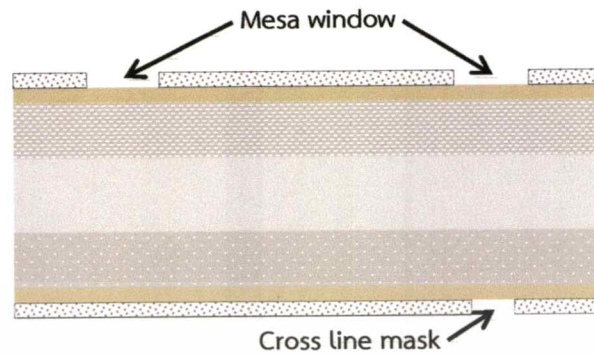
ทำกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) เพื่อทำชั้นป้องกันในกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส ความหนาของชั้นป้องกันนี้อยู่ราวๆ 6000-7000 อังสตรอม



เคลือบพื้นผิวทั้งสองหน้าของแผ่นเวเฟอร์ด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบ (negative-Photoresist) การหยดน้ำยาและกระจายน้ำยาด้วยการปั่นแผ่นด้วยความเร็วสูง



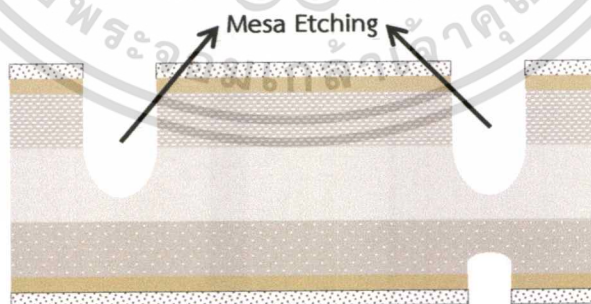
ฉายแสง UV ผ่านช่องกระจกหน้ากาก (mask) ตามขนาดพื้นที่ประสิทธิผลที่ต้องการ เพื่อสร้างช่องสำหรับการกัดร่องเมฆ่า ส่วน กากบาท (cross line) ด้านหลัง N+ มีไว้เพื่อการจัดระยะในกระบวนการตัดแบ่งตัวไดซ์



กัดชั้นออกไซด์ป้องกันด้วยกรด HF เจือจางหรือ BOE

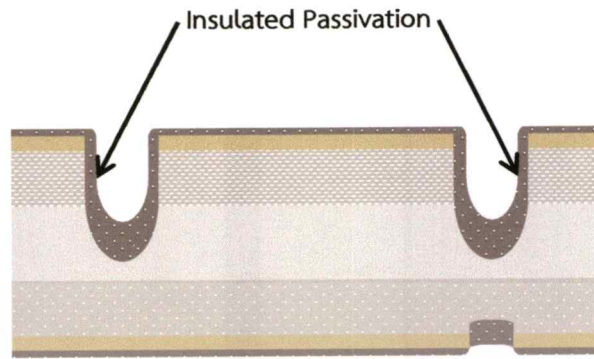


จากนั้นจึงทำการกัดร่องเมฆาด้วยกรดผสม HNO_3 -HF-HAc ให้ได้ความลึกที่ทะลุผ่านรอยต่อ P^+ - N^- และลึกมากกว่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะก่อนการพังทลายเมื่อทำการไบอัสย้อนกลับที่แรงดันสูง เพื่อเป็นการลดการเกิดการพังทลายก่อนการพังทลายที่แท้จริงของเนื้อสารซิลิคอน



รอยต่อภายในร่องเมฆาจะถูกป้องกันด้วยชั้นฉนวนเพื่อลดกระแสรั่วไหลที่ผิวรอยต่อ โดยชั้นฉนวนนี้สร้างขึ้นด้วยกระบวนการ LPCVD ให้เกิดชั้น SIPOS (Semi-Insulating Polycrystalline Silicon)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



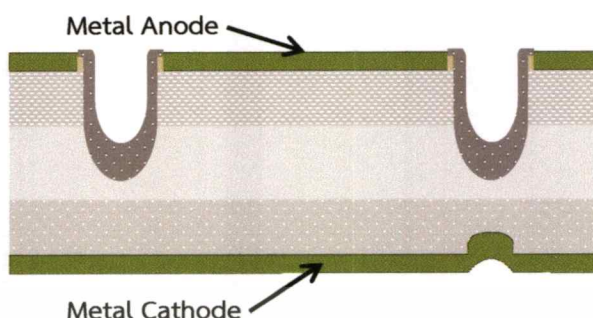
ทำกระบวนการ Photolithography อีกครั้งเพื่อเพื่อหน้าต่างสัมผัส (contact window) โดยป้องกันการถูกกัดกร่อนที่ชั้นป้องกันที่ร่องเมฆ่า

ใช้กรดกัดเพื่อเปิดหน้าต่างสัมผัส



ทำกระบวนการโลหะสร้างหน้าต่างสัมผัสโลหะเพื่อต่อออกวงจรภายนอกด้วยนิกเกิลและทองเคลือบนิกเกิลเพื่อความคงทนอีกครั้ง

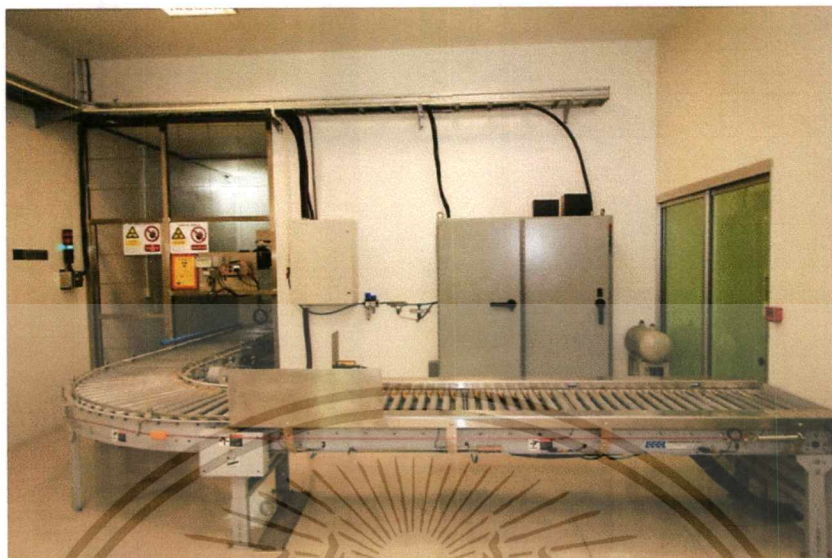
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.2 การฉายรังสีอิเล็กตรอน

ในการศึกษาเรามีการฉายรังสีในสองลักษณะ คือการฉายรังสีแก่อุปกรณ์ที่อยู่บนแผ่นเวเฟอร์ และการฉายรังสีแก่อุปกรณ์ที่ทำการประกอบเป็นไดโอดสำเร็จแล้ว โดยการฉายรังสีได้รับการสนับสนุนด้านอุปกรณ์เครื่องมือการฉายรังสีอิเล็กตรอนจากศูนย์ฉายรังสี อัญมณีแห่งใหม่ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ

ซึ่งก่อนที่จะทำการฉายรังสี จำเป็นต้องมีการวัดค่าความเข้มของรังสี และปริมาณที่ฉายรังสีของแต่ละพลังงาน เพื่อปรับแก้ไขค่าปริมาณรังสีสูงสุดที่ชั้นจะได้รับในการฉายรังสีแต่ละรอบเรียกว่าการทำ Dose mapping จะใช้อุปกรณ์การวัดปริมาณรังสีแบบแผ่นฟิล์มที่อาศัยการตอบสนองของฟิล์มเซลลูโลส ไตรอะซีเตต (Cellulose Triacetate) ต่อรังสีอิเล็กตรอนตั้งแต่ช่วง 1-150 kGy แล้วจึงนำมาวัดและวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องวัดภาพสเปกตรัม (Spectrophotometer) รุ่น Genesys 20 โดยแผ่นฟิล์มจะมีการเปลี่ยนสีหลังการฉายรังสีจากสีชมพูเข้มเป็นสีชมพูอ่อน โดยการเปลี่ยนสีจากการฉายรังสีอิเล็กตรอนนี้ จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น และด้วยรูปแบบการวางแผ่นฟิล์มลงบนภาตสำหรับการส่งผ่าน ชิ้นงานเข้าเครื่องฉายรังสีอิเล็กตรอนดังรูปที่ 3.1 ทำให้เราสามารถรู้ถึงตำแหน่งที่เหมาะสมของการวาง ชิ้นงานบนภาตและปริมาณของชิ้นงานที่สามารถวางบนภาตโดยที่ปริมาณรังสีที่ตกบนชิ้นงานแต่ละชิ้น ยังคงได้รับเท่ากันอย่างสม่ำเสมอในการฉายรังสีแต่ละรอบ ตามลักษณะรังสีบนภาตดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 3.1 รางส่งถาดที่วางอุปกรณ์เข้าส่วนของการฉายรังสี



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดภาพสเปกตรัม (Spectrophotometer) รุ่น Genesis 20

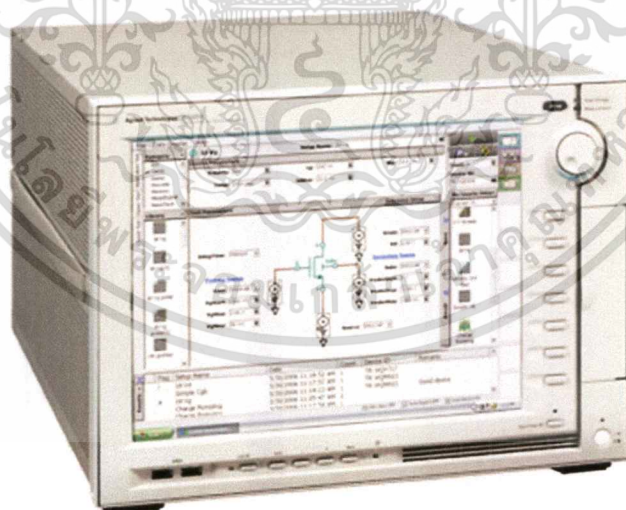
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า

ภายหลังการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ อุปกรณ์ที่ผ่านการฉายรังสีต้องถูกวัดผลการทดลองเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยในการศึกษานี้จะแบ่งการวัดผลออกเป็นสองลักษณะนั่นคือการวัดผลที่กระแสต่ำเพื่อศึกษาคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ภายหลังการฉายรังสี ตลอดจนการวัดหาค่าอายุพหุส่วนน้อยทางอ้อม เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติการสวิตช์ที่เปลี่ยนไป และการวัดผลที่กระแสสูงหรือการวัดผลในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งจะทำให้เราได้ทราบถึงคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการใช้งานจริงของผู้ใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลัง

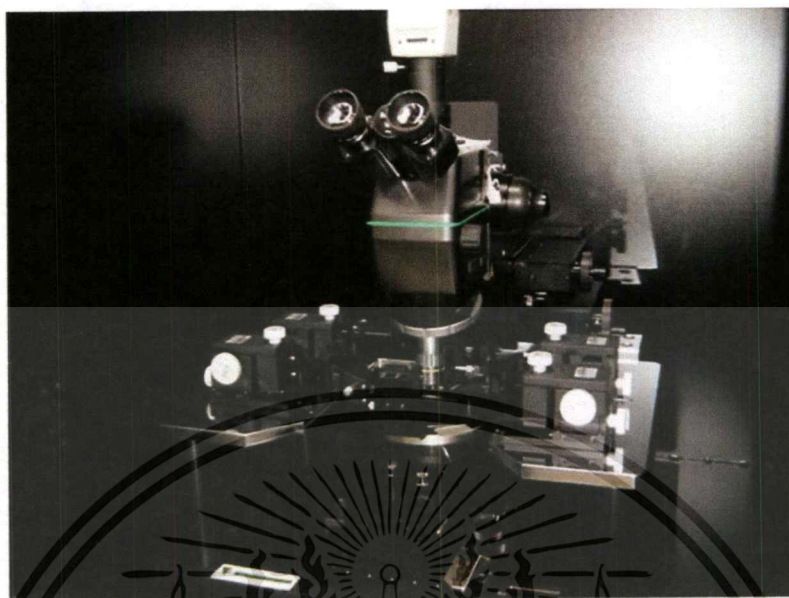
3.3.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กระแสต่ำ

ด้วยการสนับสนุนทางเทคโนโลยีของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ด้านอุปกรณ์เครื่องมือสำหรับวัดชิ้นงานที่อยู่บนแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องโพรบชิ้นงาน (probe) แบบหัวเข็มพร้อมกล้องจุลทรรศน์รุ่น Cascade Microtech Model M150 และเครื่องวัดและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำรุ่น Agilent B1500A โดยแทนวางชิ้นงานในเครื่องโพรบชิ้นงานจะประกอบเข้ากับเครื่องปรับอากาศด้วยลม ERS Aircool เพื่อควบคุมอุณหภูมิในการวัดตั้งแต่ 27-147 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำรุ่น Agilent B1500A

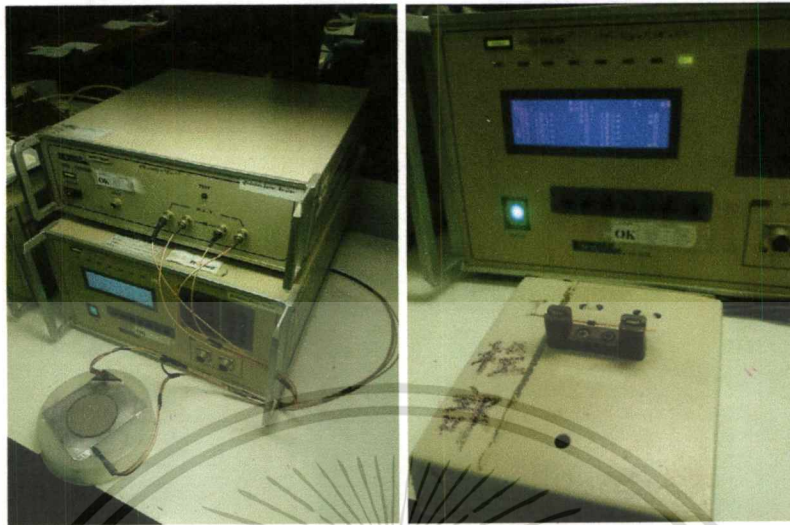
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่องโพรบใช้งาน (probe) แบบหัวเข็มพร้อมกล้องจุลทรรศน์รุ่น Cascade Microtech Model M150

3.3.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กระแสสูง

ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามที่ระบุในเอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ (datasheet) จำเป็นต้องวัดภายใต้เงื่อนไขการใช้งานจริง ซึ่งจะเป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ากำลัง ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวัดระบบดิจิทัลรุ่น TVR6000 จากบริษัท อีไอซี เซมิคอนดักเตอร์ จำกัด ซึ่งสามารถวัดคุณสมบัติได้แก่ แรงดันพังทลาย (V_B) ค่าแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าตกคร่อม (V_F) กระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R) และค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr})



a.

b.

รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดระบบดิจิตอลรุ่น TVR6000 a) ชุดเครื่องวัดงานบนแผ่นเวเฟอร์, b) หัวต่อเพื่อวัดงานที่ประกอบตัวถังแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

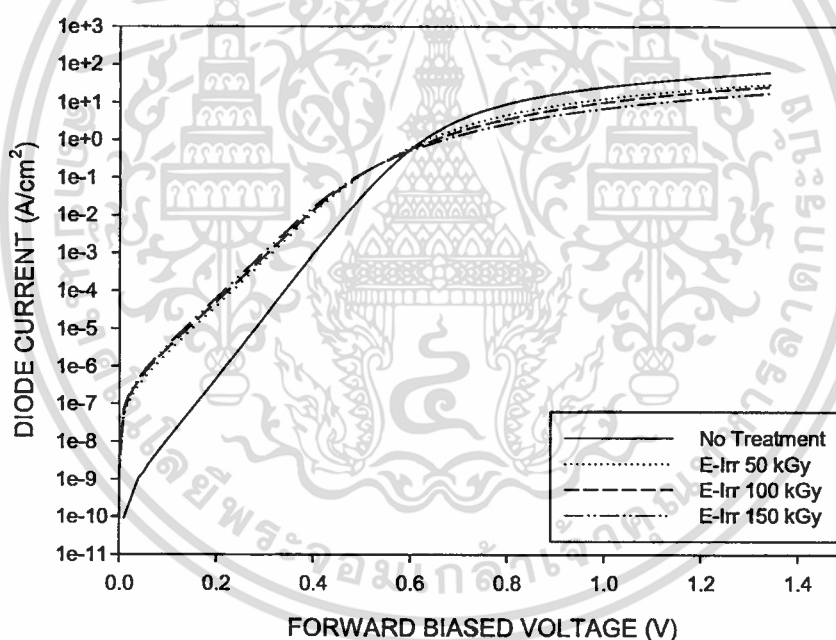
จากความมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้ที่ต้องการปรับปรุงกระบวนการผลิตไดโอดกำลังชนิด PIN โครงสร้างแบบเมซ่า โดยใช้วิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอนเข้ามาช่วยหรือแทนที่วิธีปกติที่ใช้ในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งนิยมใช้วิธีการแพร่ระดมพลตดิมมดั่งที่ได้ลงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 เพื่อให้การศึกษาได้ผลลัพธ์ที่ตรงตามความมุ่งหมาย การทดลองจึงเริ่มต้นที่การทดลองฉายรังสีลงบนอุปกรณ์ไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ผลิตในห้องวิจัยของ TMEC เพื่อจำกัดตัวแปรแฝงอื่นนอกเหนือไปจากรังสีอิเล็กตรอนที่จะเข้ามารบกวนการวิเคราะห์ผลลัพธ์เดี่ยวของรังสี ซึ่งเมื่อได้ผลจากการทดลองนี้ จึงนำผลที่ได้มาขยายผลที่การทดลองกับไดโอดชนิดเมซ่าที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม (บริษัท อีไอซี เซมิคอนดักเตอร์ จำกัด) และวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นต่อตัวอุปกรณ์ ทั้งการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการสวิตชิงหรือค่าเวลาการฟื้นตัว และที่สำคัญคือการถดถอยในประสิทธิภาพการนำกระแสไฟฟ้าและการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะหยุดนำกระแส และสุดท้ายผู้วิจัยได้นำผลลัพธ์ของการฉายรังสีไปขยายผลลงกับการใช้งานจริงในการปรับปรุงค่าไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ที่คุณสมบัติเสียหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตไดโอด เพื่อนำอุปกรณ์ที่เสียค่าไฟฟ้าไม่สามารถนำออกขายได้ กลับมาซ่อมแซมให้กลับมาเป็นอุปกรณ์ที่ค่าไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ต้องการได้

4.1 ผลของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่อซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN [24]

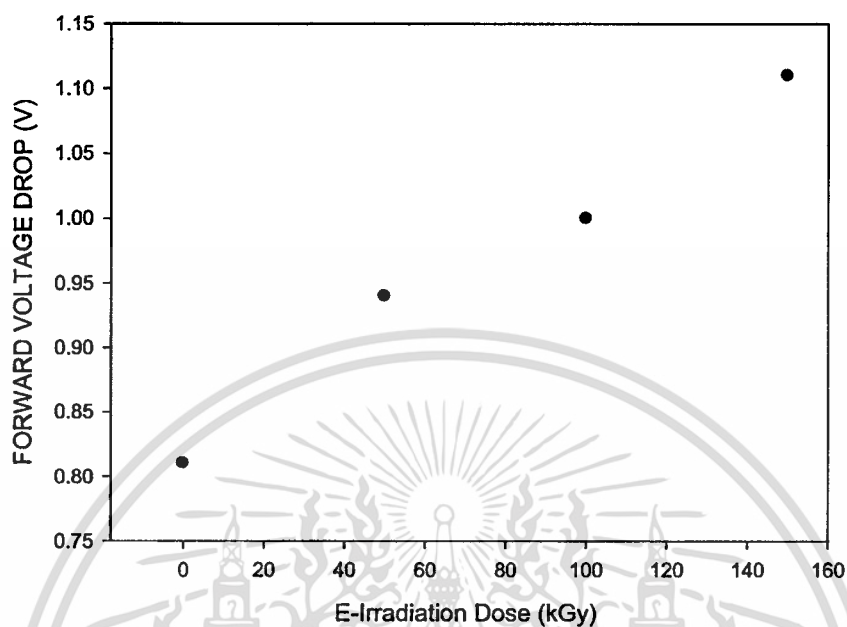
การเริ่มต้นของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อการศึกษาผลของรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่ออุปกรณ์โดยตรง เนื่องจากเมซ่าไดโอดกำลังนั้นมีโครงสร้างที่ค่อนข้างใหญ่ อุปกรณ์แฝงที่เกิดอาจมีการรบกวนต่อผลการทดลองได้ง่าย ดังนั้นการทดลองเริ่มต้นเพื่อการวิเคราะห์ในเชิงลึกนั้นจึงเริ่มต้นจาก ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ผลิตโดย TMEC ซึ่งมีขนาดและโครงสร้างที่ขจัดผลของอุปกรณ์แฝงได้ดีกว่า โดยอุปกรณ์ที่นำมาฉายรังสีนั้นผลิตขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีอะตอมสารเจือชนิดเอ็นความเข้มข้น $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ หนา $240 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งมีการปลูกชั้น $\text{N}^- \text{-Epi}$ ที่มีสภาพต้านทาน $60 \text{ }\Omega\text{-cm}$ ให้ได้ความหนา $60 \text{ }\mu\text{m}$ จากนั้นสร้างรอยต่อพีเอ็นด้วยวิธียิงประจุโปรตอนด้วยความหนาแน่น 10^{13} cm^{-2} ที่พลังงาน 60 keV จากนั้นจึงนำไปฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน 12 MeV โดยมีตัวแปรเป็นปริมาณรังสีตั้งแต่ 50 kGy ถึง 150 kGy เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อเนื้อสารซิลิคอนและรอยต่อพีเอ็น

4.1.1 ผลของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ต่อคุณสมบัติไฟตรง

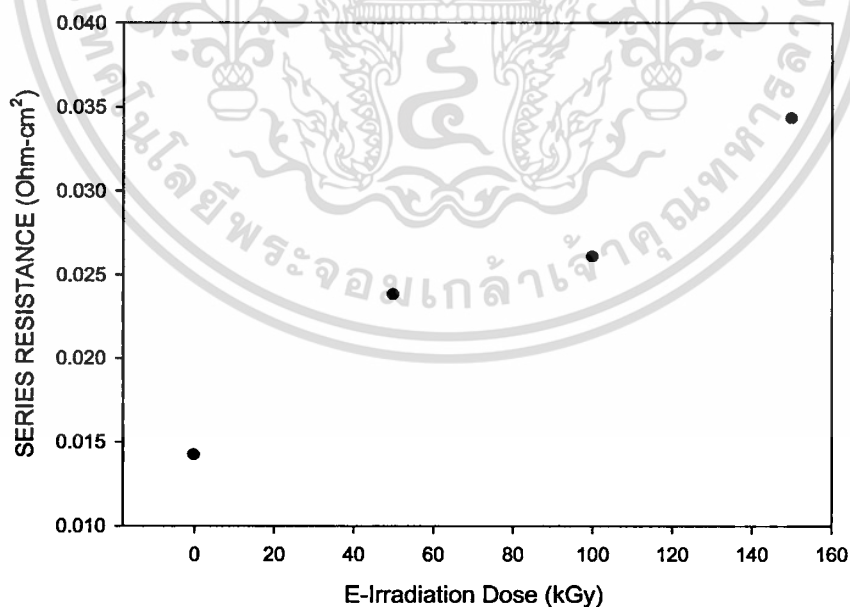
การนำกระแสในย่านไบอัสไปข้างหน้า ไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีจะมีการนำกระแสในช่วงแรงดันต่ำได้ดี แต่จะลดลงตามปริมาณของการฉายรังสีที่แรงดันสูง การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟข้างหน้าตกรวมเป็นผลมาจากค่าความต้านทานของฐานรองเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 4.2 เนื่องจากผลของการฉายรังสีที่สร้างจุดบกพร่องในเนื้อซิลิคอนก่อให้เกิดศูนย์กลางรวมตัว ซึ่งศูนย์กลางนี้เป็นต้นเหตุให้อายุพหุผลและทำให้ประสิทธิภาพการสวิชชิงดีขึ้น แรงดันตกรวมจึงเพิ่มขึ้นถึง ที่บริเวณนอกเขตปลอดภัยเมื่อมีการไหลของกระแสสูง เห็นได้จากรูปที่ 4.2 ที่เมื่อมีการฉายที่ปริมาณรังสีมากขึ้น แรงดันตกรวมก็เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีเกิดจุดบกพร่องมากขึ้น และเมื่อวัดค่าความต้านทานภายในของไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการฉายรังสี จึงสามารถยืนยันได้ว่า การฉายรังสีสร้างจุดบกพร่องภายในแลททิซซึ่งไปขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า เป็นผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟไปข้างหน้าของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

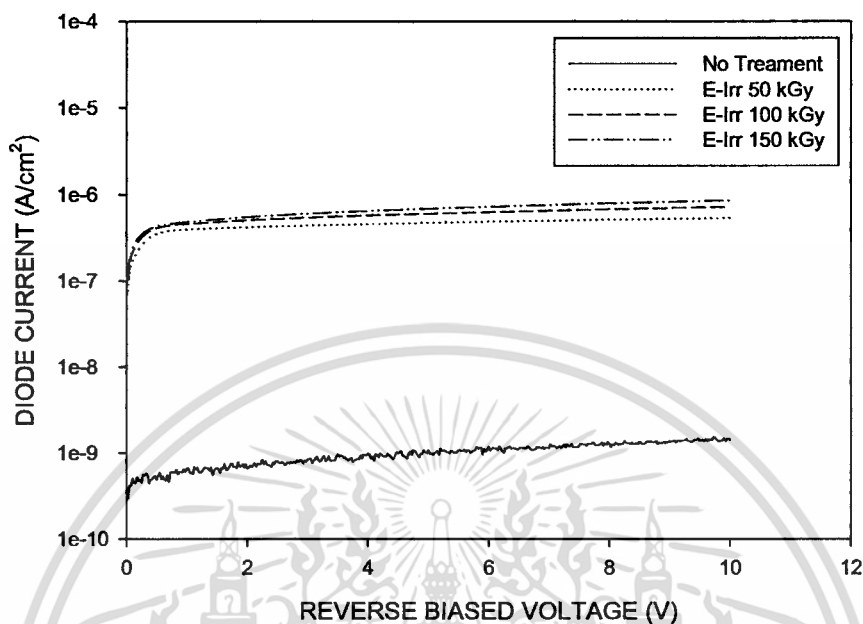


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมขั้วไบอัสแรงดันไฟไปข้างหน้าและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมภายในของไดโอดและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

ต่อมาเมื่อให้การไบอัสไฟฟ้าในทิศตรงข้าม พบว่าไดโอดที่ไม่ได้ฉายรังสีมีค่า กระแสรั่วไหลย้อนกลับที่ต่ำมาก เนื่องมาจากข้อเด่นของโครงสร้าง PIN แต่เมื่อฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์แล้ว พบว่ามีค่าสูงขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด (ประมาณ 1000เท่า) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสส่วนนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของ กระแสอิมิต์ย้อนกลับ ซึ่งจะถูวิเคราะห์ในส่วนของ การวิเคราะห์แบบแยกกระแส

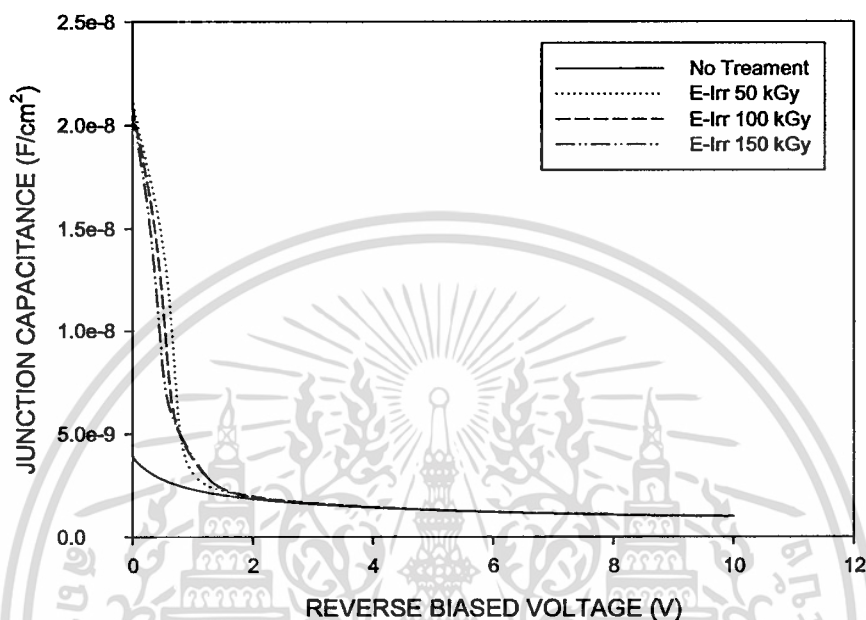
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อและแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ การวิเคราะห์ กราฟนี้ด้วยสมการค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อต่อแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ

$$C_j = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon N_A}{(V_{bi} \pm V_A)} \right]^{1/2} \tag{4.1}$$

และสมการค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อที่สัมพันธ์กับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

$$C_j = \frac{\epsilon A}{W} \tag{4.2}$$

ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะและแรงดันย้อนกลับ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์แยกส่วนกระแสต่อไปความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.3-2.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ

จากรูปที่ 4.5 คุณลักษณะของค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ สามารถวิเคราะห์หาตัวแปรบางอย่างได้จากสมการที่ 2.3-2.5 และวิเคราะห์ต่อเพื่อหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะตามสมการที่ 2.3-2.5 ตัวแปรที่สำคัญได้ตั้งตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าค่ากระแสอิ่มตัว (saturation current) และค่าอุดมคติ (ideality factor) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่ค่าความหนาแน่นของสารเจือในเนื้อสารซิลิคอน (bulk concentration) กับแทบไม่เปลี่ยนแปลงทั้งนี้เนื่องจากรังสีอิเล็กตรอนเพียงแค่นี้ทำให้โครงสร้างผลึกเสียหายแต่ไม่ได้เข้าไปทดแทนสารเจือเดิมจึงไม่ได้เปลี่ยนแปลงตัวแปรนี้แต่อย่างใด

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่สร้างขึ้นที่ TMEC

Item	Device			
	No treatment	E-Irr 50 KGy	E-Irr 100 KGy	E-Irr 150 KGy
N	1.01	1.33	1.36	1.37
$J_{\text{sat}} (\text{A/cm}^2)$	2.45E-10	8.79E-08	1.84E-07	2.37E-07
$J_{\text{dA}} (\text{A/cm}^2)$	4.41E-09	2.57E-07	3.81E-07	3.94E-07
$N_{\text{B}} (\text{cm}^{-3})$	1.19E+14	1.15E+14	1.12E+14	1.11E+14
$W_0 (\text{cm})$	5.11E-08	3.03E-08	2.61E-08	3.04E-08
$\tau_{\text{g}} (\text{s})$	1.20E-07	5.70E-09	3.09E-09	2.00E-09
$\tau_{\text{r}} (\text{s})$	1.15E-08	3.63E-12	1.74E-12	1.66E-12

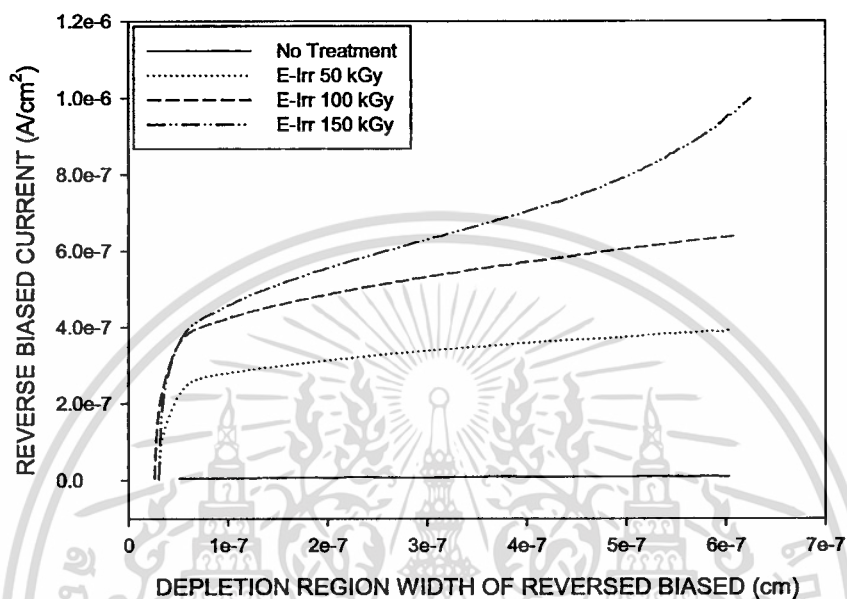
4.1.2 การวิเคราะห์กระแสแบบแยกส่วน

เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งสัมพันธ์กับการลดลงของอายุพหุ จากข้อมูลการวัดค่ากระแสต่อแรงดันจากไดโอดชนิด PIN เราจะเพิ่มส่วนการวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยจากรูปที่ 4.5 เราสามารถวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างเพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์แยกส่วนกระแส โดยการวิเคราะห์จะเกี่ยวข้องกับอายุของพหุส่วนน้อย ซึ่งจะประกอบด้วยสองส่วนได้แก่ ส่วนของการรวมตัวใหม่ในเนื้อฐานรองและส่วนของการเกิดที่จะเกิดในบริเวณปลอดพหุ ดังนั้นเราจะเริ่มวิเคราะห์จากกระแสน้อยกลับเมื่อไดโอดได้รับการไบอัสแรงดันย้อนกลับ โดยอาศัยความสัมพันธ์ ในสมการที่ 2.3-2.5

จากทั้งสามสมการ กระแสน้อยกลับที่ไหลเมื่อมีการไบอัสนั้นเป็นผลมาจากกระแสสองส่วนได้แก่ กระแสการแพร่ J_{dA} (diffusion current) และกระแสการเกิด J_{gen} (generation current) ซึ่งจะเห็นว่า กระแสการเกิดนั้นเป็นฟังก์ชันของความกว้างของบริเวณปลอดพหุ ซึ่งการไบอัสย้อนกลับนั้นจะทำให้บริเวณปลอดพหุขยายออก การวิเคราะห์กระแสส่วนนี้จึงนิยมทำในระหว่างการไบอัสย้อนกลับ ส่วนกระแสการแพร่นั้นส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าอายุพหุ เมื่อนำค่ากระแสย้อนกลับที่วัดได้จากรูปที่ 4.4 มาพล็อตหาความสัมพันธ์กับค่าความกว้างของบริเวณปลอดพหุจะได้ดังรูปที่ 4.6 และจากความสัมพันธ์สมการที่ 2.3 และ 2.4 สามารถหาค่า J_{dA} ได้จากจุดตัดแกน Y ของรูปที่ 4.6 ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งนั่นทำให้สามารถคำนวณหาค่าอายุพหุการรวมตัวใหม่ (recombination lifetime) ได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 ส่วนค่ากระแสการเกิดนั้นสามารถวิเคราะห์หาได้โดยการตัดส่วนของกระแสการแพร่ออกจากรูปที่ 4.6

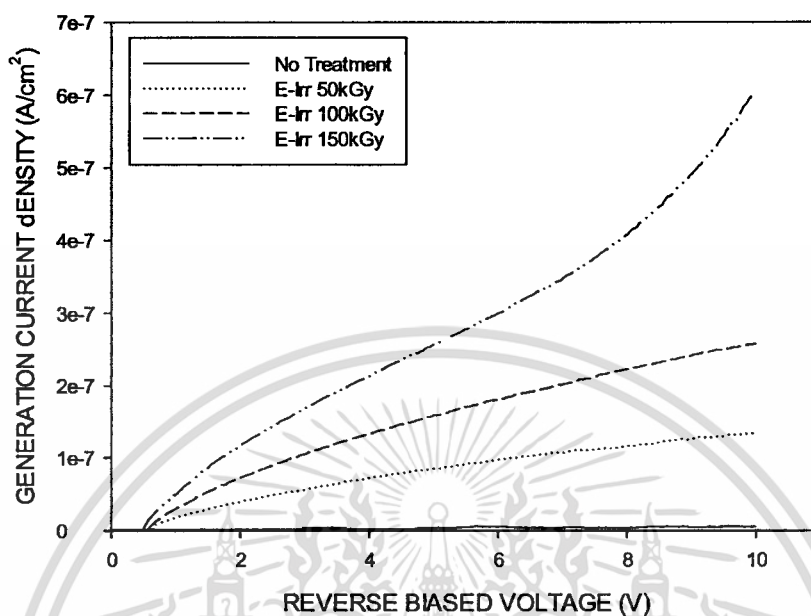
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 4.7 ส่วนอายุพาหะการรวมตัวใหม่นั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาความชันจากรูปที่ 4.7 แล้ว แก่สมการที่ 4.2



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสย้อนกลับและค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

ตามทฤษฎีของไดโอดอุดมคตินั้นจะถือว่ามีกระแสการเกิดนั้นน้อยมากหรือไม่มีเลย ดังจะเห็นได้จาก กราฟของไดโอดที่ยังไม่ได้ฉายรังสี มีค่าน้อยที่สุดและใกล้ศูนย์ แต่เมื่อมีการฉายรังสีก่อให้เกิดกับดักประจุ ทำให้เกิดเป็นศูนย์กลางการเกิดและการรวมตัวใหม่ ทำให้กระแสการเกิดเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเป็นที่แน่นอนว่าค่าอายุพาหะการเกิดนั้นต้องมีค่าน้อยลงมากเช่นกัน จากตารางที่ 4.1 พบว่ามีค่าลดลงประมาณ 100 เท่าและมีความผันแปรตามค่าปริมาณรังสีอิเล็กตรอน เช่นเดียวกับกับกระแสการแพร่ที่ขึ้นอยู่กับ กระบวนการรวมตัวใหม่ในเนื้อสารซิลิคอน เมื่อศูนย์กลางการรวมตัวเพิ่มขึ้นหลังการฉายรังสีกระแสส่วนนี้ จึงเพิ่มขึ้นมากด้วยเช่นกัน และอายุพาหะการรวมตัวใหม่ก็ลดลงอย่างเป็นสัดส่วนต่อปริมาณรังสี



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการเกิดและแรงดันย้อนกลับ

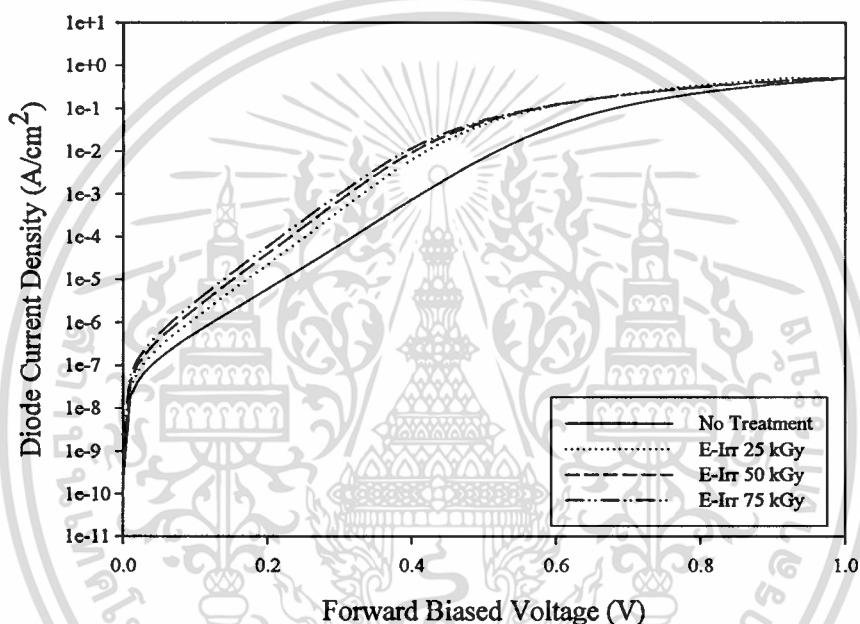
จากการทดลองกับซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่สร้างด้วยเทคโนโลยีของ TMEC ทำให้สามารถเข้าใจถึงการควบคุมอายุพาหะซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญต่อการลดค่าเวลาการฟื้นตัวของไดโอดกำลังประเภทพื้นผิวเร็ว นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงการถดถอยของคุณภาพของไดโอดที่อาจจะเปลี่ยนแปลงได้ภายหลังการฉายรังสี และขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำผลการทดลองนี้ไปประยุกต์ใช้จริงกับไดโอดกำลังที่ผลิตเชิงพาณิชย์อย่างแท้จริง

4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของไดโอดเมซ่าหลังการฉายรังสีอิเล็กตรอน [25]

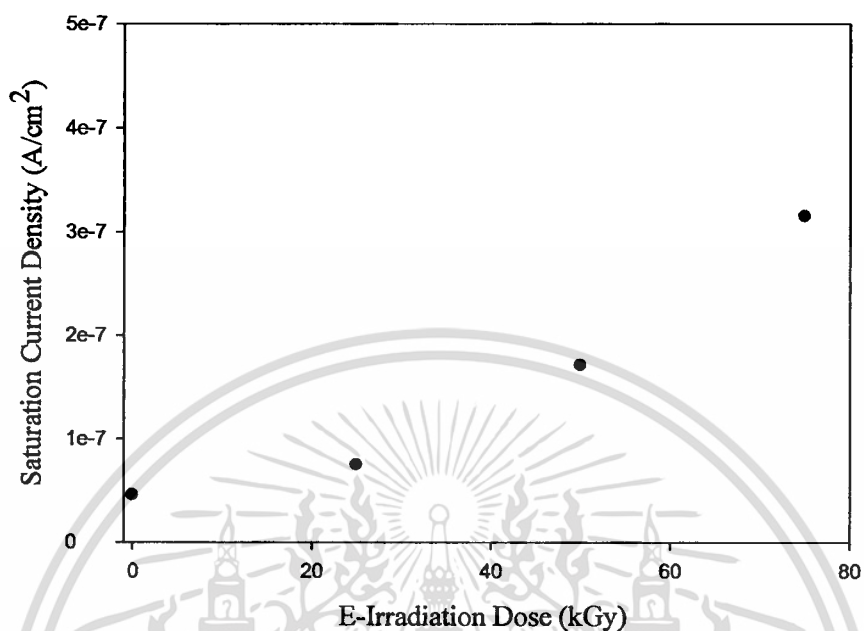
เพื่อการนำวิธีการฉายรังสีไปประยุกต์ใช้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้สร้างซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ขึ้นมาใหม่โดยใช้โครงสร้างเมซ่าตามแบบเทคโนโลยีที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า โดยใช้ฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ความต้านทาน 28-32 Ω-cm ทำการฉายรังสีที่ระดับพลังงาน 12 MeV เช่นเดียวกันกับการทดลองก่อน และดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อการเปลี่ยนปริมาณรังสี ตั้งแต่ 0-75 kGy โดยนำอุปกรณ์ที่ผ่านการฉายรังสีมาวัดด้วยเครื่องมือวัดรุ่น HP4156B

4.2.1 ผลของปริมาณรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่ไดโอดได้รับ

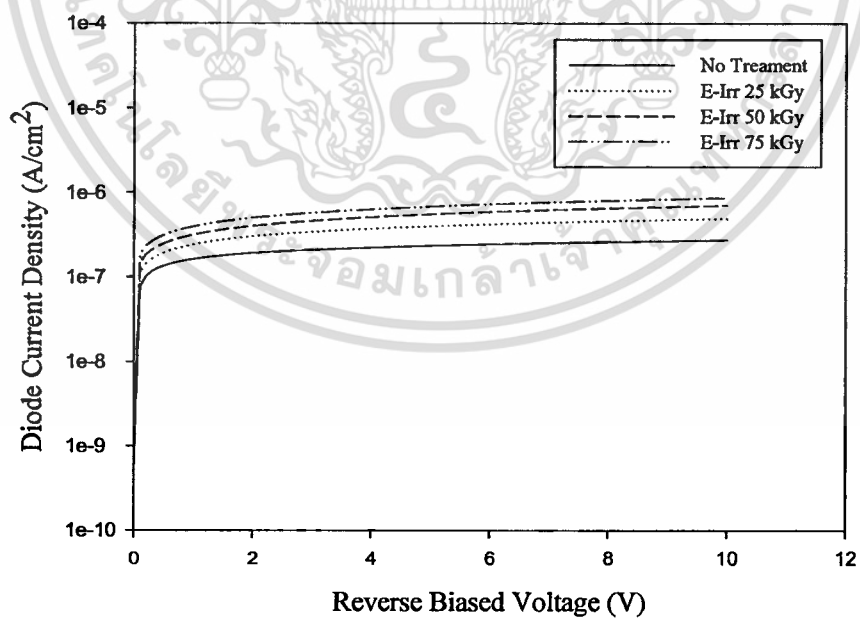
ผลการทดลองพบว่าสอดคล้องกับการทดลองด้วยไดโอดชนิด PIN ของ TMEC แตกต่างกันตรงส่วนของกระแสรั่วไหลย้อนกลับ ที่พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งอาจจะเป็นเพราะเทคโนโลยีการสร้างแบบเมชานั้นจะได้ไดโอดที่ทนทาน แต่ว่ากระแสนั้นจะค่อนข้างสูงแต่ยังอยู่ในระดับที่ใช้งานได้สมบูรณ์ ซึ่งกระแสที่สูงนี้เป็นกระแสที่รั่วไหลตามขอบของบริเวณร่องเมช่า ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้รังสีอิเล็กทรอนิกส์ต่อไดโอดที่ผลิตเชิงพาณิชย์ จะไม่กระทบต่อคุณสมบัติกระแสรั่วไหลย้อนกลับ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของไดโอดและแรงดันไฟไปข้างหน้า

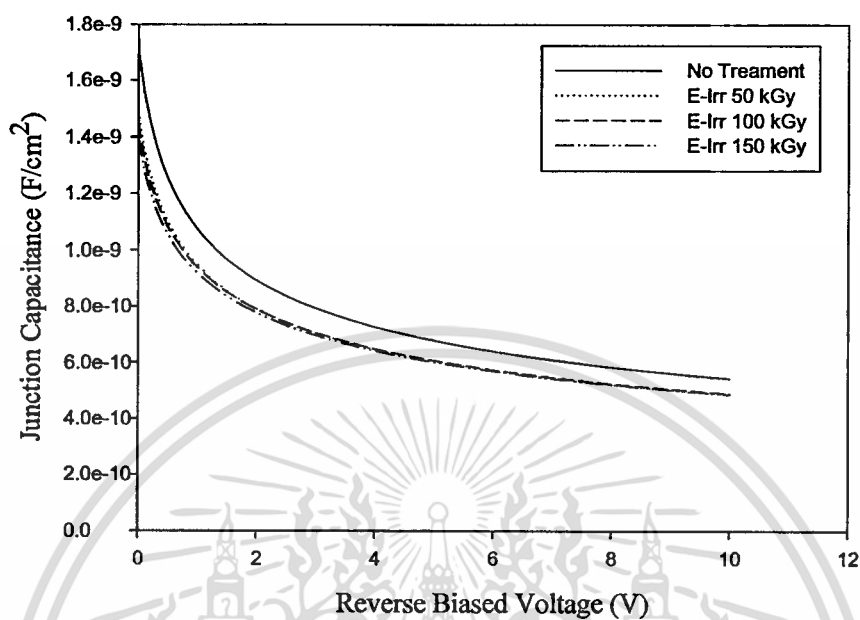


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวและปริมาณการฉายรังสี

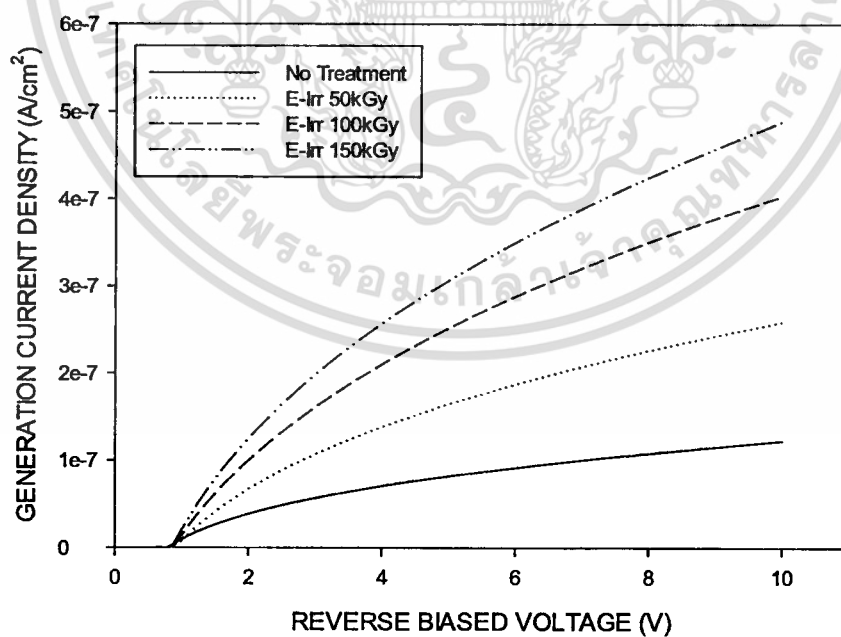


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของไดโอดและแรงดันไฟย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างต่างความจุไฟฟ้ารอยต่อของไดโอดและแรงดันไฟย้อนกลับ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการเกิดและแรงดันไฟย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของกระแสในตัวของไดโอดตลอดจนกระแสการเกิดที่เพิ่มขึ้นนั้น สอดคล้องกับการทดลองก่อน ดังนั้นจึงสามารถชี้ได้ว่า การฉายรังสีอิเล็กตรอนมีผลกระทบต่อซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้างเมซ่า เช่นเดียวกับกับ ไดโอดชนิด PIN ของ TMEC หรือโครงสร้างพลานาร์ และจากการคำนวณด้วยวิธีเดียวกันพบว่าค่าอายุพายุหะที่วัดได้หลังจากการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสี 25, 50 และ 75 kGy เป็น 14.8×10^{-9} , 9.5×10^{-9} และ 7.9×10^{-9} วินาที จากเดิมก่อนการฉายรังสีคำนวณไว้ได้ที่ 24.3×10^{-9} วินาที

4.2.2 ผลของกระบวนการประกอบไดโอดต่ออุปกรณ์ที่ถูกฉายรังสีอิเล็กตรอนบนแผ่นเวเฟอร์

เพื่อให้แน่ใจว่าการฉายรังสีอิเล็กตรอนสามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตไดโอดเชิงพาณิชย์ได้ จึงจำเป็นต้องนำไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีในรูปของแผ่นเวเฟอร์ไป ตัดแบ่งและประกอบตัวถังเป็นไดโอดที่พร้อมใช้งานและสามารถวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ครบถ้วนมากขึ้น

โดยการทดลองจะนำไดโอดชนิดซิลิคอน PIN ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อเมซ่าที่สร้างบนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นความต้านทานแผ่นที่ 19-22 $\Omega\text{-cm}$ ความหนาประมาณ $250\mu\text{m}$ พื้นที่ประสิทธิผลของไดโอดคือ $1.27 \times 1.27\text{ mm}$ ไปฉายลำรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสีค่าต่างๆ เพื่อศึกษาผลของการฉายลำรังสีอิเล็กตรอน โดยปริมาณรังสีที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 50, 75 และ 100 kGy แต่ละปริมาณรังสีจะทดสอบกับไดโอดจำนวน 50 ตัวทั้งนี้เพื่อดูการกระจายตัวของคุณสมบัติหลังการฉายรังสีเพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม หลังการฉายรังสีไดโอดเหล่านี้จะถูกวัดค่า t_r ทั้งก่อนและหลังการนำไปประกอบกับตัวถัง (diode assembly) เพื่อการทดลองใช้งานจริงและตรวจสอบการกระจายของคุณสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ อันได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (V_f) ค่าแรงดันพังทลาย (V_B) ค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ (I_R)

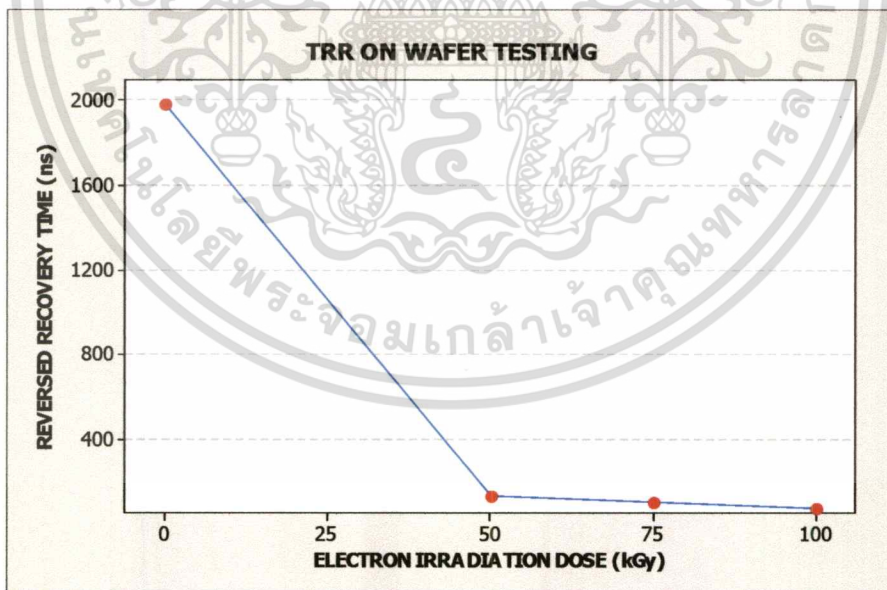
หลังการฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่างกัน ไดโอดถูกวัดเพียงแต่ค่า t_r และ I_R เนื่องจากการใช้งานจริง ค่า V_f และ V_B จะมีผลของรอยสัมผัสระหว่างอุปกรณ์ (chip) และขาอุปกรณ์ (lead) จึงจำเป็นต้องวัดหลังจากประกอบกับตัวถังแล้วจึงจะสามารถทราบค่าเหล่านี้ที่แท้จริงของไดโอดที่สร้างขึ้นได้ ซึ่งหลังการฉายรังสีพบว่าค่า t_r ของอุปกรณ์ลดลงอย่างผกผันต่อปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่รังสีจะสร้างจุดบกพร่องในโครงสร้างอะตอมของผลึกซิลิคอน และยังรังสีปริมาณมากก็จะมีทำให้เกิดจุดบกพร่องได้มาก จนทำให้ปริมาณศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่า t_r จึงลดลงจากไดโอดกลุ่มที่ไม่ได้ฉายประมาณ 2000 ns ลงมาเหลือที่ประมาณ 125, 97 และ 73 ns ตามลำดับ

การประกอบตัวถังไดโอดจะเป็นการเชื่อมต่อขาโลหะเข้ากับชิพที่ถูกตัดแบ่ง (dicing) ออกมาจากแผ่นผลึกซิลิคอน จากนั้นจึงทำการปิดทับส่วนที่เป็นชิพและรอยต่อเชื่อมกับขาโลหะด้วยฉนวน (epoxy) กระบวนการนี้เรียกว่าการ molding ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกทำที่อุณหภูมิสูงราว 180 องศาเซลเซียส จาก

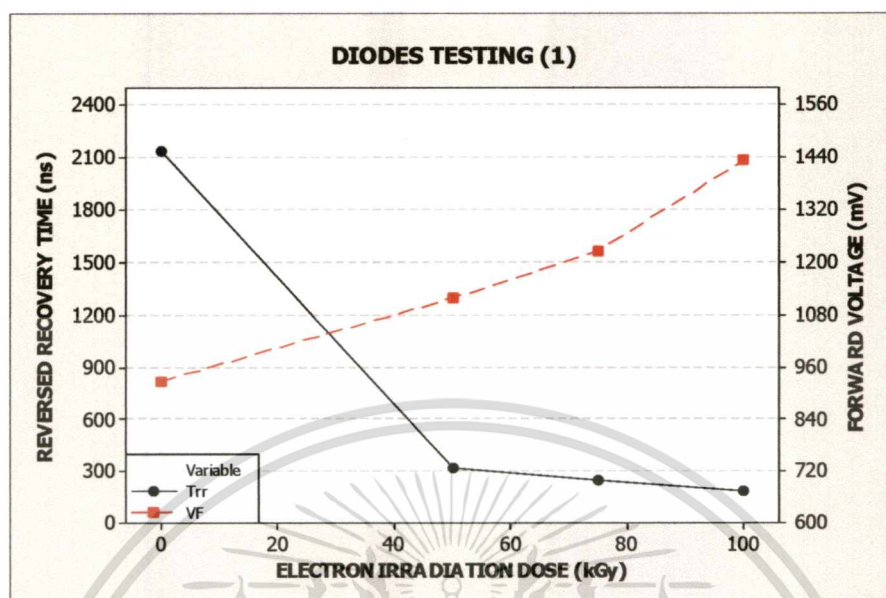
รูปที่ 4.2 จะเห็นว่าค่า t_{rr} มีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนการประกอบเป็นอย่างมากซึ่งอาจเป็นผลมาจากความร้อนที่ได้จากกระบวนการประกอบตัวถังทำให้โครงสร้างอะตอมที่เสียหายเกิดการเรียงตัวใหม่ (annealing) ทำให้ปริมาณของจุดบกพร่องลดลงดังนั้นค่า t_{rr} จึงเพิ่มขึ้นมาเกือบสองเท่าตัว แต่แนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่า t_{rr} ต่อปริมาณรังสียังคงไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนของ V_f ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการฉายรังสีสามารถอธิบายได้ว่าจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนอกบริเวณปลอดพาหะค่าความต้านทานของซิลิคอนเพิ่มขึ้นจึงมีผลทำให้ค่า V_f เพิ่มขึ้นตามกัน

ข้อดีของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ประการสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของค่า t_{rr} มีอยู่ในช่วงที่แคบ เนื่องจากการฉายรังสีจะมีขั้นตอนที่ทำให้รังสีถูกฉายออกมาเป็นลำที่มีความเข้มข้นสูงและสม่ำเสมอ และยิ่งการฉายรังสีที่ปริมาณสูงจะทำให้การกระจายตัวของ t_{rr} ลดลง เพราะสาเหตุหลักของการกระจายตัวของค่า t_{rr} เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์เดิมของแผ่นผลึกซิลิคอนซึ่งเป็นไปอย่างสุ่ม ดังนั้นการฉายรังสีลดค่า t_{rr} จึงไปชดเชยการกระจายตัวของ t_{rr} เนื่องจากความไม่สมบูรณ์เดิมของแผ่นผลึก

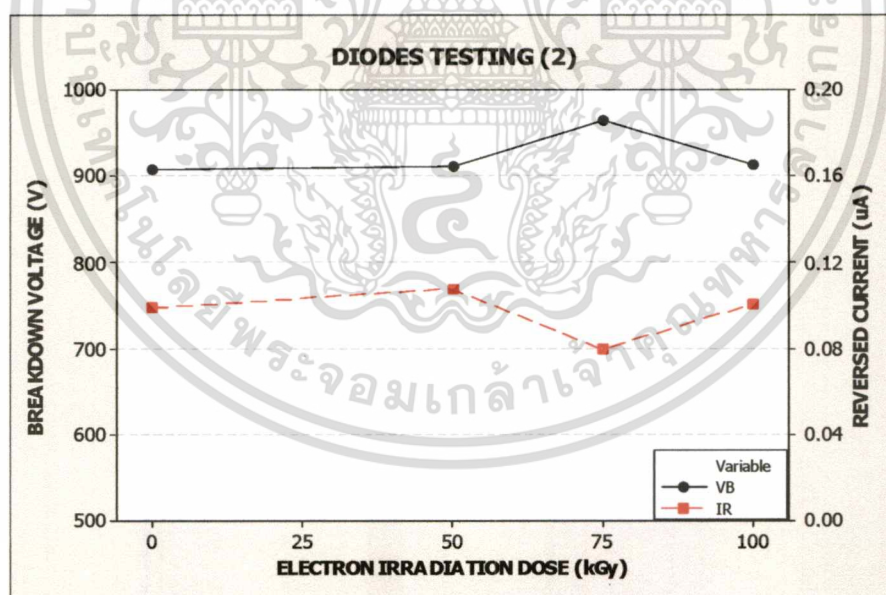
$$\tau_H = \frac{1}{N_T} \left(\frac{1}{v_{thn}\sigma_n} + \frac{1}{v_{thp}\sigma_p} \right) \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับและปริมาณรังสีอิเล็กทรอนิกส์ก่อนการประกอบ ไดโอด โดยวัดด้วยดีจิจิตอลมิเตอร์รุ่น TVR6000



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับกับแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าตกคร่อม และปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ของไดโอดหลังการประกอบไดโอด โดยวัดด้วยดิจิตอลมิเตอร์รุ่น TVR6000



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ค่าแรงดันพังทลายกับกระแสรั่วไหลย้อนกลับ และปริมาณของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ของไดโอดหลังการประกอบไดโอด วัดที่กระแสทดสอบ 5 μ A และแรงดันย้อนกลับ 600V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของค่าแรงดันพังทลายถือว่ามีเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก เพราะการพังทลายของไดโอดแรงดันสูงเป็นการพังทลายแบบอวาลานซ์และปริมาณของจุดบกพร่องถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนแลททิซ ดังนั้นการฉายรังสีอิเล็กตรอนจึงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันสูง แต่ในส่วนของกระแสรั่ว I_r ตามทฤษฎีเมื่อโครงสร้างผลึกมีจุดบกพร่องจะมีผลให้ I_r สูงขึ้น แต่ไดโอดที่ผลิตในอุตสาหกรรมมี I_r ที่สูงแต่สามารถยอมรับได้ในการใช้งานจริงและ I_r จากกระบวนการผลิตนี้สูงกว่าผลจากการฉายรังสีมาก จึงทำให้ไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีมีค่ากระแสรั่ว I_r ที่ถือได้ว่าไม่เปลี่ยนแปลง

4.3 การฉายรังสีเพื่อซ่อมแซมไดโอดที่เสียระหว่างขั้นตอนการผลิต [26]

การผลิตไดโอดเชิงพาณิชย์นั้น ไม่ว่าจะใช้วิธีใดในการควบคุมอายุพาหะต่างก็ประสบปัญหาเดียวกันคือการวัดค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ที่ไม่สามารถวัดได้ในระหว่างกระบวนการควบคุมอายุพาหะ ซึ่งขั้นตอนที่สามารถวัดค่า t_{rr} นี้ได้นั้นมักจะเป็นขั้นตอนในส่วนท้ายๆ ของกระบวนการสร้างแล้ว ซึ่งหากมีอาการเสียก็มักจะเสีย t_{rr} พร้อมกันทั้งหมดของชุดการผลิต ซึ่งความสูญเสียจะยิ่งมากขึ้นตามต้นทุนของแต่ละกระบวนการผลิต ดังนั้นหากสามารถซ่อมแซมไดโอดที่เสียเหล่านั้นได้ เท่ากับสามารถลดต้นทุนในส่วนของการเสียนี้ไปเป็นอย่างมาก ซึ่งการทดลองประยุกต์ใช้การฉายรังสีนั้นเป็นวิธีการที่แทบไม่มีการใช้อุณหภูมิสูงมาก (มากกว่า 300 องศาเซลเซียส) เข้ามาเกี่ยวข้องเลย ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ไขไดโอดที่เสียค่า t_{rr}

การทดลองส่วนนี้ใช้ไดโอดกำลังชนิดพื้นตัวเร็ว ที่ผ่านกระบวนการสร้างและควบคุมอายุพาหะด้วยการแพร่อะตอมแพลตตินั่มจนถึงประกอบเป็นตัวถังเรียบร้อยแล้ว วัดค่าเวลาฟื้นตัว (t_{rr}) ได้อยู่ที่ประมาณ 300-400 ns นำมาฉายรังสีที่อิเล็กตรอน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 kGy แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดดิจิทัลมิเตอร์รุ่น TVR6000 จำนวนสุ่ม 50 ตัวต่อเงื่อนไขการฉายรังสี พบว่าการกระจายตัวของค่า t_{rr} ภายหลังการฉายรังสีมีการกระจายที่แคบลงและลดลงอย่างเป็นสัดส่วนต่อปริมาณรังสีเช่นเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้านี้

แต่แม้ว่าการฉายรังสีจะสามารถช่วยลดค่าเวลาการฟื้นตัวได้มาก แต่สิ่งที่ต้องแลกกับมาคือค่าของแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าตกคร่อม (V_F) ที่สูงขึ้นอย่างเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากการทำลายโครงสร้างแลททิซทำให้ช่องทางเดินกระแสมีความต้านทานสูงขึ้น

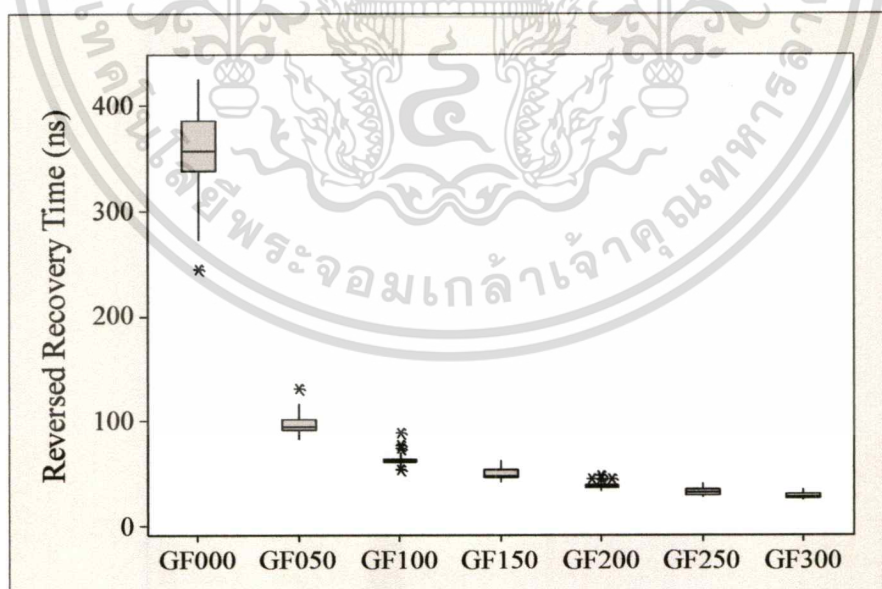
$$V_F = \frac{2kT}{q} \ln \left[\frac{J_T d}{2qD_a n_i F(d/L_a)} \right] \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $F(d/L_o)$ เป็นฟังก์ชันที่แปรผันตรงต่ออัตราส่วน d/L_o โดยที่ d คือความหนาของชั้นอินทรีนซิกและ L_o คือระยะการแพร่ของพาหะในเนื้อสาร

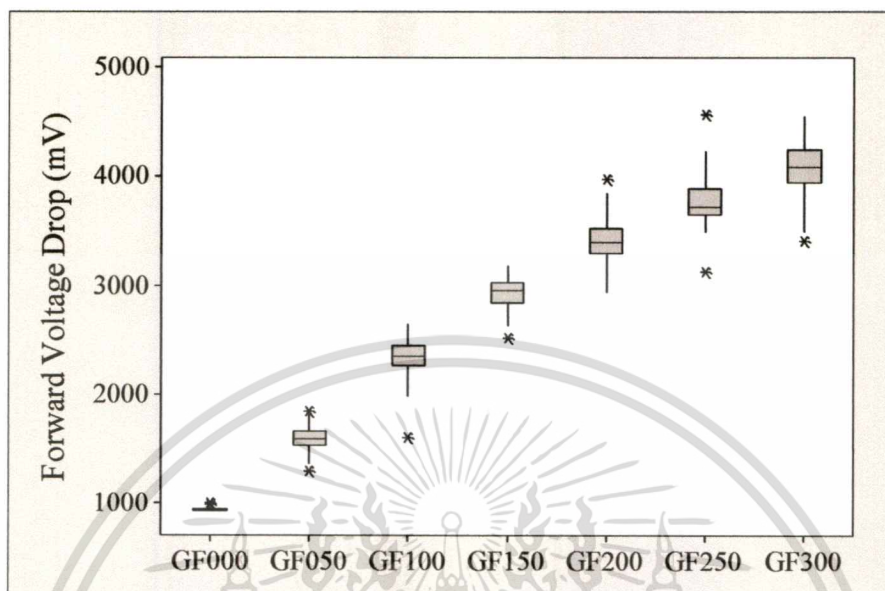


รูปที่ 4.16 โค้ดกำลังชนิดพื้นตัวเร็วที่ประกอบด้วยถึงหุน Axial lead



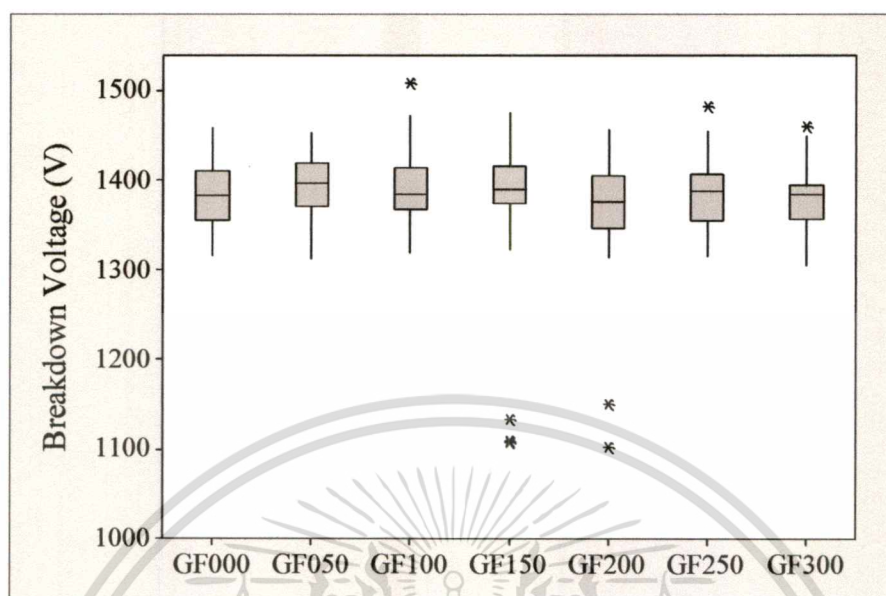
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับและปริมาณการฉายรังสี ด้วยการวัดด้วยเครื่องดิจิตอลมิเตอร์ TVR6000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

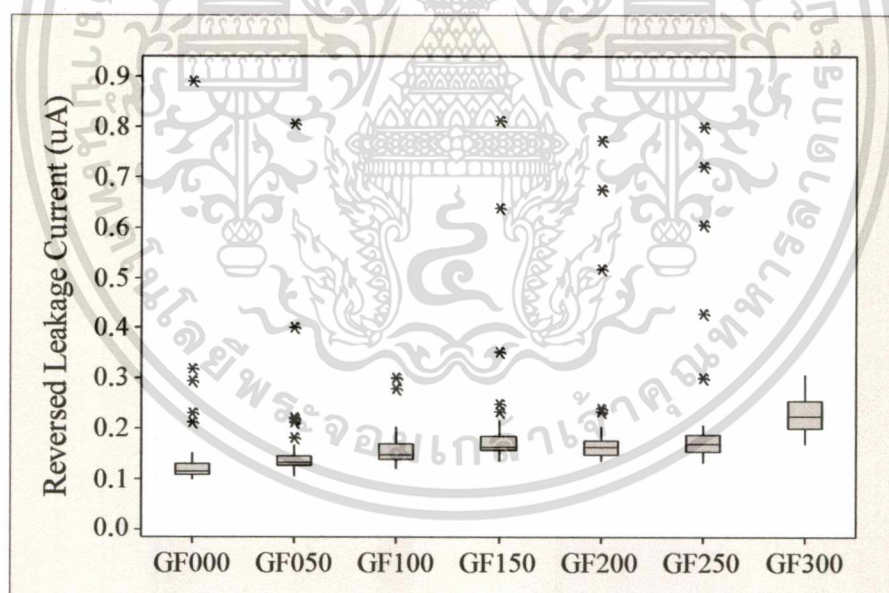


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไปข้างหน้าและปริมาณการฉายรังสี ที่กระแสทดสอบ 1mA

ในด้านการต้านทานแรงดันสูงในย่านการไบอัสย้อนกลับ การฉายรังสีไม่ได้รับกวนสนามไฟฟ้าภายในบริเวณหลอดพาหะ จึงแทบจะไม่มีผลต่อแรงดันพังทลาย แต่การเข้าไปทำให้เกิด dangling bond ของรังสีอิเล็กตรอน ก็เป็นส่วนสำคัญให้ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่และการเกิดเพิ่มสูงขึ้นจนเป็นเหตุให้กระแสอิมิต์ย้อนกลับเพิ่มสูงขึ้น ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในตอนต้นของบทนี้



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันพังทลายและปริมาณการฉายรังสี ที่กระแสทดสอบ 5 μA



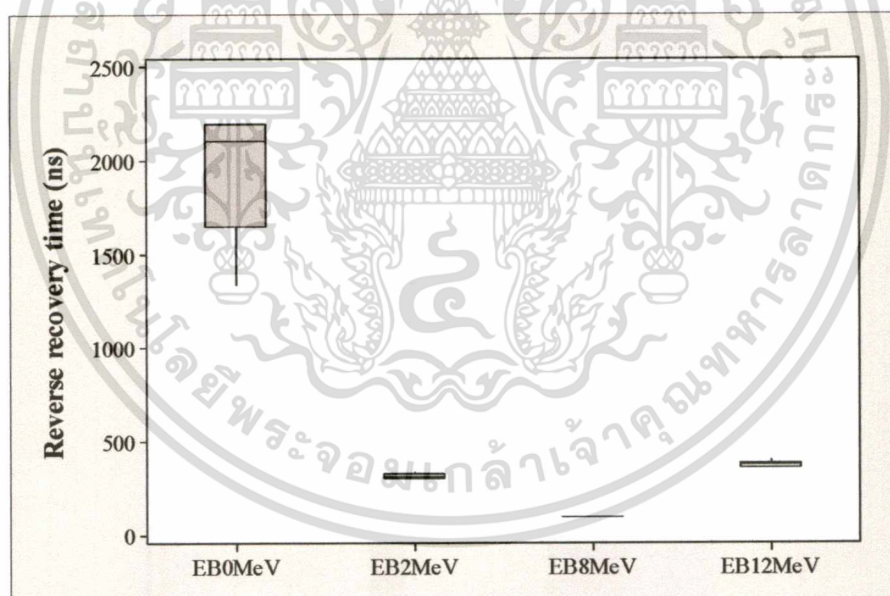
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับและปริมาณการฉายรังสี ที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ 1000 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

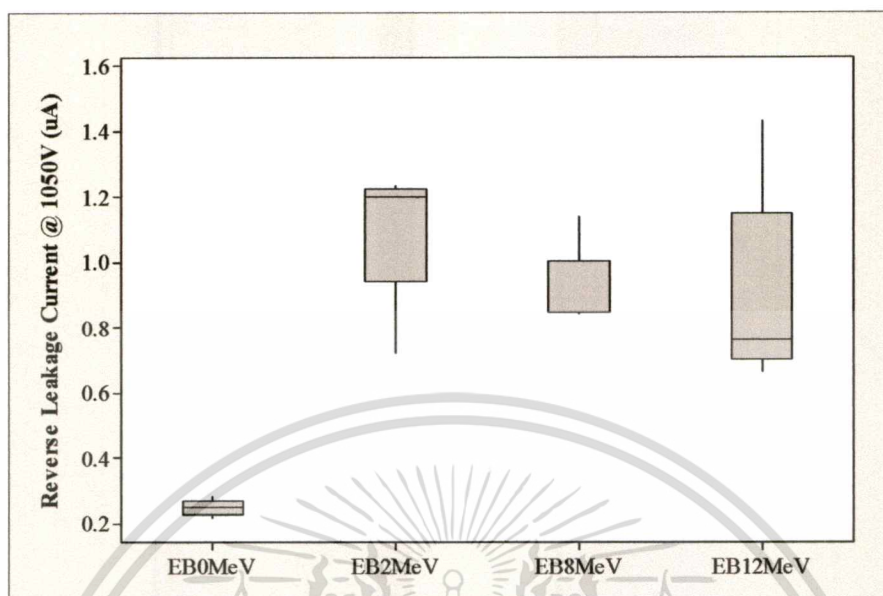
4.4 ผลของระดับพลังงานที่ใช้ในการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

ในการทดลองทั้งหมดที่ได้นำเสนอมานั้น เป็นการทดลองการฉายรังสีเพื่อดูผลกระทบของปริมาณรังสีที่มีต่ออุปกรณ์ โดยการใช้ระดับพลังงานที่คงที่ที่ 12 MeV แต่จากผลการทดลองข้างต้น จะพบว่าผลเสียที่เกิดขึ้นหลังการฉายรังสีนั้นมีมากพอๆ กับผลที่ได้จากการลดค่าเวลาฟื้นตัว t_{rr} ซึ่งการจะลดปริมาณรังสีลงอีกเพื่อให้ผลเสียที่เกิดขึ้นนั้นลดลง ก็อาจจะทำให้ผลที่ได้นั้นด้อยลงไป ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถปรับแต่งได้คือ ระดับพลังงานของการฉายรังสี ซึ่งในการทดลอง เราจะลดพลังงานของรังสีอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ ภาชนะใส่ใสน้ำแล้วไปวางขวางลำรังสีก่อนกระทบกับอุปกรณ์ที่จะฉายรังสี โดยทุก 1 cm จะสามารถลดทอนพลังงานได้ประมาณ 2 MeV

การทดลองฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 100 kGy แต่เปลี่ยนระดับพลังงานตั้งแต่ 2, 8, และ 12 MeV เพื่อเปรียบเทียบหาระดับพลังงานที่เหมาะสมที่สุดในการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมอายุพาหะ โดยการฉายรังสีจะทำหลังจากกระบวนการผลิตเวเฟอร์เสร็จสิ้นลง และอุปกรณ์ที่ถูกฉายรังสียังอยู่ในรูปของแผ่นเวเฟอร์ ดังรูป



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานที่ใช้ในการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์และค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับที่ปริมาณรังสี 100kGy



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานที่ใช้ในการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์และกระแสรั่วไหลย้อนกลับที่แรงดันย้อนกลับ 1050V

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ชัดเจนว่าระดับพลังงานที่สามารถทำให้ค่า t_{rr} ลดต่ำได้มากที่สุดคือระดับพลังงานที่ 8 MeV ซึ่งเนื่องมาจากระดับพลังงานจะเป็นตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดอำนาจการทะลุทะลวงของรังสี และเกี่ยวเนื่องกับตำแหน่งของจุดบกพร่องในชั้นอุปกรณ ซึ่งที่พลังงาน 8 MeV จะทำให้ความลึกที่เกิดจุดบกพร่องได้มากอยู่ในส่วนชั้นอินทรินซิกที่ใกล้รอยต่อ PN พอดีที่สุดในระดับพลังงานที่ใช้ทดลอง และในส่วนของกระแสย้อนกลับ จะเห็นอีกเช่นกันว่าที่ 8MeV จะมีแนวโน้มว่ามีค่า I_R ที่ค่อนข้างจะต่ำ

บทที่ 5

สรุป

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นการรวบรวมข้อมูลความรู้ที่เกี่ยวกับซิลิคอนไดโอดกำลังที่อยู่ในรูปของอุปกรณ์ตัวเดียว (discrete devices) ซึ่งยังมีใช้กันอย่างแพร่หลายและมีความคุ้มค่าแก่การลงทุนวิจัยเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในระดับอุตสาหกรรม อันประกอบไปด้วยทฤษฎีและหลักการตลอดจนไปถึงกระบวนการสร้างและกรรมวิธีในการควบคุมอายุพายุหะหรือค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งได้กล่าวถึงปัญหาของกรรมวิธีดังกล่าว อันนำมาซึ่งเป้าหมายของงานวิจัยเล่มนี้

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดยเริ่มต้นจากส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีต่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอน โดยทำการทดลองโดยการสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ด้วยการสนับสนุนด้านเทคโนโลยีการสร้างของ TMEC แล้วนำไดโอดกำลังชนิด PIN ดังกล่าวไปฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ระดับปริมาณรังสีต่างๆ เพื่อตรวจสอบผลของรังสีอิเล็กตรอนต่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง ทั้งคุณลักษณะทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกายภาพ ภายหลังจากการฉายรังสี ได้ทำการวัดความสัมพันธ์ของกระแสต่อแรงดัน ทั้งการไบอัสไฟไปข้างหน้าและการไบอัสย้อนกลับ รวมไปถึงคุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อเพื่อนำลักษณะสมบัติทั้งหลายนี้ไปวิเคราะห์ต่อด้วยการวิเคราะห์กระแสแยกส่วน เพื่อหาค่าอายุพายุหะที่เปลี่ยนไปหลังการฉายรังสี ซึ่งพบว่าอายุพายุหะลดลงหลังการฉายรังสีและเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณรังสี โดยอายุพายุหะนั้นลดลงไปราว 100-1000 เท่า ทำให้สามารถควบคุมอายุพายุหะได้จริงด้วยการจำกัดปริมาณรังสีอิเล็กตรอนที่อุปกรณ์ได้รับ ซึ่งเมื่อนำไดโอดที่ฉายรังสีไปวัดผลค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ได้ว่าสามารถลดลงได้เช่นเดียวกันกับอายุพายุหะ แต่การลดลงของค่า t_{rr} ไม่ได้ลดมากเท่าอายุพายุหะ อยู่ที่ประมาณไม่เกิน 100 เท่า แต่ผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นนั้นจะเห็นได้ว่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับนั้นเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากถึง 1000 เท่า ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างจุดบกพร่องด้วยการระดมยิงเนื้อสารซิลิคอนด้วยอิเล็กตรอน ทำให้กระแสในส่วนของกระแสการเกิดและกระแสแพร่เพิ่มขึ้น ซึ่งนั่นมีผลต่อกระแสอิมิต์ย้อนกลับเพิ่มขึ้นราว 100-1000 เท่าตามปริมาณรังสีที่ได้รับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านทานอนุกรมของอุปกรณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนต่อปริมาณรังสี อันเป็นผลมาจากจุดบกพร่องที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการฉีดพายุหะลดลง

เมื่อเรทราบแนวโน้มของผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากการฉายรังสีอิเล็กตรอน ในส่วนต่อมาจึงเป็นการนำฉายรังสีอิเล็กตรอนเพื่อประยุกต์ใช้จริงกับไดโอดกำลังชนิดตัวเดียวที่ถูกผลิตเชิงพาณิชย์จริง โดยโครงสร้างไดโอดกำลังที่จะใช้ในการทดลองเป็นโครงสร้างรอยต่อแบบเมซ่า ถูกผลิตขึ้นด้วยการ

สนับสนุนกระบวนการผลิตจาก บ. อีไอซี เซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งเป็นการผลิตเชิงพาณิชย์ โดยหลังเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตไดโอดกำลังชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบเมซ่า ไดโอดจะถูกนำไปฉายรังสีขณะที่อุปกรณ์อยู่ในรูปของแผ่นผลึกซิลิคอน นำไปฉายรังสีด้วยวิธีการเดียวกันกับ ไดโอดจาก TMEC ซึ่งผลการทดลองได้สอดคล้องกับผลการทดลองซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN จาก TMEC คือสามารถลดค่าเวลาการฟื้นตัวได้ โดยหลังการฉายรังสีค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับลดลงอย่างพหุคูณกับปริมาณรังสีที่ไดโอดได้รับ โดยค่า t_{rr} ที่วัดได้หลังฉายรังสีลดลงไปราว 10-100 เท่า แต่ในส่วนของกระแสรั่วไหลย้อนกลับ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและยังอยู่ในพิสัยที่ยอมรับได้สำหรับการผลิตเพื่อการพาณิชย์ แต่สิ่งที่ควรระวังคือเรื่องของแรงดันไฟไปข้างหน้าตกคร่อมหรือ V_F ที่สูงขึ้นเนื่องจากค่าความต้านทานภายในสูงขึ้นดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น ในส่วนนี้จึงเป็นข้อจำกัดหนึ่งสำหรับการใช้รังสีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมค่าเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับหรือ t_{rr} นอกจากนี้ผลของการประกอบไดโอดหีบตัวถึงหุ่น Axial lead หรือหุ่นอื่นๆ ที่ต้องอาศัยความร้อนสูง ประมาณ 400 องศาเซลเซียสเพื่อทำการเชื่อมขาโลหะกับตัวชิปไดโอด จะมีผลทำให้ค่า t_{rr} เพิ่มขึ้นระดับหนึ่ง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความร้อนส่วนนี้ทำให้พันธะบางส่วนที่เสียหายคืนรูป จึงทำให้กับดักพาหะส่วนน้อยนั้นลดลง และทำให้ค่า t_{rr} กลับเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อย

ในส่วนตัวมา เป็นการนำความรู้ที่ได้จากการทดลองสองส่วนแรกมาประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจริงเพื่อแก้ปัญหาให้กับภาคเอกชน และทำให้งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่สามารถใช้เพื่อการพาณิชย์ได้จริง ซึ่งปัญหาที่พบคือการสร้างไดโอดกำลังประเภทพื้นผิวเร็วในปัจจุบันด้วยวิธีการแพร่ระดมแพลตตินัมที่มีความนิ่งของกระบวนการผลิตในระดับหนึ่ง แต่ก็ยังมีโอกาสเกิดของเสียที่กระบวนการผลิตขั้นตอนท้ายๆ ซึ่งนำมาซึ่งการสูญเสียผลผลิต ทั้งต้นทุนที่จะสูงขึ้น และการล่าช้าในการส่งมอบสินค้าให้ลูกค้า ดังนั้นหากสามารถนำสินค้าที่เสียในส่วนของค่า t_{rr} เกินข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ (datasheet) กลับมาซ่อมแซมเพื่อให้ได้สินค้าที่มีคุณภาพตรงตามข้อกำหนด จะเป็นการลดปัญหาของเสียดังกล่าวไปได้ วิธีการซ่อมแซมไดโอดที่มีค่า t_{rr} สูงเกินไป ทำได้โดยการนำไดโอดที่ควบคุม t_{rr} ด้วยกรรมวิธีแพร่ระดมแพลตตินัมและประกอบตัวถึงเสร็จแล้วไปทำการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ พบว่ารังสีอิเล็กทรอนิกส์ยังสามารถลดค่า t_{rr} ได้จริง สามารถลดเพิ่มได้อีก 3-4 เท่าตัว แต่เช่นเดียวกันสิ่งที่ต้องระวังนั้นคือค่า V_F จะสูงขึ้น ซึ่งด้วยวิธีการแพร่ระดมแพลตตินัมค่า V_F จะสูงกว่าไดโอดกำลังทั่วไปอยู่แล้ว ดังนั้นจึงอาจใช้วิธีฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการแก้ไขค่า t_{rr} เพียงเล็กน้อยเพื่อให้อยู่ในพิสัยที่ต้องการได้ โดยอาจจะฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่ำกว่า 25 kGy โดยต้นทุนที่ใช้ในตำแหน่งมีความคุ้มที่จะเลือกนำวิธีดังกล่าวไปใช้งาน

และส่วนสุดท้ายเนื่องจากปัญหาของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์คือการปรับสมดุลระหว่างค่า t_{rr} ที่ลดลง ซึ่งจะสวนทางกับค่า V_F ที่สูงขึ้น ส่วนท้ายของการวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของการฉายรังสีด้วยการปรับระดับพลังงานที่ใช้ในการฉายรังสี โดยในการทดลอง จะนำไดโอดที่เป็นอุปกรณ์อยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอนมาฉายรังสีที่ปริมาณรังสีเดียวกัน แต่ปรับที่พลังงานที่ใช้ในการเร่งความเร็ว

อิเล็กตรอนตั้งแต่ 2-12 MeV ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่า t_{rr} นั้นจะตอบสนองต่อระดับพลังงานที่ต่างกันได้อย่างต่างกัน และระดับพลังงานที่ทำให้ค่า t_{rr} ลดมากที่สุดเมื่อฉายรังสีอิเล็กตรอนแก่อุปกรณ์ที่อยู่บนแผ่นเวเฟอร์คือที่ระดับพลังงานช่วง 8MeV ซึ่งเป็นการกำหนดตำแหน่งที่ต้องการการเกิดกับดักประจุได้ ดังนั้นเมื่อการฉายรังสีปริมาณที่มากจะทำให้ค่า V_F สูงขึ้น การเลือกระดับพลังงานที่ใช้ในการฉายรังสีจึงเป็นอีกแนวทางที่จะใช้สำหรับการลดค่า t_{rr} ให้มากโดยใช้ปริมาณของรังสีที่น้อยลง และทำให้ค่า V_F ไม่สูงขึ้นมาเกินข้อกำหนดผลิตภัณฑ์

ปัจจุบันแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพื่อการใช้งานระบบไฟฟ้ากำลัง มีการคิดและออกแบบโครงสร้างใหม่ๆ เพื่อประโยชน์ทางด้านสวิตชิงที่ดีขึ้น ไม่ว่าจะเป็น โครงสร้างผสมของ ไดโอดชนิด PIN ร่วมกับโครงสร้างไดโอดชนิดทิกกี (MPS) และโครงสร้างร่วมของ MOS transistor กับ bipolar transistor ที่เรียกว่า IGBT หรือการเลือกใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำใหม่ประเภทแถบพลังงานที่กว้างเช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นแนวทางเหล่านั้นจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีการผลิตที่ค่อนข้างมีราคาแพง ทำให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีราคาสูงมาก จนเป็นเหตุให้ผู้ใช้งานทั่วไปจำเป็นต้องยอมเลือกใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดตัวเดียวที่ราคาถูกแต่สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก จึงเป็นโอกาสทางธุรกิจที่สำคัญในการพัฒนาให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำดังกล่าวสามารถพัฒนาให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพที่สูงขึ้นในขณะที่ราคาไม่สูงจนผู้ใช้งานไม่สามารถนำมาใช้ได้ ผู้เขียนจึงหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สามารถลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับผู้ผลิตในสมรรถนะการแข่งขันทั้งทางด้านราคาและคุณภาพ ตลอดจนทำให้ผู้ใช้งานลำดับสุดท้ายสามารถเลือกใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีการสิ้นเปลืองพลังงานที่ต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. N. Hall, "Electron-hole recombination in germanium", Phys. Rev., vol. 87, p. 387, July 1952.
- [2] W. Shcockley, and W.T. Read, "Statistic of the Recombinations of Holes and Electrons", Phys. Rev., vol. 87, p. 835, September 1952.
- [3] M.D. Miller, H. Schade, and C.J. Nuese, "Use of Platinum for Lifetime Control in Power Devices", International Electron Devices Meeting, Vol.21, p.180-183, 1975.
- [4] M.D. Miller, "Differences between Platinum- and Gold-Doped Silicon Power Devices", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-23, No.12, December 1976.
- [5] S. Lingkon, J.S. Whiteley, B.J. Baliga, "Lifetime Control by Palladium Diffusion in Silicon", International Electron Devices Meeting, Vol.23, p.494-497, 1977.
- [6] B.J. Baliga, and E. Sun, "Comparison of Gold, Platinum, and Electron Irradiation for Controlling Lifetime in Power Rectifiers", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-24, No. 6, June 1977.
- [7] J.W. Corbett, "Electron Radiation Damage in Semiconductors and Metals", New York: Academic Press, 1966.
- [8] A. O. Ewwaraye and B.J. Baliga, "Identification of dominant recombination centers in electron-irradiated semiconductor devices", Fall Meeting of Electrochemical Society, Las Vegas, NV, Oct. 1976 (submitted to J. Electrochem. Soc.)
- [9] P. Rai-Choudhury, J. Bartko, and J.E. Johnson, "Electron irradiation induced recombination centers in silicon-minority carrier lifetime control", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-23 pp.814-818, Aug. 1976.
- [10] R.O. Carlson, Y.S. Sun, and H.B. Assalt, "Lifetime Control in Silicon Power Devices by Electron or Gamma Irradiation", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-24, No. 8, August, 1977.
- [11] W. A. Strifler and B.J. Baliga, "Comparison of Neutron and Electron Irradiation for Controlling IGT Switching Speed", IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. ED-32, No. 9 September 1985.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] D.K. Schroder, "Carrier lifetimes in Silicon", IEEE Trans. Electron Devices, ED-44, p.160, 1997.
- [13] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd ed., New York: Wiley 1981.
- [14] Benda, V., Gowar J., Grant, D.A: Power Semiconductor Devices: Theory and Applications, Wiley, Chichester, 1999
- [15] A. Poyai, "Defect Assessment in Advanced Semiconductor Material and Devices", 2002.
- [16] B. Jayant Baliga, "Fundamentals of Power Semiconductor Devices", Power Semiconductor Research Center North Carolina State University: New York, 2008.
- [17] B. Jayant Baliga, "Fundamentals of Power Semiconductor Devices", Springer Science+Business Media, USA, 2008.
- [18] A. Lekholm and P. Weissglas, "Edge Breakdown in Mesa Diodes", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. ED-18, NO. 10, OCTOBER 1971.
- [19] S. Salkalachen, N. H. Krishnan and S. Krishnan, "Edge Passivation and Related Electrical Stability in Silicon Power Devices", IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, Vol 3. No. 1, FEBRUARY 1990.
- [20] Ravi V. Prasad, "Structure of Semi-Insulating Polycrystalline Silicon (SIPOS)", Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 1986.
- [21] S.N. Ahmeed, "Physics and Engineering of Radiation Detection", Academic Press Inc. Published by Elsevier 2007.
- [22] V. Benda, "Carrier lifetime control in power semiconductor devices", International Workshop on Physics of Semiconductor Devices, 2007. IWPSD 2007., p. 755 – 761, 2007.
- [23] Ralph McArthur, "Defining Diode Data Sheet Parameters" Application Note APT0301 Rev-Feb 10, 2003
- [24] W. Itthikusumarn, J. Prabket, N. Attiwongsangthong, A. Poyai, W. Thitiroongruang, "Degradation in Electrical Properties of Si-PIN Power Diodes after Treatment by Electron Irradiation", The 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2013) 4-6 September 2013, Samui Island, Thailand.

- [25] W. Itthikusumarn, W. Jakpetch, W. Thitiroongruang, "Minority Carrier Lifetime Controlling of Mesa Diodes by Electron Beam Irradiation", Advance Materials Research Vol.811 (2013) pp 200-204, 2013.
- [26] W. Itthikusumarn, W. Jakpetch, W. Thitiroongruang, "Reverse recovery time reworking of fast recovery diodes for industrial production", The 4th International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE 2015), Taipei, Taiwan from May 4th to 6th, 2015.
- [27] A. Chalamnongnoot, W. Itthikusumarn, W. Thitiroongruang, "Effect of Junction Shape on Diode Properties", Advance Materials Research Vol.717 (2013) pp 125-128, 2013.
- [28] สธน ผ่องอำไพ, จิรวัดน์ ปราบเขต, วิวัฒน์ อธิธิกุศล, ภาสภม มโนสุกฤตกุล, อัมพร โพธิ์โย และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, "ผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนต่อคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON35), หน้า 759-762, 2555.
- [29] สธน ผ่องอำไพ, จิรวัดน์ ปราบเขต, วิวัฒน์ อธิธิกุศล, ขบา สุริยอัมรานนท์, ภาสภม มโนสุกฤตกุล, อัมพร โพธิ์โย และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, "ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5 (EENET 2013), 2556.
- [30] พรหมพัทธ์ ดาวัลต์, วิวัฒน์ อธิธิกุศล, ขบา สุริยอัมรานนท์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, "การประยุกต์ใช้วิธีฉายลำรังสีอิเล็กตรอนเพื่อลดค่า t_{rr} ในอุตสาหกรรมการผลิตไดโอดแบบพื้นตัวเร็วชนิดซิลิคอนพินโครงสร้างเมซ่า", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5 (EENET 2014), 2557
- [31] S.K. Ghandi, "Semiconductor Power Devices", Wiley, New York, 1977.
- [32] D.K. Schroder, "Semiconductor material and device characterization", John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [33] สมเกียรติ ศุภเดช. เขมิกอนดักเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547.
- [34] E. Iliescu, A. Niculescu, V. Banu, A. Nichita and N. Sturzu, "Electron irradiation for adjusting the reverse recovery time and forward voltage drop characteristics of fast diodes", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 1998 page 502-505.

- [35] C. Codreanu, "Free Carrier Lifetime Reduction in Silicon by Electron-beam Irradiation", International Semiconductor Conference, 2000. CAS 2000, Proceedings, vol.1, p.255-258.
- [36] C. Codreanu, "Silicon diode electrical Characteristics under Electron-beam Irradiation Conditions – Experiments and Theoretical Interpretation", International Semiconductor Conference, 2001. CAS 2001, Proceedings, vol.2, p.481-484.
- [37] V.K. Khanna, "Physical Understanding and Technological Control of Carrier Lifetimes in Semiconductor Materials and Devices: A Critical and Conceptual Development State of Art and Applications", Progress in Quantum Electronics 29,p.59-163,2005.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

[1] *Wiwat Itthikusumarn*, Wittaya Jakpetch, Wisut Titiroongruang, “Minority Carrier Lifetime Controlling of Mesa Diodes by Electron Beam Irradiation”, *Advance Materials Research* Vol.811 (2013) pp 200-204, 2013.

[2] Aekaluck Chalamnongnoot, *Wiwat Itthikusumarn*, Wisut Titiroongruang, “Effect of Junction Shape on Diode Properties”, *Advance Materials Research* Vol.717 (2013) pp 125-128, 2013.

ผลงานนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 3 เรื่อง

[1] *Wiwat Itthikusumarn*, W. Jakpetch, W. Titiroongruang, “Minority Carrier Lifetime Controlling of Mesa Diodes by Electron Beam Irradiation”, 2nd International Conference on Mechanical Properties of Materials and Information Technology (ICMPMIT 2013), August 17-19, 2013, Hong Kong.

[2] *Wiwat Itthikusumarn*, J. Prabket, N. Attiwongsangthong, A. Poyai, W. Titiroongruang, “Degradation in Electrical Properties of Si-PIN Power Diodes after Treatment by Electron Irradiation”, The 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2013) 4-6 September 2013, Samui Island, Thailand,

[3] *Wiwat Itthikusumarn*, W. Jakpetch, W. Titiroongruang, “Reverse recovery time reworking of fast recovery diodes for industrial production”, The 4th International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE 2015), Taipei, Taiwan from May 4th to 6th, 2015.

ผลงานนำเสนอในที่ประชุมวิชาการในประเทศ 3 เรื่อง

สุกฤต วัฒนศรี, จิรวัดน์ ปราบเขต, *วิวัฒน์ อธิธิกุลสมาลัย*, อัมพร โพธิ์ไย และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, “คุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดที่มีการผสมสารโครงสร้าง PIN และ Schottky”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON35), หน้า 763-766, 2555.

สธน ม่องอำไพ, จิรวัดน์ ปราบเขต, *วิวัฒน์ อธิธิกุลสมาลัย*, ภาสภณ มโนสุกฤตกุล, อัมพร โพธิ์ไย และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, “ผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ร่อนต่อคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON35), หน้า 759-762, 2555.

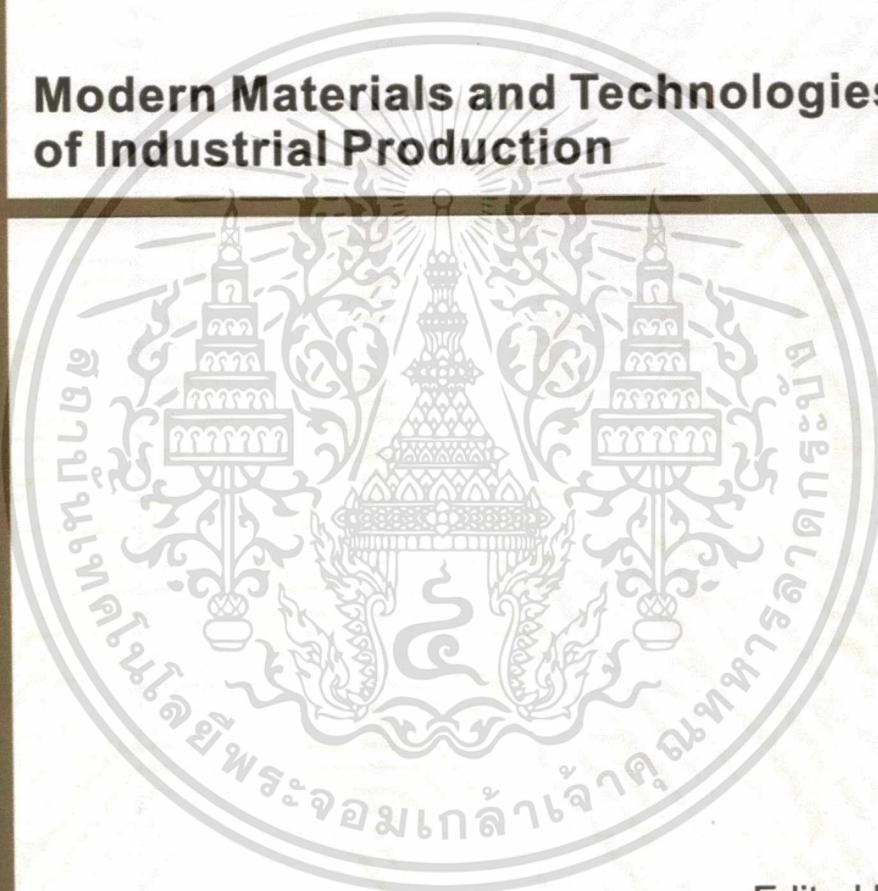
สรณ ผ่องอำไพ, จิรวัดน์ ปราบเขต, *วิวัฒน์ อิทธิกุลสมาลัย*, ชบา สุริยอัมรานนท์, ภาสภณ มโนสุกฤตกุล, อัมพร โพธิ์ไย และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5 (EENET 2013), 2556.

พรหมพักตร์ ดาวัลต์, *วิวัฒน์ อิทธิกุลสมาลัย*, ชบา สุริยอัมรานนท์ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, “การประยุกต์ใช้วิธีฉายลำรังสีอิเล็กตรอนเพื่อลดค่า tr ในอุตสาหกรรมการผลิตไดโอดแบบพื้นตัวเร็วชนิดซิลิคอนพินโครงสร้างเมซ่า”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5 (EENET 2014), 2557.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Modern Materials and Technologies of Industrial Production



Edited by
Zhang Jun
Honghua Tan

TTP TRANS TECH PUBLICATIONS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

.....93	Synthesis and Luminescent Properties of Red Phosphor BaY₂O₄: Eu³⁺ for White Light-Emitting Diodes L.T.Y. Wu.....	181
.....98	Study of Plasmon Fields Propagation on Roughness Metal Surfaces Escuela De Ingeniería Mecánica Automotriz “Rudolph Diesel” J.C. Juarez-Morales and M.L. Granados-Marin.....	186
....104	Influence of Platinum on Electrical Propertires of Silicon Schottky Diode S. Ueamanapong, I. Sriphanachai, B. Nararug, S. Janprapha, A.L. Suwanchatree, S. Niemcharoen, N. Klunngien and A. Poyai.....	192
....108	Light-Response Characteristics of Platinum Doped Silicon Photodetector B. Nararug, S. Ueamanapong, I. Sriphanachai, S. Janprapha, A.L. Suwanchatree, S. Niemcharoen, R. Muanghlua and N. Klunngien.....	196
...113	Minority Carrier Lifetime Controlling of Mesa Diodes by Electron Beam Irradiation W. Titthikusumarn, W. Jakpetch and W. Titiroongruang.....	200
..120	The Study of Beam Collimating, Optical Index of Refraction and Birefringence Measurement P.W. Zhang and M. Li.....	205
..126	Chapter 3: Materials and Technologies in Construction	
..131	Relationship between Microstructure and Mechanical Properties for Recycled Aggregate Concrete W. Li, W.S. Ding and H.Y. Zhang.....	213
..135	Stress Distribution Characteristics of Runway Pavement under New Generation Large Aircrafts L. Zhang, L. Zhang, C. Shi and S.X. Yang.....	218
140	The Effect of Coarse Aggregate Gradation Degradation on the Mechanical Behavior of Asphalt Mixture Y. Ye, H.K. Chen and Y.Z. Cai.....	223
146	The Wind Load Analysis of a Cable Net Structure Y. Yang, Y.Y. Qiu and G.J. Wang.....	228
152	Effects of Sudden Breakage of Hangers on Suspension Bridge W.L. Qiu, M. Jiang and Z. Zhang.....	234
157	Analysis of the Cement-Stabilized Ash by XRD (X-Ray Diffraction) G.X. Ma and H.Y. Zhang.....	240
163	Durability Analysis Testing on Reactive Powder Concrete M.L. Chuang and W.H. Huang.....	244
	Analysis of Microstructure of Interfacial Transition Zone (ITZ) in Recycled Aggregate Concrete W. Li and H.Y. Zhang.....	249
71	Development of Performance Optimization of Recycled Aggregate W. Li, Y. Li and H.Y. Zhang.....	254
77	Chapter 4: Materials and Technologies in Environmental Engineering	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Minority Carrier Lifetime Controlling of Mesa Diodes by Electron Beam Irradiation

Wiwatitthikusumarn^{1,a}, Wittaya Jakpetch², WisutTitiroongruang^{1,b}

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

²Electronics Industry Public Company Limited, 65, 68 SoiChalongkrung 31 I-EA-T Free Zone, LatKrabang Industrial Estate, Latkrabang, Bangkok 10520 Thailand

^awiwa_ze@hotmail.com, ^bktwisut@kmitl.ac.th

Keywords: Mesa diodes, Electron beam irradiation, Reverse recovery time, Minority carrier lifetime, Passivation layer

Abstract. Mesa diodes were irradiation by electron beam at various doses of 25, 50 and 75 kGy to find optimum dose for controlling minority carrier lifetime. The experiment result shows that electron beam can reduce minority carrier lifetime from 24.3 ns to 14.8, 9.5 ns and 7.9 ns at dose of 25, 50 and 75 kGy, respectively. However, the result of electron beam is not only reduce the lifetime but also effected to other electrical properties such as increasing in saturation current density about 3 times, increasing in reverse leakage current density about 3 times. Dominant cause of reverse leakage is increasing in generation current via center traps which formed by the irradiation.

Introduction

Minority carrier lifetime control is widely used in power electronics devices because can reduce reverse recovery time and energy loss of power devices in 'on-state' and 'off-state' in conduction process [1,2]. At present platinum doped by thermal diffusion is a favor method used for controlling minority carrier lifetime (τ_g) as platinum atom will create deep level in band gap of silicon [3,4]. As that level can be generation and recombination center of carrier in device.

For industrial field, a method that is used to produce power diodes is Mesa structure. This economical and materials have been found that have provided useful stabilization [5]. Like Mesa diodes can control lifetime by platinum doped. Nevertheless, platinum must be diffused at high temperature about 800-900 [6]. Thus, mesa structure, Pt-doped must diffusion before passivation process that made complicated to next process. Moreover, Pt-atom distribution was not uniform, so yield of production is too low.

This paper presents one direction for reduce reverse recovery time of mesa diodes by electron beam. Electron beam is widely used in many researches but few researches were done to control and find appropriate electron beam to be used for mesa diodes base fabrication. An optimum electron beam dose can be used to reduce minority carrier lifetime and less effect to other electrical characteristics. The goal of this paper is to investigate electrical properties in forward and reverse biased of before and after treatment by electron beam at various dose.

Experiment

Power diodes were fabricated with Mesa structure method on 28-32 Ω -cm, n-type silicon substrate. P-N junction was formed by boron diffusion and another side was diffused with phosphorus. Mesa structure was done by etching edge thru P-N junction of device as Figure 1. Then the edge was passivated by insulating layer for reducing reverse leakage current at peripheral junction. Ni/Au plate will done to forming contact of both top and bottom side.

Finished diodes were measure their electrical properties. The obtained result were compared both before and after Electron beam irradiation at room temperature with energy 12 MeV at various dose of 25, 50 and 75 kGy. The semiconductor parameter analyzer, model HP4156B was used.

used to measure the electrical properties of diode, before and after irradiation. The current-voltage (I-V) characteristics of P-N junction were measured at room temperature to examine the change of reverse leakage current density (J_R) by electron beam. The capacitance-voltage (C-V) characteristics of P-N junction also were measured at room temperature to examine changing in diffusion current, generation current, and generation and recombination carrier lifetime (τ_g and τ_r).

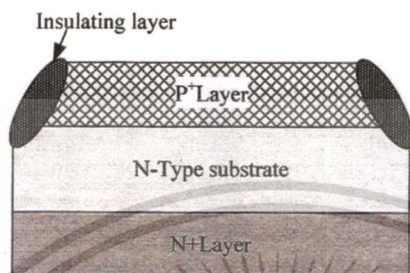


Fig. 1 Mesa structure for power diodes

Results and discussion

The electrical properties of P-N junction diodes before and after electron beam irradiation are examined. Fig. 2 shows the experiment result for forward biased characteristics of mesa diodes. Forward current density, can be expression by Eq. 1, is increased after irradiation because of increasing in J_{sat} .

$$J_F = J_{sat} \exp(qV/nkT) \quad (1)$$

When J_F is forward current density, q is electron charge, n is ideality factor, k is Boltzmann's constant and T is temperature in Kelvin unit.

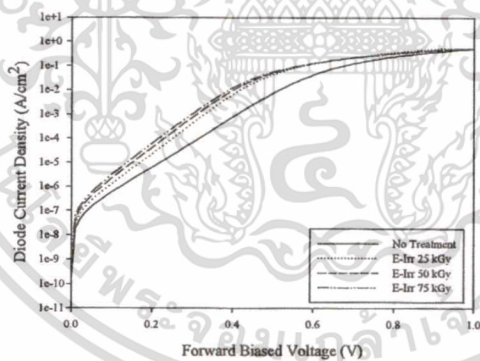


Fig. 2 Forward biased current-voltage characteristics of mesa diodes before and after electron beam irradiation with various doses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

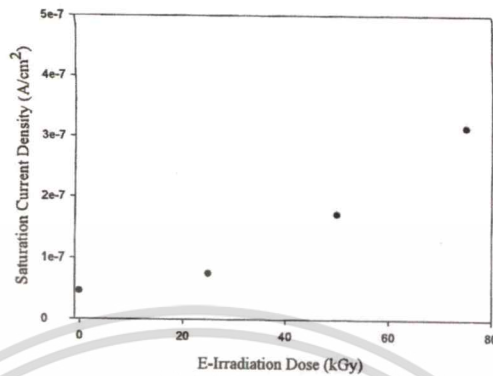


Fig. 3 Effect of electron beam dose on saturation current density

Extracting parameter from J_F-V_F in fig. 3 shows the changing saturation current density after irradiation. Saturation current density (J_{sat}) of diodes is slightly increased when irradiation by electron beam dose 25 kGy but increased too much when increased dose of electron beam to 50 and 75 kGy. This changing point would be from additional current conduction via center traps which are created by irradiation.

For reverse biased region, because of increasing in saturation current density of irradiation diode, thus reverse leakage current density is increased more than 3 times and tends to more difference between before and after in high reverse biased voltage region.

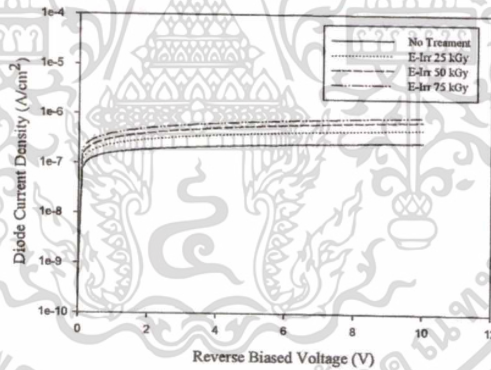


Fig. 4 Reverse biased current-voltage characteristics of mesa diodes before and after electron beam irradiation with various doses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

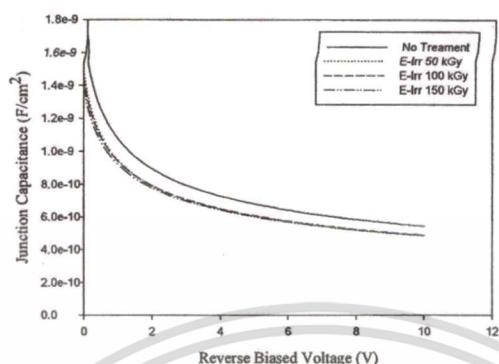


Fig. 5 Reverse biased capacitance-voltage characteristics of mesa diodes before and after electron beam irradiation with various doses.

Fig.5, junction capacitance of mesa diodes are slightly decreased because electron beam irradiation created deep level that trap free carrier from phosphorus in substrate. And from fig. 5 we can extract depletion region width (W_A) for calculation minority carrier lifetime by current equation in reverse region.

$$J_R = J_{dA} + J_{gen} \quad (2)$$

and the current due to generation process in depletion regions is given by [7]

$$J_{gen} = qn_i W_A / \tau_g \quad (3)$$

When J_R is total reverse current density, J_{dA} is diffusion current density, J_{gen} is generation current density, W_A is depletion region width while reverse biased which extracted from C-V characteristics, τ_g and τ_r is generation and recombination carrier lifetime.

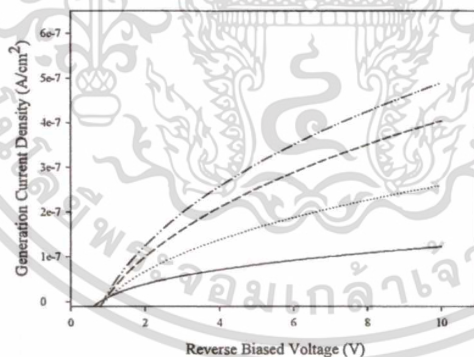


Fig. 6 Generation current density characteristics of mesa diodes before and after electron beam irradiation with various doses.

From depletion region width extraction and Eq.2-4, we can extract J_{dA} , J_{gen} and τ_g . Mesa diodes with no treatment were measured τ_g at 24.3 ns and after irradiation at various doses of 25, 50 and 75 kGy were measured at 14.8, 9.5 and 7.9 ns, respectively. The decreasing in τ_g is caused from electron beam created center traps for killing the lifetime and center traps number directly depend on irradiation dose.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The diffusion current density is slightly increased after treated by electron beam, from $1.53 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ to $2.34 \times 10^{-7} - 3.75 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. But for the generation current density, fig. 6, mesa diodes after treated by electron beam were increased about 2-5 times at 10 V reverse biased, and tend to extremely increasing in high reverse biased voltage region. This can confirm that electron beam irradiation can create center traps in depletion region so generation current density via the traps is increased.

Summary

Minority carrier lifetime controlling by electron beam irradiation was done on mesa structure diodes. The comparison result between before and after irradiate shows that electron beam irradiation can be used for reducing minority carrier lifetime from 24.3 ns to 7.9-14.8 ns. Although the result can reduce the lifetime, choosing optimum electron beam dose must take an account the side effect of irradiation such as reverse leakage current which will degrade electrical properties of power diodes. For the best optimum condition in irradiating electron beam on mesa diodes, we need to trade-off between minority carrier lifetime reduction and degradation in electrical properties.

Acknowledgment

The authors would like to extend profound gratitude to Thai Microelectronics Center (TMEC), an agency of the National Electronics and Computer Technology Center agency (NSTDA), Thailand, for testing facilities, Mr. Sarun Polachart and staff in Electronics Industry Public Company Limited for devices fabrication and Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organizer) for electron irradiation support.

References

- [1] D.K. Schroder, "Carrier lifetimes in silicon", IEEE Trans. Electron Devices, ED-44, p. 1997.
- [2] V.K. Khanna, "Physical understanding and technological control of carrier lifetimes in semiconductor materials and devices: A critical and conceptual development, state of the art applications", Progress in Quantum Electronics 29 p 59-163, 2005.
- [3] K.P. Lisiak, A.G. Milnes, "Platinum as a lifetime control deep impurity in silicon", Journal of Applied Physics, 46, p.5229-35, 1975.
- [4] A. Veron, M. Ohanisian, D. Ciocea and C. Mitroj, "SPIN-ON DOPANTS AS LIFETIME MODIFIER SOURCES IN FAST RECOVERY EPITAXIAL DIODES PROCESSING", '97 Proceedings, vol. 1, p.225-228, 1997.
- [5] R.R. Verderber, "SiO₂ / Si₃N₄ Passivation of High-Power Rectifiers", IEEE Transactions on Electron Devices, September 1970.
- [6] J. Prabket, A. Poyai and W. Titiroongruang, "Improving Forward Current Density of PIN Diodes by Pt-Diffusion Method", International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC).
- [7] S. M. Sze and K.K. NG, "Physics of Semiconductor Devices", 3rd ed. New York: Wiley, 2002.

Degradation in Electrical properties of Si-PIN Power Diodes after Treatment by Electron Irradiation

Wiwat Itthikusumarn, Jirawat Prabket
Narin Attiwongsangthong Wisut Titiroongruang
Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
3 Moo 2, Chalongkrung Road, Ladkrabang,
Bangkok, 10520, Thailand

Amporn Poyai
Thai Microelectronics Center (TMEC),
National Electronics and Computer Technology Center
(NECTEC), 51/4 Moo 1, Wang-Takien District,
Amphur Muang, Chachoengsao, 24000, Thailand
E-mail : amporn.poyai@nectec.or.th

Abstract— Power diodes development concentrate on fast switching, high reverse voltage blocking and low power consumption. One way to improve switching property is reducing minority carrier lifetime by electron irradiation. This paper presented degradation of silicon PN junction which cause from lifetime modification by electron irradiation. Silicon PIN power diodes were irradiated electron ray at different dose, 50, 100 and 150 KGy respectively, to compare with no treatment diodes. The result show that electron irradiation can reduce lifetime extremely but saturation current which effect to reverse leakage current will increase more than two orders when diodes were irradiated. J_s - W_D method shows that increasing in generation current via center traps of defects from irradiation is major reason of degradation in reverse leakage current and other electrical characteristics.

Keywords— silicon PIN power diodes; minority carrier lifetime; electron irradiation.

I. INTRODUCTION

Electrical characteristics of bipolar devices, including diodes, transistor, thyristor or IC structure, depend on minority carrier lifetime [1-2]. The devices that are same geometric structure but different lifetime will present different current conduction characteristics and dynamics. Electron irradiation is used widely in between metallization process and assembly process. The devices will bombard by high-energy electron through silicon and cause defects all over structure. Deep level concentration depends on irradiation dose with result in minority carrier lifetime also depends on the dose.

According to previous research, electron irradiation can produce defects in material lattice and many studies point that reduce carrier lifetime is creating traps in energy band by produce defects in material structure i.e. gold and platinum doping, etc.

This study presents minority carrier lifetime modification by electron irradiation. Silicon PIN diodes were exposed with electron irradiation at 50, 100 and 150 kGy, respectively. All silicon PIN diodes were measured electrical characteristics for comparison of electrical properties, including saturation current, reverse leakage current, and minority carrier lifetime between no treatment diodes and irradiation diodes at different dose.

II. EXPERIMENT

With supported from Thai Microelectronics Center (TMEC), silicon PIN power diodes were fabricated for exposed electron irradiation. The selected wafer type was N-Epi (111) with have $60\Omega\cdot\text{cm}$ resistivity and $300\ \mu\text{m}$ thickness. Carrier concentration of N^+ layer is $1.0 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$. The Epi-wafers were implanted boron to form p-n junction and metallization both sides of wafers for electrical probe. Finished diodes then were separated in 4 groups, 3 groups were exposed electron irradiation at 50, 100 and 150 KGy dose for compare with another group. Whole sample were measured electrical characteristics including I - V forward biased, I - V reverse biased and C - V reversed biased.

III. RESULT AND DISCUSSION

A. I - V characteristics

After treatment by electron irradiation, current conduction of silicon PIN power diodes is higher than no treatment diodes in low level forward biased as Fig 1. As current conduction of diode can expression by,

$$J_F = J_{s0} \exp(qV/nkT) \quad (1)$$

J_{s0} is saturation current, from fig 1, in the irradiation diodes are higher than another no treatment. In fig 2 thus reverse leakage current density of irradiation diodes also are higher than no treatment diodes. For ideality factor (n), diodes after treatment by electron irradiation were changed from no treatment. This changing point would be from additional current conduction via center traps which be created by irradiation.

From fig 3, reverse biased C - V characteristics can be used for extraction some physical parameter from plotting $1/C^2$ with V_R . N_B of irradiation diodes were be a little bit decreased from no treatment, this support the concept that defects or traps in bulk decreased resistivity of bulk [3-5] and agreed with dropping of current conduction in high-level injection.

TABLE I Extraction of physical parameter

Item	Device			
	No treatment	E-Irr 50 KGy	E-Irr 100 KGy	E-Irr 150 KGy
n	1.01	1.33	1.36	1.37
J_{sa} (A/cm ²)	2.45E-10	8.79E-08	1.84E-07	2.37E-07
J_{da} (A/cm ²)	4.41E-09	2.57E-07	3.81E-07	3.94E-07
N_B (cm ⁻³)	1.19E+14	1.15E+14	1.12E+14	1.11E+14
W_0 (cm)	5.11E-08	3.03E-08	2.61E-08	3.04E-08
τ_g (s)	1.20E-07	5.70E-09	3.09E-09	2.00E-09
τ_r (s)	1.15E-08	3.63E-12	1.74E-12	1.66E-12

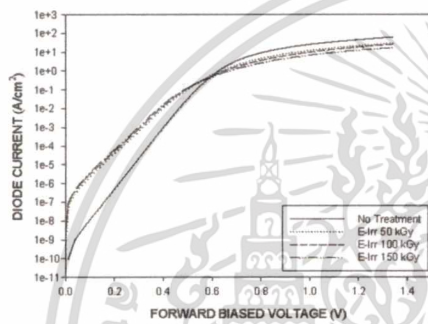
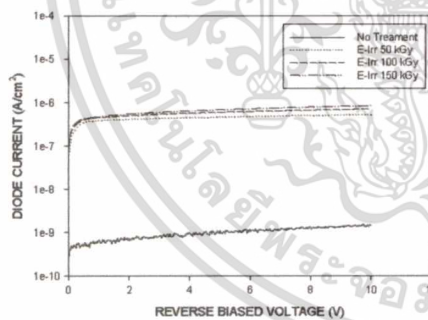
B. Lifetime analysis

Minority carrier lifetime include recombination term and generation term. Recombination term will concern center trap in bulk and generation will occur in depletion region. So in forward at high level biasing, depletion region width reach into zero and generation term also is nearly zero. But in reverse biased region, both terms will effect to minority lifetime. Current in reverse region can be expression by

$$J_R = J_{dA} + J_{gen} \quad (2)$$

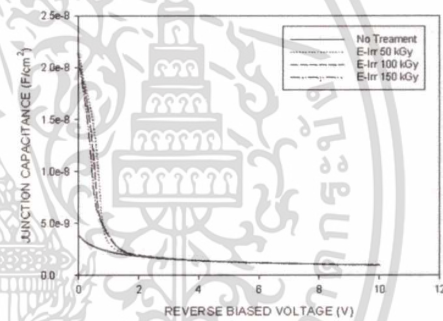
$$J_{gen} = qn_1W_A/\tau_g \quad (3)$$

$$J_{dA} = q\sqrt{Dp/\tau_r} n_1^2/N_B \quad (4)$$

Fig. 1 Forward biased I - V characteristicsFig. 2 Reverse biased I - V characteristics

when J_R is total reverse current density, J_{dA} is diffusion current density, J_{gen} is generation current density, W_A is depletion region width while reverse biased, τ_g and τ_r is generation and recombination carrier lifetime.

And from fig 3, depletion regions width at every reverse biased voltage (W_A) can be extracted from C-V characteristics as TABLE I.

Fig. 3 Reverse biased C - V characteristics

Diffusion component and generation component can be separated from total current by J_A - W_A method, show as the Fig 4. Diffusion current density (J_{dA}) can be calculated from y-axis intercept and generation carrier lifetime can be calculated from slope. This method will be come true only low level biasing condition, in this study choose between 2-4 V reverse biased. After separating into 2 current terms, fig 5 shows only generation current term. Generation current density of no treatment diodes was very small because diodes is nearly ideal diodes which generation current via center traps in depletion region is very small. Thus, increasing generation current density of irradiation diodes is cause from generation process

via center traps which be created by irradiation. Likewise, diffusion current depends on recombination process in bulk. So center traps due to defects in bulk also affect recombination current increase.

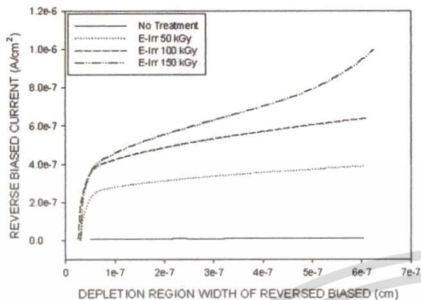


Fig. 4 Reverse biased J_A - W_A characteristics

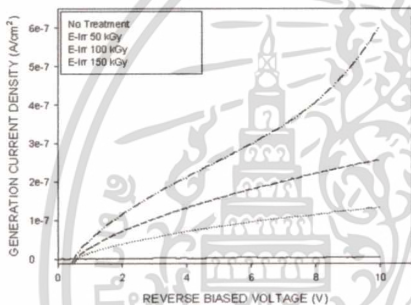


Fig. 5 Generation current density characteristics

IV. CONCLUSION

Electron irradiation is a method which is used widely in minority carrier lifetime modification, like other rays irradiation, gold and platinum doped. This research presents the effects of electron irradiation to electrical properties which concern with degradation of diodes. Silicon PIN diode were exposed by electron irradiation at high energy in different dose to compare with no treatment silicon PIN diodes. Experiment results show that after irradiation minority carrier life time was extremely decreased, recombination lifetime was decreased about 4 orders and generation lifetime about 2 orders. In the other hand, saturation current was increased as a result to reverse leakage current density increased. The increasing in saturation current caused from generation and recombination

current terms were increased from center traps which be created from irradiation. Forward biased region chart shows dropping of high-level injection current after irradiation because irradiation result to bulk resistivity was increased.

Moreover, in this experiment different level dose of electron irradiation is not effect significant to minority carrier lifetime but show extremely effects to current conduction characteristics.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank researchers of the Thai Microelectronics Center for devices fabrication and measurement. And electron irradiation support from Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organizer).

REFERENCES

- [1] Robert H.Kingston, "Switching Time in Junction Diodes and Junction Transistors", Proceedings of the IRE, Volume 42, Issue 5, Page(s): 829- 834, 1954.
- [2] M.Byczkowski and J.R.Madigan, "Minority Carrier Lifetime in p-n Junction Devices", Journal of Applied Physics, Volume:28, Issue: 8, Page(s): 878-881, 1957.
- [3] E.Iliescu, A.Niculescu, V.Bani, A.Nichita and N.Sturzu, "Electron irradiation for adjusting the reverse recovery time and forward voltage drop characteristics of fast diodes" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 1998 page 502-505.
- [4] C.Codreanu, "Silicon diode electrical characteristics under electron-beam irradiation conditions - experiments and theoretical interpretation" International Semiconductor Conference, 2001. CAS 2001 Proceedings. vol.2, p.481-484
- [5] C.Codreanu, "Free Carrier Lifetime Reduction in Silicon by Electron-beam Irradiation". International Semiconductor Conference, 2000. CAS 2000, Proceedings. vol.1, p. 255-258



Wiwat Itthikusumarn was born in Chonburi, Thailand. He received the B.S. ('2004) degree in Electronics Engineering and M.S. ('2010 degree) in Microelectronics from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), in Thailand. He has 2 years experience in semiconductor packaging with SONY Device Technology (Thailand) Co.,Ltd. Now he's working toward a Ph.D. degree in Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), in Thailand. His research field is power semiconductor devices technology.



Amporn Poyai was born in Pathum-thani, Thailand. He received the B.S. ('91) degree in physics from Silpakorn University, M.Eng. ('94) in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), both in Thailand. He obtained M.E. ('98) and Ph.D. ('02) in electrical engineering from Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven), Belgium. His doctoral research was in the field

of device physics, low temperature electronics, radiation physics, submicron silicon technologies and defect engineering. In these fields, he has authored or coauthored over 60 publications in Journal and Conference papers, and over 15 presentations at international conferences. In 1994, he joined NECTEC (Thailand), where he has been involved in

the nation microelectronics project. From 1997 to 2002, he had got scholarship from Thai government supported through the National Science and Technology Development Agency (NSTDA) of Thailand to join IMEC (Belgium) for his master and doctoral research. Since 2002, he is a researcher of Thai Microelectronic Center (TMEC).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Junction Shape on Diode Properties

Akkalak Chalammongnoot^{1,a}, Wiwat Itthikusumam^{1,b}, Wisut Titiroongruang^{1,c}

¹Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Chalongkrung Rd. Ladkrabang, Bangkok Thailand 10520

^aLucendra@hotmail.com, ^bwiwa_ze@hotmail.com, ^ckwisut@kmitl.ac.th

Keywords: Reverse leakage current, power diode, extraction parameter, Perimeter of the junction

Abstract. Reverse leakage current (I_R) is a problem that degrade electrical characteristics and power diode effective. This paper presents the parameter extraction and analysis reverse leakage current of N-type silicon power-diodes with different geometries. 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 junction perimeter to effective area ratio (P/A) that meaning the inverse leakage current increase with perimeter of the junction.

Introduction

P-N junction structure is widely used in many applications such as high switching diodes, sensors, optoelectronics devices, power devices, etc. P-N junction theory was used in designed and optimized properties of power-diodes [1-2]. Many parameters are important for power diode design and fabrication. One of them is junction perimeter - junction area ratio (P/A) that is very impact to saturation current (I_0), reverse leakage current (I_R) and series resistance (R_s). All of them can directly obtain or estimate from I - V and C - V characteristic curve. In generally, a good power-diode should have low leakage current and high forward current [2]. However p-n diode may produce high leakage current and low forward current due to the geometry of devices, such as peripheral area and effective area of dice size [3].

The purpose of this paper is to study p-n junction electrical characteristics and analysis parameter that produce as a result to high leakage current. The experiment will focus on power-diodes which were designed with different geometry. All power diodes 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. Then analyzed and compared the results by I - V , C - V characteristic curve and diode equations.

Experiment

The devices were used in the experiment, were processed on n-type silicon with different geometry and junction perimeter (P) to effective area (A) ratio (P/A), as shown in table 1.

Table 1. Comparison of the diodes with different geometry

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

I - V and C - V characteristic of the diode were measured with applied voltage in range of 0-2V in forward biased region and 0-10 in reverse biased region.

Result and discussions

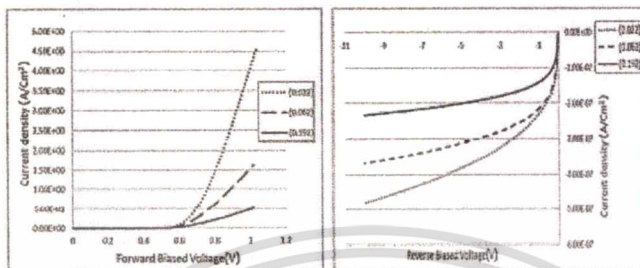


Fig.1. Current-voltage characteristics (a) forward and (b) reverse characteristics with different effective areas

Fig.1 show *I-V* characteristics of Si power diodes with different effective areas. From this figure, the forward biased region, we can get saturation current density (J_s) that given by

$$\ln(J) = \ln(J_s) + \frac{qV_A}{nkT} \tag{1}$$

Equation(1) is linear equation where J is current density, q is electron charge, V_A is the applied voltage, T is the absolute temperature, k is the Boltzmann constant, n is the ideality factor of P-N diodes. The ideality factor from equation(1) can be written by

$$n = \frac{q}{kT \times \text{slope}} \tag{2}$$

Where slope can be found from *I-V* forward characteristics

Table 2. Comparison parameter can be extracted from Fig.1, Eq.1) and Eq.2)

P/A	J_s (A/cm ²)	n	R_s (Ω)	J_{A_5V} (A/cm ²)
26.3636	7.5750E-08	1.6126	0.0765	3.8093E-07
15.8164	6.3943E-08	1.6218	0.2130	3.1108E-07
9.0116	4.2279E-08	1.6233	0.7599	1.9908E-07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

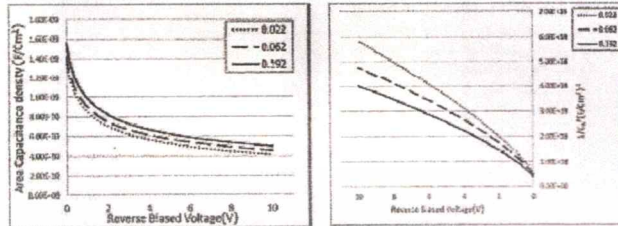


Fig.2. The (a) C-V characteristics, (b) C_A^2 versus reverse biased voltage with different area

Fig.2 show typical C-V characteristics for Si power diodes with different effective area. From fig.2a, at same voltage that capacitance density increased with effective area. Fig.2b show plot C_A^2 versus V_A , the built-in potential (V_{bi}) of junction can be determined by extrapolating the curve in voltage range of 0-1V [4]. Moreover, the doping concentration (N_A) also be calculated from

$$\left(\frac{1}{C_A}\right)^2 = 2 \left(\frac{V_{bi} + V_A}{q \epsilon_s N_A} \right) \quad (3)$$

Where slope of the curve is $2/(q \epsilon_s N_A)$. Thus, this equation can extract parameters, as shown in table 3.

Table 3. Comparison built-in potential (V_{bi}) and doping concentration (N_A)

P/A	V_{bi} (V)	N_A (cm ⁻³)
26.3636	-0.7146	1.452E+13
15.8164	-0.7276	1.640E+13
9.0116	-0.7197	1.961E+13

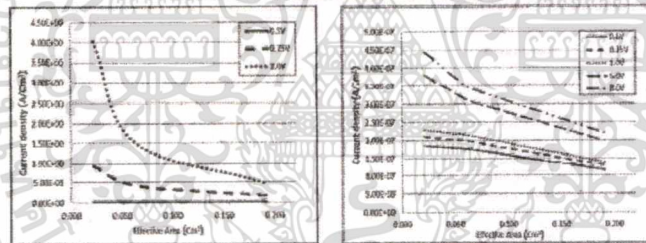


Fig.3. The (a) forward and (b) reverse current density versus effective area with different voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 3 show current density(J) versus effective area for forward and reverse biased, respectively. Both forward and reverse biased, the current density decreased with larger effective area because the larger area will decrease resistant of diode[5]. At 0.5V current density unchanged due to applied voltage is smaller than built-in voltage. From table 3, V_{bi} is not significant change with P/A ratio, because V_b concern with barrier height, which relate to both side of diode carrier concentration.

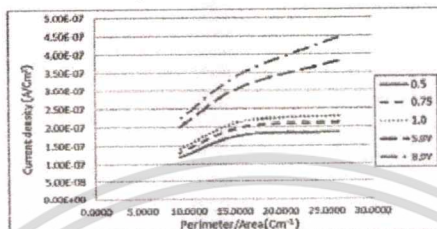


Fig.4.The reverse current density (J_r) versus junction perimeter(P) to junction area(A) ratio(P/A) at different voltage

Fig. 4 show current density (J) versus junction perimeter to junction area ratio(P/A) at voltage of $V_k = 0.5V, 0.75V, 1.0V, 5.0V, 8.0V$. The reverse current density(J_r) increased with P/A ratio that described by

$$J_r = J_{ra} + J_{rp} \frac{P}{A} \tag{4}$$

Where J_r is the reverse current density, J_{ra} is the area current density component and J_{rp} is the peripheral current density component. Finally, the P/A ratio agrees with the current density(J) in Fig. 3. The leakage current is dominated by peripheral area[6].

Conclusions

The effective area and junction perimeter are very impact with leakage current. The larger P/A ratio produced more leakage current. That means inverse leakage current increase with Perimeter of the junction. We can reduce peripheral area or increase effective area for low leakage current.

References

- [1] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd ed. New York: Wiley, 1991.
- [2] Donald A. Neamen, "Semiconductor Physics And Devices", 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2003
- [3] A. Poyai, "Defect assessment in advanced semiconductor materials and devices", PhD thesis, KU Leuven, Belgium, 2002
- [4] A. Poyai, E. Simoen, C. Claeys, A. Czerwinski, "Silicon substrate effects on the current-voltage characteristics of advanced p-n junction diodes", Materials Science and Engineering B73, p.191-196, 2000
- [5] D.K. Schroeder, "Semiconductor material and device characterizations," Wiley & Sons Inc, New York, 1990
- [6] Maciej Wolborski, Mietek Bakowski, Adolf Schoner, Analysis of bulk and surface components of leakage current in 4H-SiC PiN MESA diodes, Microelectronic Engineering Vol.83 (2006) P.75-78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reverse recovery time reworking of fast recovery diodes for industrial production

W. Itthikusumarn¹, W. Jakpetch², W. Titiroongruang¹.

¹ Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
3 Moo 2, Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

² Electronics Industry Public Company Limited,
65, 68 Soi Chalokkrung 31 I-EA-T Free Zone, Lat Krabang Industrial Estate, Lat Krabang, Bangkok 10520 Thailand

Abstract

For industrial field, cost is one of the most important factors. Especially discrete devices like a fast recovery diodes which are produced by complicated processes. In case of over t_r defect, reworking is required to limit the cost which is increased. Owing to simple applied to finished products, electron beam irradiation is presented to rework them. This study have exposed the irradiation to finished fast diodes which high t_r (300-400 ns) and considered effects of irradiation on fast diodes after exposed. The result of experiment shows irradiation can reduce t_r after exposed depend on irradiation doses from average t_r 350ns to 100, 60, 50, 40 and 35ns, for irradiation dose 50, 100, 150, 200, 250 and 300kGy respectively. Notwithstanding fast diodes after exposed were degraded by irradiation. Forward voltage is added double at 50kGy and more in larger doses and reversed leakage current is also slightly increased but did not affect to breakdown voltage.

Key words: fast recovery diodes, electron beam irradiation, reversed recovery time, Mesa structure

Introduction

Nowadays, discrete devices became very cheap price, this is good to electrical appliance manufacture and end user. Like a double-edge sword, cheap price is enormous obstacle in production process because the development cannot use high cost equipment or tools. Fast recovery diodes, especially, manufacture want to produce in very high yield for compensating with high cost from production processes and materials. A defect of fast diodes is t_r over from specification datasheet. These diodes might be scrapped and affect to higher production cost. As this problem has usually occurred because fast diodes can be test t_r when they almost finished wafer process so it is difficult to repair them in case of t_r failure.

t_r can be reduced by many methods including Pt/Au thermal diffusion [1-3] or device structure modifications [4-5]. Failure diodes are cannot be reworked by both methods. This study presents electron beam irradiation method for reducing t_r . Electron beam or E-beam is widely used for treatment lattice of material by damage to bond between atoms. The dangling bonds in silicon bulk will become center traps for R-G process of minority carriers in fast diodes [6-7]. While exposing high temperature is not necessary for E-beam, so this method can be used after finished wafer or assembly processes. In addition, cost of this method is less than 200USD per up to 50 kpcs depend on defect diodes quantity. But the cost of Fast diodes is

about 2500USD+ per 50 kpcs**.

The experiment has started by fast diodes which high t_r (about 300-500ns) were exposed E-beam with many irradiation doses. Comparison parameters between before and after exposure including reverse recovery time (t_r), forward voltage drop (V_f), breakdown voltage (V_B) and reverse leakage current (I_R). The result of this have revealed effects of E-beam on fast diodes which finished wafer processes with Pt-doped and limitations of irradiation dose using.

Experiment

This experiment has been done on silicon pin power diodes with Mesa structure [8-9]. The diodes were fabricated by EIC Semiconductor. First, N-type wafers with resistivity in range 35-40 $\Omega\cdot\text{cm}$, were diffused Boron and Phosphorus to form p-i-n layer. Then lifetime modification was done by doped Pt-atom into p-i-n wafers in high temperature furnace (800-900°C). Then mesa structure had been form by etching from p-side surface through p-n-junction by mixing acid of HF-HNO₃-CH₃COOH. Then insulating layer had been done on the junction surface by LPCVD of SiH₄ and N₂O for covering p-n-junction. End of wafer process, metallization was done on contact window and the backside (n⁻-layer surface) and dicing wafer into chips. Chips were assembled in conventional plastic packaging.

All assembled diodes were tested electrical properties before and after electron beam irradiation to compare effect of the irradiation. For testing, the diodes were separated into 7 groups, each group 50 samples. GF000 is reference group, GF050-GF300 were irradiated of dose in range 50-300 kGy, at energy level 8MeV.

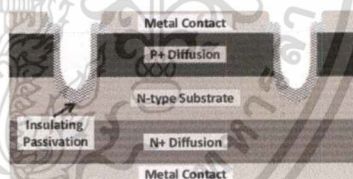


Fig.1 Mesa diodes structure

* Reference cost from Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organizer)

** This approximate cost base on axial lead diodes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fig.2 Finished fast recovery diodes.

Result and Discussion

The testing used TVR6000 and TRR analyzer for test t_{rr} , V_F , V_B and I_R . All samples was tested and showed in distribution chart graphs. Fig. 3 is the distribution of t_{rr} , shows that irradiation can be reducing t_{rr} of Pt-doped diodes. Moreover distribution of data after the irradiations is narrow from before irradiation. The concentration of the recombination centers were created by electron irradiation is proportional to the total flux of the high energy electrons which bombard on the silicon wafer per unit area [3]. This affect minority carrier lifetime was decreased as equation 1.

$$\tau_{sc} = 1 / N_T (1 / v_{thn} \sigma_n + 1 / v_{thp} \sigma_p) \quad (1)$$

Where N_T is number of center traps that created by the irradiation. And t_{rr} is depend on minority carrier lifetime (τ_{sc}) so tend of t_{rr} in Fig. 3 dropped when higher dose irradiation.

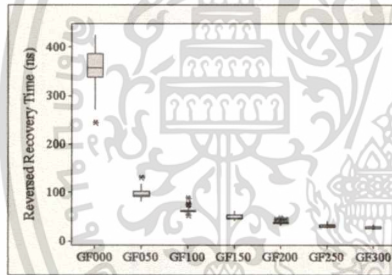


Fig.3 Finished fast recovery diodes.

Even through higher dose can reduce t_{rr} , the defects also reduced conduction ability in silicon bulk as we can see from fig. 4; V_F is increased and very high level depend on irradiation dose. When high energy electron bombard to lattice of silicon and made dangling bonds which became center traps of carriers. Since lifetime of carrier was decreased and diffusion length is shorter so internal bulk resistance so is increased. V_F increasing can be expression by equation 2.

$$V_F = 2kT / q \ln [J_T d / 2qD_a n_i F(d / L_a)] \quad (2)$$

When $F(d/L_a)$ is function which direct variation with ratio of d/L_a , d is thickness of i-layer of p-i-n structure and L_a is diffusion length in bulk of carrier.

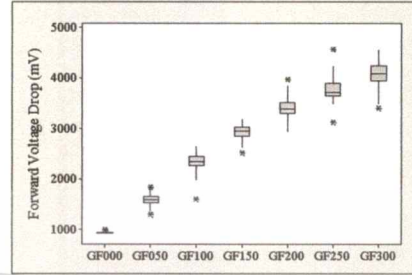


Fig.4 Finished fast recovery diodes.

In reverse biased region, the irradiations scarcely affect voltage blocking ability. Fig. 5 cannot show any different in V_B of each irradiation group. High energy electron do not disturb electrical field in depletion region. Because the field is result of the positive charge (which loose electron in n-side) and negative charge (which loose hole in p-side) due to electron hole pair recombination after electron-hole diffusion in thermal equilibrium [10]. But the dangling bond of electron beam is not concern. However, defect of irradiations which became R-G center traps and made saturation current higher from generation current in depletion region and diffusion current in neutral region were increased [7,9]. So reverse current is slightly increased as fig. 6.

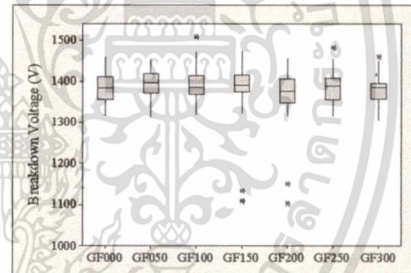


Fig.5 Finished fast recovery diodes.

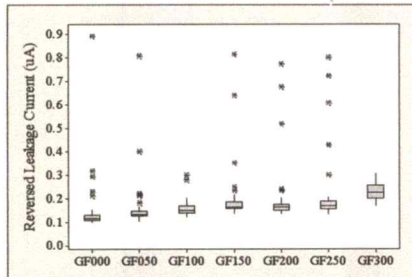


Fig.6 Finished fast recovery diodes.

Conclusion

This study paper wants to show that fast recovery power diodes which failed in t_r in production process. The experiment took the fast diodes that finished from industry in electron beam irradiations. From the experiment, fast diodes can be repeatedly reducing t_r though they finished processes. Nevertheless, t_r reworking still limit by degrading from high energy electron bombard. The structure was damaged and degraded current conduction ability which cause to very high V_f .

In practical, in case of t_r failed, t_{rr} of NG diodes will be over spec a little bit. So we can rework them by e-beam by low dose irradiation which less effect to other electrical properties.

Acknowledgment

The authors would like to extend profound gratitude to Thai Microelectronics Center (TMEC), an agency of the National Electronics and Computer Technology Center agency (NSTDA), Thailand, Mr. Sarun Polachart and staff in Electronics Industry Public Company Limited (EIC) for devices fabrication and testing facility and Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organizer) (TINT) for electron irradiation support.

References

- [1] M.D. Miller, et al., "Use of Platinum for Lifetime Control in Power Devices", International Electron Devices Meeting, vol.21, pp.180-183, 1975.
- [2] J. Prabket, et al., "Improving Forward Current Density of Silicon PIN Diodes by Pt-diffusion Method", TTC-CSCC 2010.
- [3] B.J. Baliga, "Fundamentals of Power Semiconductor Devices" Springer Science + Business Media, LLC 2008.
- [4] B.J. Baliga, "Tend in Power Discrete Devices", Proceeding of 1988 International Symposium Devices & ICs, Kyoto.
- [5] B.J. Baliga, "Analysis of a High Voltage Merged p-n/Schottky (MPS) Rectifier", IEEE Electron Device Letters, vol.8, p.407-409, 1987.
- [6] E. Iliescu, et al., "Fast Silicon Diodes Obtained By Electron Beams", Proceedings of the 12th International Conference on High-Power Particle Beams, vol.2, pp. 989 - 992, 1998.
- [7] W. Itthikusumarn, et al., "Degradation in electrical properties of Si-PIN Power diodes after treatment by electron irradiation" International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 13th, IEEE CONFERENCE

PUBLICATIONS, pp 334- 337, 2013.

- [8] A. Lekholm, P. Weissglas, "Edge breakdown in mesa diodes", IEEE Transactions on Electron Devices, vol.18, pp.844- 848, 1971
- [9] W. Itthikusumarn, et al., "Minority Carrier Lifetime Controlling of Mesa Diodes by Electron Beam Irradiation", Advanced Materials Research, vol.811, pp. 200-204, 2013.
- [10] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd ed. New York: Wiley, 1981.



Wiwat Itthikusumarn was born in Chonburi, Thailand. He received the B.S. (2004) degree in Electronics Engineering and M.S. (2010 degree) in Microelectronics from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), in Thailand. He has 2 years' experience in semiconductor packaging with SONY Device Technology (Thailand) Co., Ltd. Now he's working toward a Ph.D. degree in Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), in Thailand. His research field is power semiconductor devices technology.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวิวัฒน์ จิ่งธนศิริกุล (อิทธิกสุมาลย์)
วัน-เดือน-ปีเกิด	13 มกราคม 2529 ที่ชลบุรี
ที่อยู่	207/1 ม.4 ต.นาเกลือ อ.บางละมุง จ.ชลบุรี 20150 โทร.080-440-0341
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง (2551) วศ.ม. ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง (2555) วศ.ด. วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง (2558)

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1) ฟิสิกส์และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ
- 2) การออกแบบและกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ
- 3) การประกอบวงจรรวม
- 4) กระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในอุตสาหกรรม

ประสบการณ์ทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2549	การอบรมหลักสูตร “Basic Course Training in Microelectronics (Group11)”
พ.ศ. 2549-2551	ทำโครงการวิจัยที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีประสบการณ์เกี่ยวกับกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และมีทักษะการใช้เครื่องมือในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นอย่างดี
พ.ศ. 2551-2553	วิศวกรโรงงาน Sony Device Technology (Thailand) Co.,Ltd รับผิดชอบการวิเคราะห์ทำงานมีปัญหาจากลูกค้าและรับประกันคุณภาพเซนเซอร์ภาพ (CCD, CMOS) สำหรับกล้องดิจิตอล ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่มีหลักการทำงานพื้นเป็นทฤษฎีรอยต่อพีเอ็น
พ.ศ.2553-2555	ทำโครงการวิจัยร่วมกับศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) มีประสบการณ์เกี่ยวกับกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และมีทักษะการใช้เครื่องมือในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ.ศ.2555-ปัจจุบัน

ทำงานวิจัยร่วมกับ โรงงาน EIC Semiconductor Co.,Ltd ในฐานะวิศวกรฝ่ายวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตเวเฟอร์ มีประสบการณ์ด้านการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตเวเฟอร์ สำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทตัวเดียว อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้