

EFFECT OF ELECTRON IRRADIATION ON DC CHARACTERISTICS OF
SILICON PIN POWER DIODE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELETRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

KMITL-2014-EN-M-043-044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนต่อคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอด
กำลังชนิด PIN

EFFECT OF ELECTRON IRRADIATION ON DC CHARACTERISTICS OF
SILICON PIN POWER DIODE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2557

KMITL-2014-EN-M-043-044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนต่อคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN
 Thesis Title Effect of Electron Irradiation on DC Characteristics of Silicon PiN Power Diode
 นักศึกษา นายสรณ ผ่องอำไพ
 รหัสประจำตัว 55612503
 ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ สุติรุ่งเรือง
 หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M- 043-044

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	นิยมเจริญ	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิ์โฮ	
ดร.นรินทร์	อดิวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.วิสุทธิ	สุติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 10.00-12.00 น.
 สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนต่อคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN
นักศึกษา	นายสรณ ผ่องอำไพ
รหัสประจำตัว	55612503
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนต่อซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ทำให้คุณสมบัติการสวิตช์เร็วขึ้นและใช้กำลังงานที่น้อยลง ซึ่งอาศัยหลักการสร้างจุดบกพร่องภายในเนื้อซิลิคอน ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN การศึกษานี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน พบว่าแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้า (ที่กระแสทดสอบ 10 A/cm^2) จากที่ไม่ฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่า 0.77 V มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนเป็น 0.86 , 1.00 , และ 1.11 V ที่ปริมาณการฉายรังสี 50 , 100 และ 150 kGy ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าความต้านทานของฐานรองเพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยสามารถอธิบายได้จาก ผลของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่สร้างจุดบกพร่องภายในเนื้อซิลิคอน ทำให้ค่าอายุพาหะลดลงกระแสการรวมตัวมากขึ้น ส่งผลให้การสวิตช์เร็วขึ้นและใช้กำลังงานที่น้อยลงและมีเสถียรภาพกับอุณหภูมิ

Thesis	Effect of Electron Irradiation on DC Characteristics of Silicon PiN Power Diode
Student	Mr. Satana Pongampai
Student ID.	55652503
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis presents the effect of electron irradiation on DC characteristics of silicon PiN power diode. Electron irradiation is a technology which can improve silicon PiN power diodes performance; fast switching and low power consumption. Irradiation will create defects in silicon bulk which effect to DC characteristics of silicon PiN power diodes. This thesis reports the experiment results of electron irradiation on silicon PiN power diodes characteristics and compares these results with reference silicon PiN power diode. It shows that forward bias voltage is increased from 0.77 V become 0.86, 1.00 and 1.11 V (testing current=10 A/cm²) at radiation dose 50, 100 and 150 kGy, respectively because the series resistance is increased. Effect of electron irradiation will create defects in lattices so carrier life time is decreasing and improve performance of switching. The recombination current is increased and low power loss consumption.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ นักวิจัย ผู้ช่วยนักวิจัย และพนักงานศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวัด ตลอดจนให้ข้อชี้แนะต่างๆ ในกระบวนการสร้างและวัดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) สทน. ที่เอื้อเพื่อเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง (E-beam) แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ดร. จิรวัดน์ ปราบเขต นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่คอยให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ นายอธิโรจน์ มะโน และนายวิวัฒน์ อธิธิกุลสมาลย์ นักศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ที่คอยให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ น้องของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการเรียนมาโดยตลอด จึงทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สธน ผ่องอำไพ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของปัญหา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น.....	5
2.1.1 สมการไดโอดในทางอุดมคติ.....	5
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN.....	7
2.2.1 โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN.....	7
2.2.2 กระแสการรวมตัว.....	8
2.2.3 กระแสที่การฉีดระดับต่ำ.....	9
2.2.4 กระแสที่การฉีดระดับสูง.....	12
2.2.5 คุณสมบัติการนำกระแสขณะไบอัสตรง.....	21
2.3 คุณสมบัติการสวิตซ์ซิ่ง.....	22
2.3.1 การฟื้นตัวไปข้างหน้า.....	22
2.3.2 การฟื้นตัวย้อนกลับ.....	27
2.4 เทรดออฟของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN.....	33
2.4.1 การควบคุมอายุพาหะ.....	34
2.5 ผลกระทบและความเสียหายจากการฉายรังสี.....	35
2.5.1 เทคนิคการฉายรังสี.....	34
2.5.2 การแตกตัวเป็นไอออนของรังสี.....	36
2.5.3 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูง.....	37
บทที่ 3 เทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้าง และการทดลอง.....	38
3.1 เทคโนโลยีการสร้างเบื้องต้น.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV วงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน.....	38
3.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	41
3.1.3 กระบวนการกัด.....	43
3.1.4 กระบวนการได้ป.....	43
3.1.4.1 การแพร่สารเจือ.....	43
3.1.4.2 การยิงไอออน.....	46
3.1.5 กระบวนการเมทัลไลเซชัน.....	47
3.1.6 กระบวนการซินเตอร์ริง.....	47
3.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง.....	48
3.2.1 กระบวนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์กำลังชนิด PiN.....	48
3.3 ขั้นตอนกระบวนการฉายรังสี.....	52
3.3.1 การทำ profile และหาค่าความสม่ำเสมอของลำอิเล็กตรอน.....	53
3.4 กระบวนการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า.....	56
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
4.1 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสไปข้างหน้า.....	57
4.2 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	61
4.3 คุณลักษณะความจุ - แรงดันไฟฟ้า.....	62
4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะกระแส - แรงดันไฟฟ้า.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	73
ประวัติผู้เขียน.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และV้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติของรังสีชนิดต่างๆ.....	37
3.1 แสดงสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆกัน.....	39
3.2 จุดหลอมเหลว (Melting Points) และสภาพความต้านทาน (Resistivities).....	47
3.3 ขั้นตอนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์กำลังชนิด PiN.....	49
4.1 แสดงค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีเล็กทรอนิกส์.....	62
4.2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ของซิลิคอนไดออกไซด์กำลังชนิด PiN.....	62
4.3 แสดงค่าแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าของซิลิคอนไดออกไซด์กำลังชนิด PiN.....	66
4.4 แสดงค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับของซิลิคอนไดออกไซด์กำลังชนิด PiN.....	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์กำลังในงานประเภทต่างๆ.....	1
1.2 แผนผังแสดงความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงร่างผลึก กับความลึกหลังจาก การฉายรังสีอนุภาคสูง.....	3
2.1 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ พี-เอ็น.....	5
2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอน และโฮลที่ตำแหน่งต่างๆ และ กระแสรวมในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	6
2.3 แสดงการกระจายตัวของพาหะและการไหลของกระแสภายใต้การฉีดระดับต่ำของซิลิคอนไดโอด โครงร่าง PIN.....	7
2.4 แสดงการกระจายตัวของพาหะและศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูงของซิลิคอนไดโอด กำลังชนิด PIN.....	12
2.5 แสดงการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN กับค่าอายุพาหะระดับสูงที่.....	15
2.6 แสดงแรงดันตกคร่อมภายในบริเวณดริฟท์ (ตรงกลาง) ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN.....	18
2.7 แสดงฟังก์ชัน F (d/La) ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN.....	20
2.8 แสดงแรงดันตกคร่อมขณะ on-state ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN.....	21
2.9 แสดงคุณลักษณะขณะ On-state ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN.....	22
2.10 แสดงความเข้มข้นอิเล็กตรอนในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัว กลับไปข้างหน้า.....	24
2.11 แสดงความเข้มข้นอิเล็กตรอนในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัว กลับไปข้างหน้า.....	25
2.12 ระยะเวลาของบริเวณ Conductivity-Modulated ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า.....	26
2.13 การลดลงของค่าความต้านทานบริเวณดริฟท์ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า.....	26
2.14 แรงดันตกคร่อมซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวย้อนกลับไป ข้างหน้า.....	27
2.15 ลักษณะกระแสและแรงดัน ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวย้อนกลับ.....	28
2.16 รูปแบบการกระจายตัวของพาหะในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ในกระบวนการฟื้นตัว ย้อนกลับ.....	29
2.17 ประจุสะสมภายในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN หลังจากสิ้นสุดเฟสที่สาม.....	32
2.18 กราฟกระแสฟื้นตัวย้อนกลับ ขณะเวลาปิด.....	34
2.19 กราฟเทรตออฟของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ได้รับการควบคุมอายุพาหะในวิธี ต่างๆ.....	34
2.20 แสดงลักษณะความเสียหายจากโครงร่างผลึกในแบบต่างๆ.....	35
2.21 แสดงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในแถบช่องว่างพลังงานของซิลิคอนที่เหมาะสมสำหรับการลดอายุ ของพาหะ.....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 แสดงแผนผังความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงสร้างผลึก กับความลึกหลังจากการฉายรังสีอนุภาคสูง.....	36
2.23 แสดงลักษณะการทะลุผ่านของรังสีชนิดต่างๆ.....	36
2.24 ลักษณะโครงสร้างเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนแบบเชิงเส้น.....	37
3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้น SiO ₂ ที่ได้จากการกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง.....	38
3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้น SiO ₂ ที่ได้จากการกระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น.....	39
3.3 แสดงการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์.....	42
3.4 แสดงลักษณะการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านโฟโตมาร์ค.....	42
3.5 แสดง (ก.) น้ำยาไวแสงชนิดลบ (ข.) น้ำยาไวแสงชนิดบวก.....	43
3.6 แสดงการแพร่สารเจือ เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น.....	44
3.7 แสดงเตาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นของแข็ง (Solid Source).....	45
3.8 แสดงเตาเผาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นของเหลว (Liquid Source).....	45
3.9 แสดงเตาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นแก๊ส (Gas Source).....	46
3.10 แสดงไดอะแกรมการทำงานของ Ion-Implantation.....	46
3.11 แสดงแผนภาพไดอะแกรมของการดำเนินงาน.....	48
3.12 แสดงกระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน.....	49
3.13 ชิ้นงานซิลิคอนไดออกไซด์กำลังชนิด PiN ที่ผ่านกระบวนการสร้างเสร็จแล้ว.....	52
3.14 แสดงลักษณะการฉายรังสีอิเล็กตรอน ลงบนตัวอุปกรณ์.....	52
3.15 แสดงลักษณะของระบบขับเคลื่อนภาคบรรจุชิ้นงาน.....	53
3.16 ห้องควบคุมระบบการฉายรังสีด้วยโปรแกรมสั่งการอัตโนมัติ.....	53
3.17 เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Genesys 20.....	54
3.18 แผ่นฟิล์มสำหรับวัดปริมาณรังสี พร้อมแถบบาร์โค้ดเพื่อบันทึกข้อมูล.....	54
3.19 เครื่องอบแผ่นฟิล์ม.....	54
3.20 แสดงพิกัดการวางแผ่นฟิล์มวัดปริมาณรังสี และลักษณะมิติของภาคบรรจุชิ้นงาน.....	55
3.21 ลักษณะ Profile ปริมาณรังสีในภาคบรรจุชิ้นงาน หลังฉายพลังงาน 12 MeV, 30 kGy.....	55
3.22 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A.....	56
3.23 Cascade Microtech Model M 150.....	56
3.24 TVR 6000.....	56
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน.....	57
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์.....	58
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์.....	59
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิ่มตัวและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์.....	60
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ideality factor และปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์.....	61
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์.....	62
4.8 คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์.....	63
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_A^2$ กับ แรงดันไบอัสย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN.....	64
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอด ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณรังสี 50 kGy.....	64
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอด ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณรังสี 100 kGy.....	65
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอด ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณรังสี 150 kGy.....	65
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณการฉายรังสี 50 kGy.....	66
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณการฉายรังสี 100 kGy.....	67
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณการฉายรังสี 150 kGy.....	67

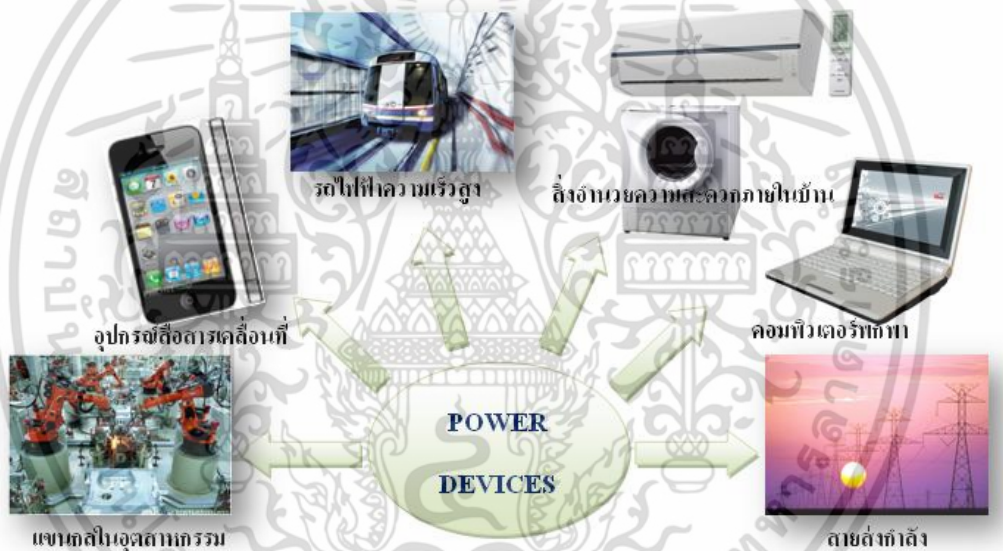
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และIXต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันโลกอิเล็กทรอนิกส์ทุกวันนี้ มีความทันสมัยและพัฒนาก้าวหน้าไปมาก อาทิ เทคโนโลยีในด้านการขนส่งมวลชนหรือรถไฟฟ้าความเร็วสูง เทคโนโลยีในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบสายส่งกำลัง อุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์แบบพกพา รวมไปถึงสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ภายในครัวเรือน ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สามารถรองรับเทคโนโลยีเหล่านี้ได้ โดยพื้นฐานหลักอุปกรณ์เหล่านั้นต้องมีความเร็วในการทำงานหรือมีความเร็วในการสวิตชิงสูง [1-2]



รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์กำลังในงานประเภทต่างๆ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีวิธีการควบคุมอายุพาหะส่วนน้อย (Minority Carrier Lifetime) ที่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง (Power Semiconductor Device) รวมไปถึงซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN อีกด้วย เนื่องจากสามารถช่วยลดช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Time) และการสูญเสียพลังงาน (Energy Loss) ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังระหว่างอยู่ในสภาวะนำกระแส (On-State) และสภาวะหยุดนำกระแส (Off-State) ได้ [4-5] ซึ่งการฉายรังสีอิเล็กตรอนก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับนิยมนำมาใช้ควบคุมอายุพาหะส่วนน้อย โดยผลของการฉายรังสีจะทำให้เกิดจุดบกพร่องภายในอุปกรณ์ ซึ่งเป็นศูนย์กลางการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนน้อย โดยจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น จะทำให้ค่าอายุพาหะลดลงกระแสการรวมตัวมากขึ้น ส่งผลให้การสวิตชิงเร็วขึ้นและใช้กำลังงานที่น้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN มีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน และมีความต้องการของตลาดมากขึ้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PIN ที่สร้างจากแผ่นผลึกเริ่มต้นชนิด NTD (Neutron Transmutation Doping) N-Epi ระบาย 111 มีสภาพความต้านทาน $60 \Omega \cdot \text{cm}$ ความหนา $300 \mu\text{m}$ ชั้น N^+ มีความหนาแน่นอะตอม $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นยิงประจุโบรอนพลังงาน 60 keV , ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ สำหรับสร้างรอยต่อ p+n เสร็จแล้วสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมให้กับไดโอดแล้วนำไปทำการฉายรังสีอิเล็กตรอน เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อคุณสมบัติไฟตรง โดยมีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

1. เพื่อศึกษาผลของแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้า (V_F)
2. เพื่อศึกษาผลของค่าความต้านทานอนุกรม (R_S)
3. เพื่อศึกษาผลของค่าอุดมคติ (Ideality Factor)
4. เพื่อศึกษาผลของค่ากระแสอิ่มตัว (I_0)
5. เพื่อศึกษาผลของค่ากระแสรั่วไหล (I_{leak})

ทั้งนี้ในการศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนเพื่อที่จะนำไปสู่การพัฒนาซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี ในด้านการทำงานสวิทซ์ มีการตอบสนองที่รวดเร็วสามารถทนแรงดันสูงได้ รวมไปถึงช่วยลดพลังงานการสูญเสียให้กับตัวอุปกรณ์ได้อีกด้วย

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

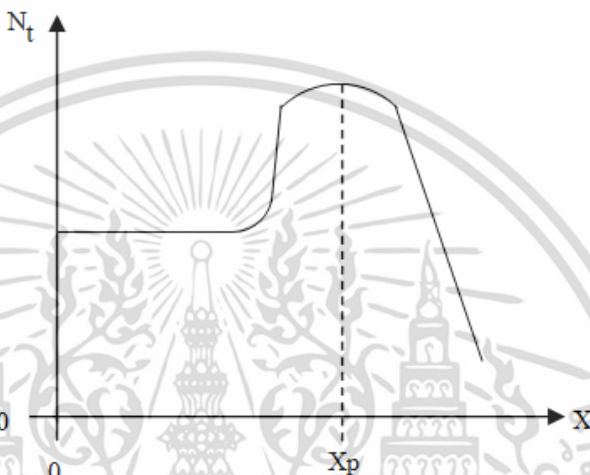
เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่มีผลต่อซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PIN ที่เข้าไปสร้างจุดบกพร่องภายในตัวอุปกรณ์ ซึ่งอาจเกิดจุดบกพร่องได้หลายสาเหตุ อาทิ การเกิดช่องว่างภายในโครงร่าง (Vacancy) การที่อนุภาคอื่นเข้าไปแทนที่อนุภาคเดิม (Substitution Impurity Atom) หรือการที่อนุภาคอื่นเข้าไปแทรกอยู่ในตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่าง (Interstitial Impurity Atom) นั้น จะไปทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของกระแสซึ่งเป็นศูนย์กลางการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนน้อยซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะไฟตรง

โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอผลกระทบต่างๆ ทางคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PIN ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่พลังงาน 12 MeV ปริมาณของรังสี 3 เงื่อนไขที่ 50, 100 และ 150 kGy ตามลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานด้านสวิทซ์ และลดพลังงานการสูญเสียของตัวอุปกรณ์ได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพการสวิทซ์ของตัวอุปกรณ์ ซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PIN ให้มีประสิทธิภาพที่สูง มีพลังงานการสูญเสียที่ต่ำนั้น มีอยู่หลากหลายเทคนิควิธี อาทิ เทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือ [6] โดยใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการแพร่ ซึ่งกระบวนการแพร่เป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิควิธีที่ไม่สามารถกระทำซ้ำได้และโดยปกติแล้วจะทำการขึ้นตอนท้ายสุดของกระบวนการสร้างภายในห้องสะอาด อีกเทคนิควิธีเป็นการฉายรังสี โดยอนุภาคพลังงานสูงทะลุผ่านเข้าไปในโครงสร้างผลึก พลังงานเหล่านั้นเกิดการสูญเสียจากการทำปฏิกิริยากับโครงสร้างอะตอม ซึ่งทำให้เกิดการย้ายตำแหน่งไปจากเดิมที่เคยอยู่ และเกิดเป็นตำหนิหรือจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึก โดยความเสียหายของโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงท้ายสุดของช่วงอนุภาคดังรูปที่ 1.2 ส่งผลนำไปสู่การเกิดศูนย์กลางการรวมตัวในซิลิคอนได้ รังสีของอิเล็กตรอน, โปรตอน, อัลฟา และแกมมาสามารถนำมาใช้ในเทคนิคนี้ได้โดยมีผลต่อค่าอายุของพาหะ [4-5]



รูปที่ 1.2 แผนผังแสดงความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงสร้างผลึก กับความลึกหลังจากการฉายรังสีอนุภาคสูง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PIN จากนั้นนำมาฉายรังสีอิเล็กตรอนที่พลังงาน 12 MeV ที่ปริมาณพลังงานรังสี 3 เรือนไซ ได้แก่ 50, 100 และ 150 kGy ตามลำดับ โดยได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์และได้ทำการเปลี่ยนอนุกรมต่างๆที่ 5 ระดับอนุกรม ได้แก่ 27, 57, 87, 117 และ 147 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีผลต่ออนุกรมแล้วทำการศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของค่า ดังนี้

1. ค่าแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้า (V_F)
2. ค่าความต้านทานอนุกรม (R_S)
3. ค่าอุดมคติ (Ideality Factor)
4. ค่ากระแสอิ่มตัว (I_0)
5. ค่ากระแสรั่วไหล (I_{leak})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาคุณสมบัติไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN ที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน
2. ศึกษาคุณสมบัติไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนแล้ว
3. ศึกษาวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบตัวซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN ทั้งสองตัว
4. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN เมื่อได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน ประกอบไปด้วย

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ สมมติฐานแนวคิดและวิธีการแก้ไขปัญหาที่ใช้ ในภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎี กล่าวถึงกระบวนการทำงานของซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN รวมไปถึงเรื่องคุณสมบัติของรังสีอิเล็กตรอน

บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง กล่าวถึง ขั้นตอนการออกแบบสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN และขั้นตอนการเตรียมการฉายรังสีอิเล็กตรอน

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง กล่าวถึง ขั้นตอนการฉายรังสีอิเล็กตรอน การวัดคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟตรงของตัวอุปกรณ์ และการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวอุปกรณ์

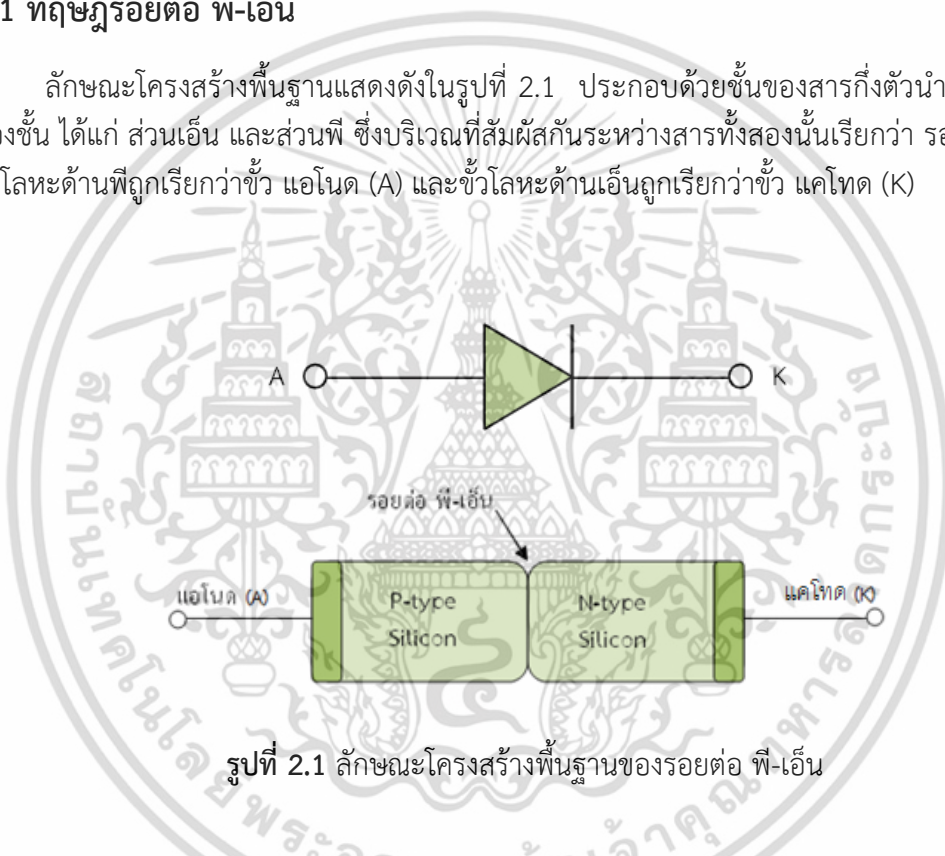
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2 ทฤษฎี

ในบทนี้ได้กล่าวถึง การเกิดรอยต่อพี-เอ็น โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN รวมทั้งคุณสมบัติของรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของตัวอุปกรณ์

2.1 ทฤษฎีรอยต่อ พี-เอ็น

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานแสดงดังในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันสองชั้น ได้แก่ ส่วนเอ็น และส่วนพี ซึ่งบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างสารทั้งสองนั้นเรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น ขั้วโลหะด้านพีถูกเรียกว่าขั้ว แอนโอด (A) และขั้วโลหะด้านเอ็นถูกเรียกว่าขั้ว แคโทด (K)



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ พี-เอ็น

ในปัจจุบันรอยต่อ พี-เอ็น ถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการแพร่สาร (Diffusion) ซึ่งเป็นอะตอมของสารเจือ (Impurity Atoms) ชนิดตรงข้าม เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำฐานรองอีกชนิดหนึ่ง อาทิ การแพร่ อะตอมโบรอนซึ่งเป็นสารเจือชนิดพี เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือ แพร่อะตอมฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดพี เป็นต้น นอกจากนี้เทคนิคการแพร่ แล้ว ในปัจจุบันยังมีเทคนิคอื่นที่ใช้ในการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น อีก เช่น เทคนิคการฝังไอออน (Ion Implantation)

2.1.1 สมการไดโอดในทางอุดมคติ

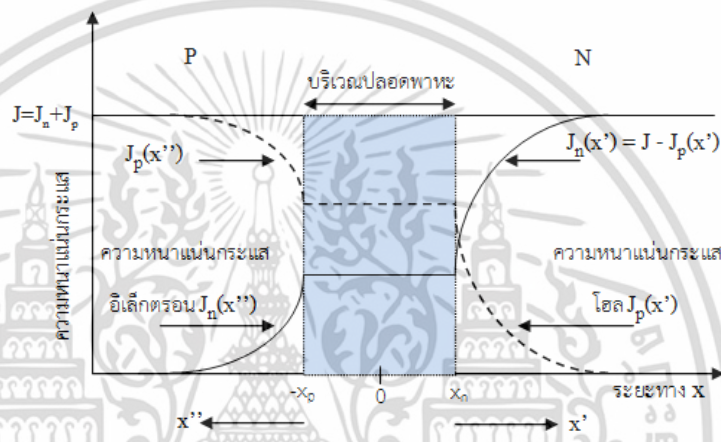
เนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจะเกิดมีกระแสการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอน [8] ดังสมการตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_p(x = x_n) = J_p(x' = 0) = q \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.1)$$

$$J_n(x = -x_p) = J_n(x' = 0) = q \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.2)$$

โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสโพลและอิเล็กตรอนตามสมการ (2.1) และ (2.2) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอน และโพลที่ตำแหน่งต่างๆ และกระแสรวมในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง

กระแสรวมที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น คือผลรวมของกระแสอิเล็กตรอนและโพลที่ไหลผ่านบริเวณปลอดพาหะ สามารถเขียนได้เป็น

$$J = J_n(-x_p) + J_p(x_n) \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) โดยกำหนดให้ A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น กระแสรวมทั้งหมดที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น แสดงได้ดังนี้

$$I = AJ = qAn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.4)$$

หรือ

$$I = I_0 \cdot (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.5) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันไบอัสของไดโอดรอยต่อแบบพี-เอ็น เรียกว่า สมการไดโอดในอุดมคติ หรือ สมการของช็อกเคิลีย์

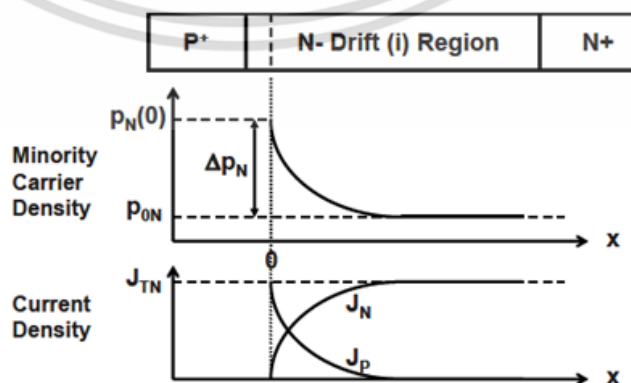
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

ตัวเรียงกระแสมีความต้องการในวงจรรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอย่างมากถึงการควบคุมทิศทางการไหลของกระแส มีความต้องการป้องกันแรงดันย้อนกลับที่สูงๆ ที่มีมากถึงระดับ 300 ถึง 5,000 โวลต์ ตัวเรียงกระแสซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN จึงได้มีการพัฒนาขึ้น โดยแรงดันย้อนกลับที่รองรับได้ขึ้นอยู่กับบริเวณปลอดพาหะ ในรอยต่อโครงสร้างพี-เอ็น ซึ่งแรงดันส่วนใหญ่จะตกอยู่ในชั้นของเอ็นกับคุณสมบัติของชั้นพีที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระแสที่ไหลขณะ On-State โดยการออกแบบด้วยการเติมสารเจือความเข้มข้นต่ำให้แก่ด้านเอ็น ซึ่งชั้นนี้เองที่ถูกเรียกว่า ชั้นอินทรินสิค (i-region)

การออกแบบซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN เพื่อให้รองรับแรงดันสูง ในการฉีกระดับสูงของพาหะส่วนน้อยภายในบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งจะสามารถช่วยลดค่าความต้านทานลงจากความหนาได้ การเติมสารเจือในปริมาณที่น้อยบริเวณดริฟท์ (Drift-Region) นั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทำให้ทนแรงดันสูงๆได้ ดังนั้น ขณะ On-State เมื่อกระแสไหล ปริมาณกระแสก็จะไม่ถูกจำกัดด้วยความเข้มข้นของสารเจือในปริมาณต่ำที่อยู่ภายในบริเวณดริฟท์ การลดลงของความหนาในตัวอุปกรณ์ที่บริเวณ ดริฟท์ ส่งผลดีสำหรับการออกแบบให้เกิดปรากฏการณ์พังก์ทรู [8] (Punch-Through) ซึ่งเป็นผลดีทำให้แรงดันตกคร่อมขณะ On-State ลดลง

2.2.1 โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN แสดงดังรูปที่ 2.3 เมื่อแรงดันตกคร่อมภายในโครงสร้าง ขณะ On-State กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับแรงดันที่ตกคร่อมภายในบริเวณ ดริฟท์



รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายตัวของพาหะและการไหลของกระแสภายใต้การฉีกระดับต่ำของ

ซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง PiN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะ On-State กระแสที่ไหลภายในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN จะประกอบไปด้วยกระแส 3 กรณี คือ

2.2.1.1 ขณะระดับกระแสต่ำมากๆ กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับกระบวนการการรวมตัวใหม่ภายในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น กล่าวคือกระแสที่เกิดจากการรวมตัว (Recombination Current)

2.2.1.2 ขณะระดับกระแสต่ำ กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับการแพร่ของการฉีดพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดภายในบริเวณดริฟท์ กล่าวคือกระแสจากการแพร่ (Diffusion Current)

2.2.1.3 ขณะระดับกระแสสูง กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของพาหะทั้งสองนั่นก็คือ อิเล็กตรอนและโฮลในบริเวณดริฟท์ กล่าวคือกระแสจากการฉีดระดับสูง (High-Level Injection Current)

2.2.2 กระแสการรวมตัว

เมื่อกระแสไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ในปริมาณที่น้อยมากๆ กระแสที่เกิดจะเกิดจากการรวมตัวใหม่ของพาหะภายในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ สำหรับการให้แรงดันไบอัส (V_A) ตกคร่อมไดโอด ความเข้มข้นพาหะส่วนน้อยบนด้านพีของรอยต่อ นิยามโดยเงื่อนไขของช็อกเคิลีย์ (Shockley Boundary) หรือ กฎของรอยต่อ ได้ว่า

$$n_p(0) = \frac{n_i^2}{N_A} e^{qV_A/kT} \quad (2.7)$$

เมื่อ n_i คือ ความเข้มข้นของพาหะอินทรินสิค
 N_A คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้รับ
 k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann's
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้บนด้านพี สามารถนิยามได้โดย

$$p_p(0)n_p(0) = n_i^2 e^{qV_A/kT} \quad (2.8)$$

เพราะ เนื่องจากว่าความเข้มข้นของพาหะส่วนมาก เท่ากับความเข้มข้นอะตอมสารเจือของผู้รับ ($p_p(0) = N_A$) นั่นเอง

โดยอัตราการรวมตัวใหม่ที่เกิดภายในศูนย์กลาง นิยามได้จาก

$$U = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{p0}[(n+n_1) + \theta(p+p_1)]} \quad (2.9)$$

เมื่อ θ คือ อัตราส่วนของอายุพาหะส่วนน้อยบนด้านพี (τ_{p0}) ต่ออายุพาหะส่วนน้อยบนด้านเอ็น (τ_{n0})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n_1 และ p_1 คือความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ระดับศูนย์กลางการรวมตัว ตามลำดับ

หากระดับเฟอร์มิเป็นตำแหน่งที่เกิดการรวมตัวใหม่บริเวณตรงกลาง ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลก็จะมีค่าเข้มข้นเท่ากับพาหะอินทรินสิค (n_i) จากสมการที่ (2.8) โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลเท่ากันภายในบริเวณปลอดพาหะ จะได้

$$n = p = n_i e^{qV_A/2kT} \quad (2.10)$$

แทนสมการที่ (2.10) ลงในสมการ (2.9) ได้ว่า

$$U = \frac{n_i^2 e^{qV_A/kT} - n_i^2}{\tau_{po}[(n_i e^{qV_A/2kT} + n_i) + \theta(n_i e^{qV_A/2kT} + n_i)]} \quad (2.11)$$

ดังนั้น เมื่อให้แรงดันไบอัสที่มากกว่า kT/q สมการนี้สามารถเขียนได้เป็น

$$U = \frac{n_i}{\tau_{po}[1+\theta]} e^{qV_A/2kT} \quad (2.12)$$

จาก

$$\tau_{sc} = \tau_{po}[1 + \theta] \quad (2.13)$$

ดังนั้น อัตราการรวมตัวใหม่ภายใต้กระแสไหลไปข้างหน้า นิยามได้ว่า

$$U = \frac{n_i}{\tau_{sc}} e^{qV_A/2kT} \quad (2.14)$$

ความหนาแน่นกระแสไหลไปข้างหน้าที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรวมตัวภายในบริเวณปลอดพาหะ ที่ความกว้าง W_D สามารถนิยามได้ว่า

$$J_{FR} = qUW_D = \frac{qn_iW_D}{\tau_{sc}} e^{qV_A/2kT} \quad (2.15)$$

ที่ระดับกระแสต่ำมากๆ ขณะ On-State ความหนาแน่นกระแสไหลไปข้างหน้าของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN นั้นจะขึ้นอยู่กับแรงดันไปข้างหน้าที่ตกคร่อม

2.2.3 กระแสที่การฉีดระดับต่ำ

เมื่อมีแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN กระแสที่ไหลจะขึ้นอยู่กับการแพร่ของกระแสซึ่งเกี่ยวข้องกับการฉีดของพาหะส่วนน้อยภายในบริเวณปลอดพาหะ ทั้งสองข้างของรอยต่อพี-เอ็น รูปแบบของการฉีดพาหะส่วนน้อยบนด้านเอ็นของรอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของโฮลที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะสัมพันธ์กับแรงดันไบอัสที่ให้ตามกฎของรอยต่อ จะได้ว่า

$$p_N(0) = p_{0N} e^{qV_A/kT} \quad (2.16)$$

เมื่อ p_{0N} คือ ความเข้มข้นของโฮลในภาวะสมดุลบนด้านเอ็นของรอยต่อ เมื่อกำหนดให้แกน x คือ จุดเริ่มต้นของขอบในบริเวณปลอดพาหะบนด้านเอ็นของรอยต่อ และความหนาแน่นส่วนเกินของพาหะส่วนน้อยที่เพิ่มขึ้น (Δp_N) ณ ตำแหน่งบริเวณขอบของบริเวณปลอดพาหะนั้น สามารถนิยามได้โดย

$$\Delta p_N = p_N(0) - p_{0N} = p_{0N} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.17)$$

พาหะที่ถูกฉีดแพร่จากขอบบริเวณปลอดพาหะที่มีลักษณะเป็นความระยะทาง นั่นคือ ระยะการแพร่ของพาหะส่วนน้อย (L_p) ซึ่งมีการลดลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลจากความหนาแน่นส่วนเกินของพาหะส่วนน้อย นิยามได้โดย

$$\delta p_n(x) = \Delta p_N e^{-x/L_p} \quad (2.18)$$

ที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะ ผลรวมของกระแสที่ไหลเนื่องมาจากการฉีดภายในด้านเอ็นของรอยต่อทั้งหมดเนื่องมาจาก กระแสของการแพร่ นิยามโดย

$$J_{TN} = J_p(0) = qD_p \left(\frac{d\delta p_N}{dx} \right)_{x=0} \quad (2.19)$$

เมื่อ D_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

ใช้สมการ (2.17) และ (2.18) อธิบายส่วนเกินการกระจายตัวของพาหะส่วนน้อย ได้ว่า

$$J_{TN} = \frac{qD_p p_{0N}}{L_p} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.20)$$

จากรูปที่ 2.3 ส่วนด้านล่างสุด กระแสแพร่ของพาหะส่วนน้อยมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจากรอยต่อ เช่นเดียวกับกับกระแสรวมที่ไหลจากสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะที่จะก่อให้เกิดการดริฟ (Drift) ของพาหะส่วนมาก กระแสพาหะส่วนมากที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการดำเนินการออกจากรอยต่อ แสดงดังในรูป 2.3

ระหว่างการให้แรงดันไปข้างหน้า การฉีดของพาหะส่วนน้อย (อิเล็กตรอน) ที่เกิดขึ้นภายในด้านพีของรอยต่อ จะลดลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียล กับความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยในด้านพีของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบแจ้งระเบียบขั้นตอนการรับค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อ ตามระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน (L_n) กระแสรวมที่ไหลเนื่องมาจากการฉีดบนด้านพีของรอยต่อจะสามารถนิยามได้โดย

$$J_{TP} = \frac{qD_n n_{0P}}{L_n} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.21)$$

เมื่อ D_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

n_{0P} คือ ความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยในภาวะสมดุลบนด้านพีของรอยต่อ

ซึ่งซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN มักจะออกแบบให้มีความเข้มข้นในการเติมสารเจือสูง (N_A) บนด้านพีของรอยต่อเทียบกับความเข้มข้นในการเติมสารเจือ (N_D) บนด้านเอ็น ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น บริเวณดริฟท์ ดังนั้น

$$p_{0N} = \frac{n_i^2}{N_D} \gg n_{0P} = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.22)$$

บนพื้นฐานความแตกต่างของความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยบนด้านทั้งสองของรอยต่อ กระแส (J_{TP}) เนื่องมาจากการฉีดภายในด้านพีของรอยต่อสามารถที่จะสมมติให้เป็นลบเมื่อเทียบกับกระแส (J_{TN}) เนื่องมาจากการฉีดภายในด้านเอ็นของรอยต่อ กระแสรวมที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับต่ำ จึงกำหนดด้วยสมการที่ (2.20) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นในกระแสกับแรงดันไปข้างหน้าที่คาดการณ์ไว้ด้วยสมการนั้นขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าสำหรับกระแสการรวมตัว

ในความสัมพันธ์ข้างต้น ความกว้างของบริเวณดริฟท์ จะถูกสมมติให้มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับระยะการแพร่ของโฮล ถ้าหากระยะการแพร่ของโฮลมากกว่า การกระจายตัวของพาหะส่วนน้อยในบริเวณดริฟท์ จะมีการเปลี่ยนแปลง เพราะว่าความเข้มข้นที่ลดลงต่อความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยในบริเวณ N^+ ที่ขอบเขตระหว่างบริเวณดริฟท์ และบริเวณ N^+ ดังนั้นความเข้มข้นสารเจือในบริเวณ N^+ ที่มาก ความเข้มข้นพาหะส่วนน้อยจะสามารถสมมติให้เป็นศูนย์ที่ขอบเขตได้ การใช้เงื่อนไขขอบเขตที่สามารถที่จะแสดง กระแสไหลเนื่องมาจากการฉีดภายในด้านเอ็นของรอยต่อ โดย

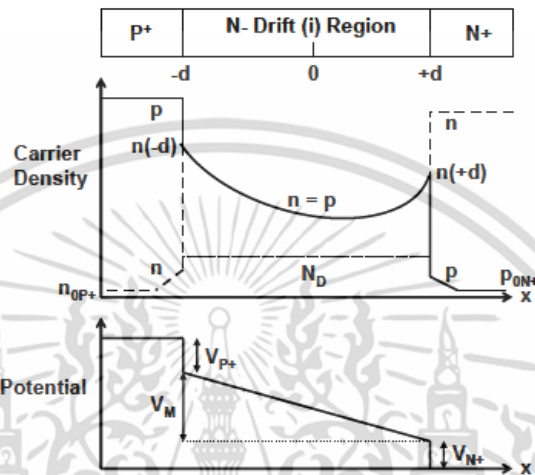
$$J_{TN} = \frac{qD_p p_{0N}}{L_p \tanh(W_N/L_p)} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.23)$$

2.2.4 กระแสที่การฉีดระดับสูง

บริเวณด้านเอ็นในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ต้องมีการเติมสารเจือในปริมาณต่ำมากๆ เพื่อจะสามารถรองรับแรงดันย้อนกลับได้สูงๆ เมื่อขณะ On-State แรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นจากการฉีดของพาหะส่วนน้อยก็จะเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (2.16) ในที่สุด ความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยก็จะมากกว่าความเข้มข้นจากการเติมอะตอมสารเจือเดิม (N_D) ที่อยู่ในบริเวณดริฟท์ ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า การฉีดระดับสูงนั่นเอง เมื่อความเข้มข้นของโฮลถูกฉีดไปยังบริเวณดริฟท์ จนมีมากกว่าความเข้มข้นจากการเติมอะตอมสารเจือเติม ประจุที่เป็กลางก็จะต้องการความเข้มข้นสำหรับอิเล็กตรอนและโฮล จะทำให้ได้

$$n(x) = p(x) \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายตัวของพาหะและศักย์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN

ความเข้มข้นที่มากของพาหะอิสระจะลดค่าความต้านทานภายในบริเวณดริฟท์ ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Conductivity Modulation” ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์กับการเคลื่อนที่ผ่านของความหนาแน่นกระแสสูงที่ปริมาณการเติมสารเจือต่ำบริเวณดริฟท์ กับแรงดันที่ตกคร่อม ขณะ On-State

การกระจายตัวของพาหะภายในบริเวณดริฟท์, $n(x)$ สามารถที่จะพิสูจน์ได้จากสมการต่อเนื่องสำหรับบริเวณด้านเอ็น ดัง

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n}{\tau_{HL}} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial}{\partial x} (nE) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p}{\tau_{HL}} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p \frac{\partial}{\partial x} (pE) \quad (2.26)$$

เมื่อ D_n และ D_p คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ และ τ_{HL} คืออายุพาหะระดับสูงในบริเวณดริฟท์ เมื่อรวมสมการนี้ด้วยกันหลังจากการคูณด้วยสมการ (2.25) ด้วย $(\mu_p p)$ และสมการที่ (2.26) ด้วย $(\mu_n n)$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n}{\tau_{HL}} + \left(\frac{\mu_p p D_n + \mu_n n D_p}{\mu_p p + \mu_n n} \right) \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (2.27)$$

ในสมการนี้ มีการกำหนดให้การเคลื่อนที่ของพาหะเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าสามารถที่จะไม่พิจารณาเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระแสเนื่องมาจากการแพร่ของพาหะ จากความสัมพันธ์ของไอน์สไตน์ (Enistein) ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการเคลื่อนที่ได้ว่า

$$D = \frac{kT}{a} \mu \quad (2.28)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลก็จะมีค่าตามสมการที่ (2.24) จากสมการที่ (2.27) ก็จะสามารถเขียนอยู่ในรูปเงื่อนไขภาวะสมดุลได้

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 0 = -\frac{n}{\tau_{TH}} + D_a \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (2.29)$$

เมื่อ τ_{TH} คือ อายุพาหะการหนีระดับสูงในบริเวณดริฟท์ และ D_a คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่
นิยามโดย

$$D_a = \frac{p+n}{\frac{p}{D_n} + \frac{n}{D_p}} = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p} \quad (2.30)$$

เนื่องจากความเป็นกลางของประจุ (สังเกตสมการที่ 2.24) การแก้ปัญหาโดยทั่วไปสำหรับความเข้มข้นของพาหะด้วยสมการที่ (2.29) จะได้

$$n(x) = A \cosh\left(\frac{x}{L_a}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_a}\right) \quad (2.31)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่ ที่กำหนดภายใต้เงื่อนไขขอบเขตบริเวณ N-drift และ L_a คือค่า Ambipolar Diffusion Length นิยามโดย

$$L_a = \sqrt{D_a \tau_{HL}} \quad (2.32)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_T = J_n(+d) \quad (2.33)$$

และ

$$J_p(+d) = 0 \quad (2.34)$$

ซึ่งเหมือนกับ บริเวณรอยต่อระหว่าง N-drift และ P⁺-anode (ตำแหน่งที่ $x=-d$ ในรูปที่ 2.3) กระแสรวมที่ไหลเกิดขึ้นเฉพาะการเคลื่อนที่ของโฮล คือ

$$J_T = J_p(-d) \quad (2.35)$$

และ

$$J_n(-d) = 0 \quad (2.36)$$

ใช้สมการที่ (2.34), กระแสโฮลเนื่องมาจากการดริฟท์และการแพร่สามารถเขียนได้เป็น

$$J_p(+d) = q\mu_p p(+d)E(+d) - qD_p \left(\frac{dp}{dx} \right)_{x=+d} = 0 \quad (2.37)$$

รวมเข้ากับสมการที่ (2.24) และจากความสัมพันธ์ของไอน์สไตน์ (Einstein) ได้ว่า

$$E(+d) = \frac{kT}{qn(+d)} \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=+d} \quad (2.38)$$

สมการ (2.33) สำหรับกระแสรวมที่ไหลเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้เงื่อนไขขอบเขต สามารถเขียนได้เป็น

$$J_T = q\mu_n n(+d)E(+d) + qD_n \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=+d} \quad (2.39)$$

ใช้สมการที่ (2.38) สำหรับกรณีสนามไฟฟ้า $E(+d)$ ได้ว่า

$$J_T = 2qD_n \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=+d} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

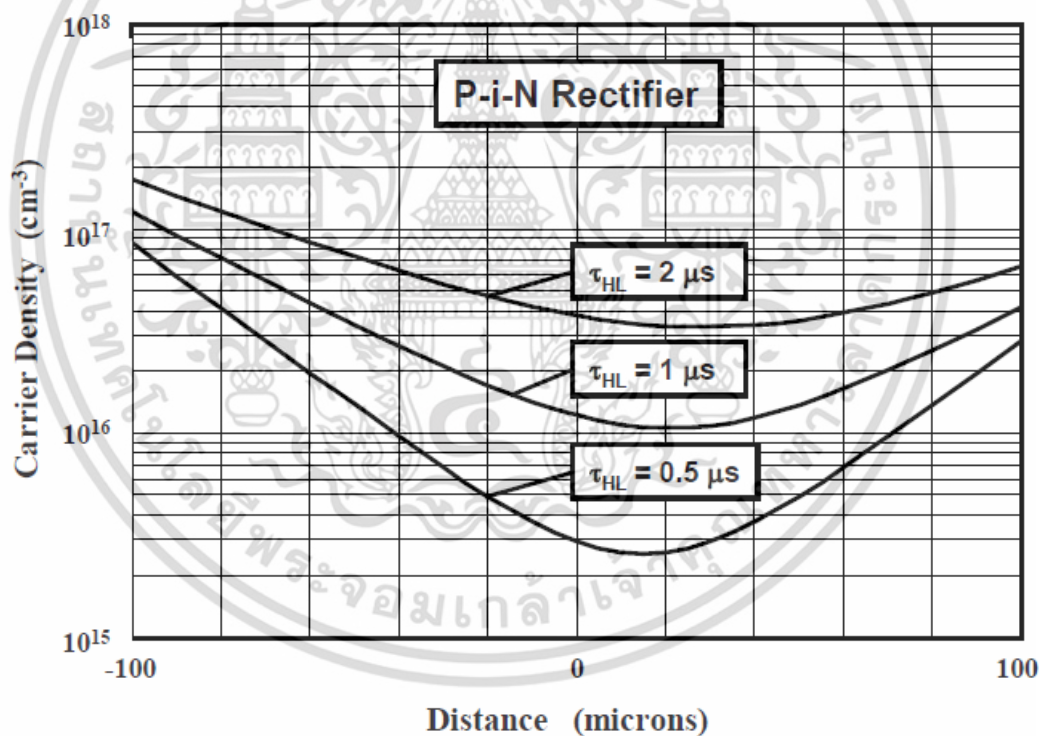
ในลักษณะเดียวกัน ก็จะได้

$$J_T = 2qD_p \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=-d} \quad (2.41)$$

ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของสมการ

$$\left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=+d} = \frac{J_T}{2qD_n} < \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=-d} = \frac{J_T}{2qD_p} \quad (2.42)$$

ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าความชันของความเข้มข้นพาหะมีค่าน้อยกว่าตรงบริเวณด้านแคโทด เมื่อเปรียบเทียบกับด้านแอโนด



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN กับค่าอายุพาหะระดับสูงที่

บนเงื่อนไขขอบเขตสามารถที่จะคำนวณค่าคงที่ A และ B ในสมการ (2.31) ได้

$$n(x) = p(x) = \frac{\tau_{HL} J_T}{2qL_a} \left[\frac{\cosh(x/L_a)}{\sinh(d/L_a)} - \frac{\sinh(x/L_a)}{2 \cosh(d/L_a)} \right] \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายตัวของโซ่พาหะถูกอธิบายด้วยสมการที่มีลักษณะเป็นแบบแผนดังแสดงที่เห็นในรูป 2.4 โดยเฉพาะตัวอย่างที่แสดง การกระจายตัวของพาหะถูกคำนวณด้วยสมการที่ (2.43) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5 ต่อกรณีของค่าทั้งสามสำหรับอายุพาหะการฉีดระดับสูง ของไดโอดที่มีบริเวณดริฟท์ หนา 200 ไมครอน ความเข้มข้นที่มากของอิเล็กตรอนและโฮลในบริเวณดริฟท์ เกิดขึ้นที่ขอบของ P^+ และ N^+ ตรงส่วนที่โค้งต่ำลงในความหนาแน่นพาหะบริเวณตรงกลางของบริเวณดริฟท์ นั้นถูกพิจารณาด้วย Ambipolar Diffusion Length และตรงส่วนโค้งมากที่สุดในความเข้มข้นที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาแพร่ที่น้อย และความเข้มข้นพาหะเฉลี่ยที่น้อยสังเกตได้เมื่ออายุพาหะมีการลดลง

การลดลงของความหนาแน่นพาหะเฉลี่ยที่ถูกฉีดเข้าไปในบริเวณดริฟท์ ก็กับการลดลงของอายุพาหะสามารถที่จะสรุปได้จากการพิจารณาการควบคุมประจุ ภายใต้เงื่อนไขภาวะสมดุล กระแสที่ไหลในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN สามารถเกี่ยวข้องกับอัตราการรวมตัวใหม่ของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณดริฟท์ หากการรวมตัวภายในขอบนั้นไม่นำมาคิด ดังนั้น ได้ว่า

$$J_T = \int_{-d}^{+d} qRdx \quad (2.44)$$

เมื่อ R คือ อัตราการรวมตัวใหม่ นิยามโดย

$$R = \frac{n(x)}{\tau_{HL}} \quad (2.45)$$

ใช้ความหนาแน่นพาหะเฉลี่ย (n_a) ภายในบริเวณดริฟท์ สมการนี้สามารถรวมเข้ากับค่า Yield ได้เป็น

$$J_T = \frac{2qn_a d}{\tau_{HL}} \quad (2.46)$$

ความหนาแน่นพาหะเฉลี่ยในบริเวณดริฟท์ นิยามโดย

$$n_a = \frac{J_T \tau_{HL}}{2qd} \quad (2.47)$$

จากความสัมพันธ์นี้ สามารถที่จะสรุปได้ว่าความหนาแน่นพาหะเฉลี่ยในบริเวณดริฟท์ จะเพิ่มขึ้น กับความหนาแน่นกระแสจะในขณะ On-State และลดลงกับการลดลงของอายุพาหะ พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นจากการกระจายตัวของพาหะในรูปที่ 2.5 สำหรับกรณี ความหนาแน่นกระแสขณะ On-State ที่ 100 A cm^{-2} และความหนาของบริเวณดริฟท์ ($2d$) ที่ 200 ไมครอน กับอายุพาหะการฉีดที่ระดับสูง $1\mu\text{s}$ ความเข้มข้นพาหะเฉลี่ยที่ได้จากการใช้สมการ (2.47) คำนวณ คือ $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของพาหะที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5

โดยเฉพาะค่าความต้านทานของบริเวณดริฟท์ ก็สามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นพาหะเฉลี่ยกับค่ากระแสที่ เคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล

$$R_{i.SP} = \frac{2d}{q(\mu_n + \mu_p)n_a} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สมการที่ (2.47) สำหรับหาความหนาแน่นพาหะเฉลี่ย ได้ว่า

$$R_{i,SP} = \frac{4d^2}{(\mu_n + \mu_p)J_T \tau_{HL}} \quad (2.49)$$

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณดริฟท์ (บริเวณตรงกลาง) ได้ว่า

$$V_M = J_T R_{i,SP} = \frac{4d^2}{(\mu_n + \mu_p) \tau_{HL}} \quad (2.50)$$

จากสมการข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า แรงดันที่ตกคร่อมตรงบริเวณดริฟท์ นั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่าน สิ่งที่เกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการมีความเข้มข้นสูงของพาหะส่วนน้อย ตรงกันข้ามกับกฎของโอห์ม (Ohm's Law) สำหรับบริเวณดริฟท์ ที่ไม่มีการปรับค่าความนำ ดังนั้นปรากฏการณ์การปรับค่าความนำที่การฉีดระดับสูงช่วยให้รักษาระดับแรงดันต่ำที่ตกคร่อมขณะ On-State ในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN

การวิเคราะห์จะแม่นยำมากขึ้นจากแรงดันที่ตกคร่อมในบริเวณดริฟท์ สามารถที่จะถูกดำเนินการด้วยการอินทิเกรตจากค่าสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าในบริเวณดริฟท์ ที่ได้มาจากการกระจายตัวของพาหะในสมการที่ (2.43) กระแสโฮลและอิเล็กตรอนที่ไหลในบริเวณดริฟท์ เขียนได้ดังนี้

$$J_p = q\mu_p \left(pE - \frac{kT}{q} \frac{dp}{dx} \right) \quad (2.51)$$

และ

$$J_n = q\mu_n \left(nE - \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right) \quad (2.52)$$

กระแสรวมที่บริเวณต่างๆในบริเวณดริฟท์ จะคงที่ เขียนได้ดัง

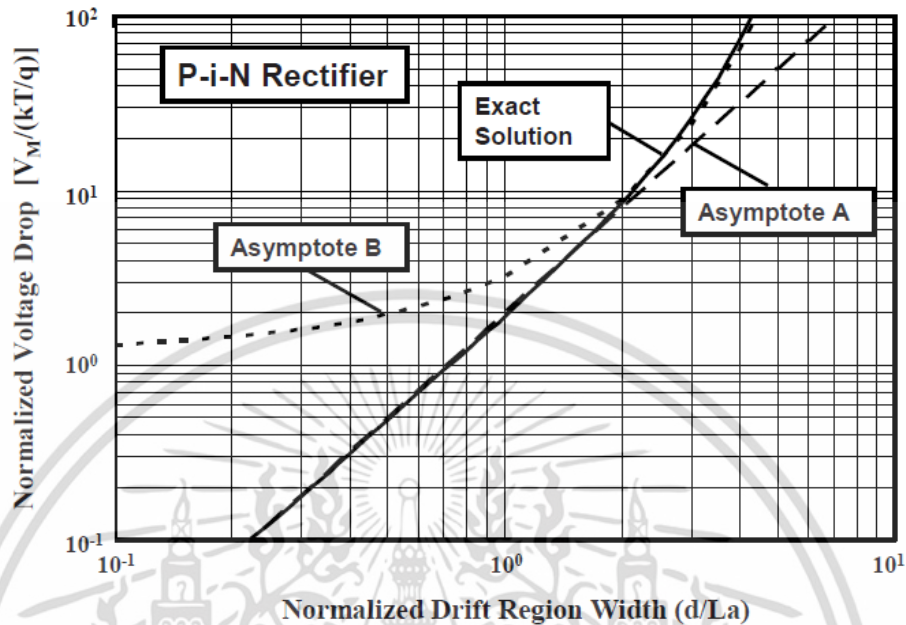
$$J_T = J_p + J_n \quad (2.53)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมารวมกัน จะได้

$$E(x) = \frac{J_T}{q(\mu_n + \mu_p)n} - \frac{kT}{2qn} \frac{dn}{dx} \quad (2.54)$$

ดังนั้น เจื่อนไขจากการที่ประจุเป็นกลางหรือ $n(x)=p(x)$ นั้นได้นำมาใช้ ในเทอมแรกของสมการ (2.54) แทนค่าแรงดันเนื่องมาจากกระแสที่ไหลผ่านบริเวณดริฟท์ เทอมที่สองที่มีความเกี่ยวข้องกับพาหะที่มีเอกสารนี้เป็นอีกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการเชิงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำเอาเทอมนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่สมมาตรก่อให้เกิดจากความแตกต่างในการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนและโฮล



รูปที่ 2.6 แรงดันตกคร่อมภายในบริเวณดริฟท์ (ตรงกลาง) ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

ทำการอินทิเกรตการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ได้จากสมการที่ (2.54) แรงดันที่ตกคร่อมใน Drift-Region คือ

$$\frac{V_M}{kT/q} = \left\{ \frac{8b}{(b+1)^2} \frac{\sinh(d/L_a)}{\sqrt{1-B^2 \tanh^2(d/L_a)}} \times \arctan \left[\sqrt{1-B^2 \tanh^2(d/L_a)} \sinh(d/L_a) \right] + B \ln \left[\frac{1+B \tanh^2(d/L_a)}{1-B \tanh^2(d/L_a)} \right] \right\} \quad (2.55)$$

เมื่อ $b = (\mu_n/\mu_p)$ และ $B = (\mu_n - \mu_p)/(\mu_n + \mu_p)$ เป็นสมการเชิงซ้อนสามารถประมาณได้จากการใช้สองเส้นในการกำหนดดังแสดงในรูปที่ 2.6 เทอมทั้งหมดของแรงดันที่ตกคร่อมในบริเวณ ดริฟท์ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสขณะ On-State แรงดันที่ตกคร่อมในบริเวณดริฟท์ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอัตราส่วน d/L_a เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 0.1 แรงดันที่ตกคร่อมตรงบริเวณดริฟท์ เท่ากับ 0.5 mV ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นประมาณ 50 mV สำหรับอัตราส่วนของ d/L_a อันเดียวกัน และกลายเป็น 0.7 V เมื่ออัตราส่วน d/L_a เพิ่มขึ้นเป็น 3 ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นบริเวณตรงกลางจะทำให้แรงดันขณะ On-State ลดลงเมื่ออายุพาหะลดลงจะเสริมให้การสวิตช์เร็วขึ้น

แรงดันตกคร่อมขณะ On-State ในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ประกอบไปด้วยแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ P^+/N , บริเวณตรงกลาง, และบริเวณส่วนของ N/N^+ แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ P^+/N สามารถนิยามได้จากความหนาแน่นที่ถูกฉีดของพาหะส่วนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ของสาธารณชน เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p(-d) = p_{0N} e^{qV_{P+}/kT} \quad (2.56)$$

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

$$V_{P+} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{p(-d)N_D}{n_i^2} \right] \quad (2.57)$$

เช่นเดียวกันกับ การประยุกต์ใช้ กฎของรอยต่อ (Law Of The Junction) บนด้านแคโทด

$$n(+d) = n_{0N} e^{qV_{N+}/kT} \quad (2.58)$$

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

$$V_{N+} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{n(+d)}{N_D} \right] \quad (2.59)$$

แรงดันตกคร่อมที่เกี่ยวข้องกับบริเวณขอบทั้งสอง เขียนได้ดังสมการ

$$V_{P+} + V_{N+} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{n(+d)n(-d)}{n_i^2} \right] \quad (2.60)$$

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

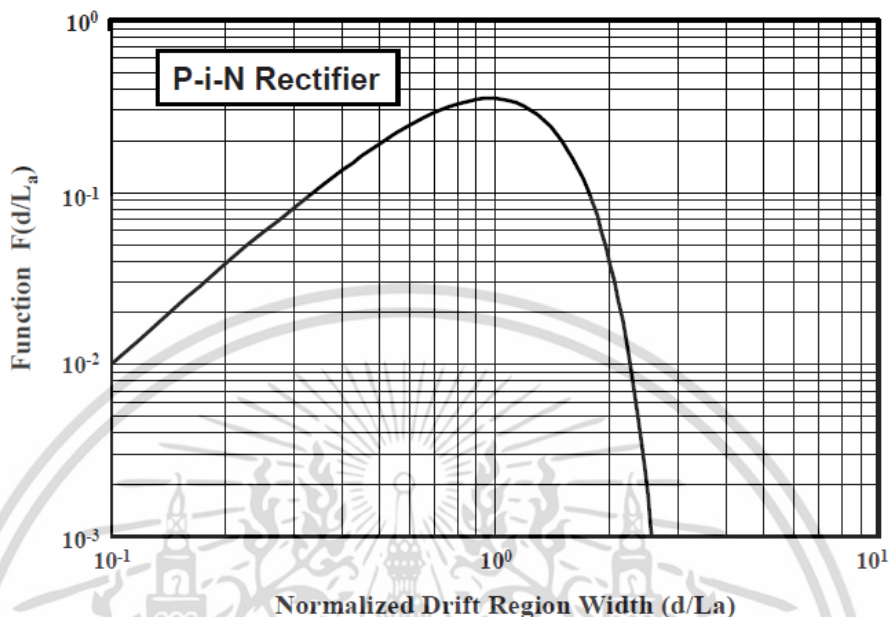
$$J_T = \frac{2qD_a n_i}{d} F \left(\frac{d}{L_a} \right) e^{qV_{ON}/2kT} \quad (2.61)$$

เมื่อ

$$F \left(\frac{d}{L_a} \right) = \frac{(d/L_a) \tanh(d/L_a)}{\sqrt{1-0.25 \tanh^4(d/L_a)}} e^{-qV_M/2kT} \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.61) เห็นได้ชัดว่า ความหนาแน่นกระแสมีค่าคงที่ขณะ On-State แรงดันที่ตกคร่อมจะมีค่าน้อยมากเมื่อฟังก์ชัน $F\left(\frac{d}{L_a}\right)$ มีค่ามาก



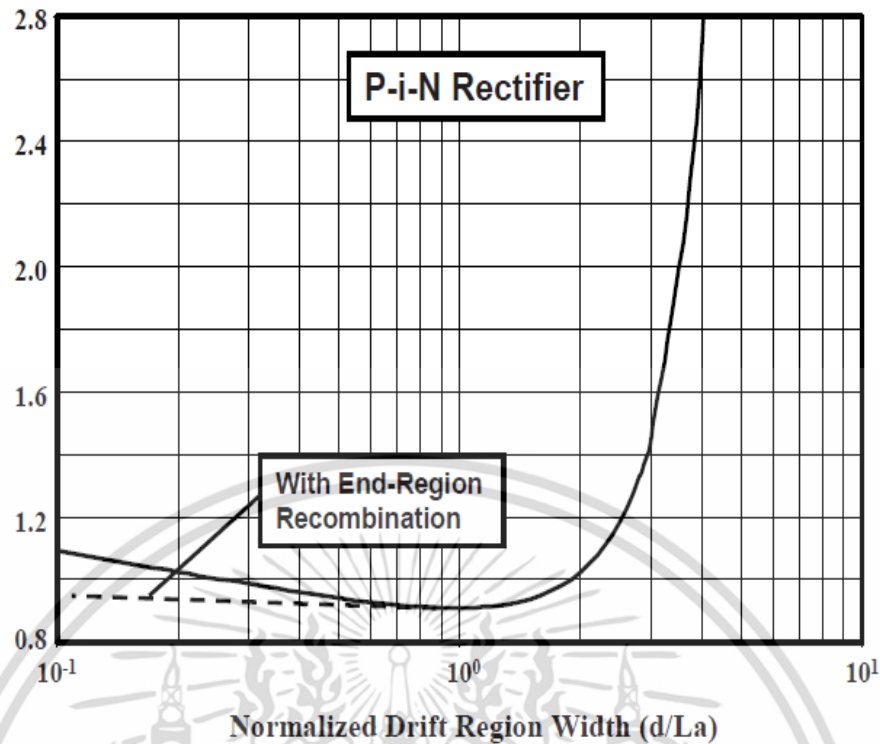
รูปที่ 2.7 ฟังก์ชัน $F(d/L_a)$ ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN

การเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน $F(d/L_a)$ กับการเพิ่มขึ้นของอัตรา (d/L_a) ดังรูปที่ 2.7 สามารถเห็นได้ชัดจากฟังก์ชันค่ามากที่ $d/L_a = 1$ ดังนั้น ที่ขณะ On-State แรงดันตกคร่อมที่ลดลงอายุพาหะควรจะปรับค่าของระยะเวลาแพร่ให้เท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างบริเวณดริฟท์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าฟังก์ชัน $F(d/L_a)$ มีการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราของ d/L_a เพิ่มขึ้นเกิน 3 สิ่งนี้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันขณะ On-State เมื่อระยะเวลาแพร่มีค่าน้อยกว่าครึ่งของความกว้างบริเวณดริฟท์

แรงดันตกคร่อมขณะ On-State ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.61) สำหรับอุปกรณ์ที่มีความกว้าง (d) เพียงครึ่งหนึ่ง นั่นก็คือการเกิดปรากฏการณ์พันช์ทรู (Punch-Through)

$$V_{ON} = \frac{2kT}{q} \ln \left[\frac{J_T d}{2qD_{an_i} F(d/L_a)} \right] \quad (2.63)$$

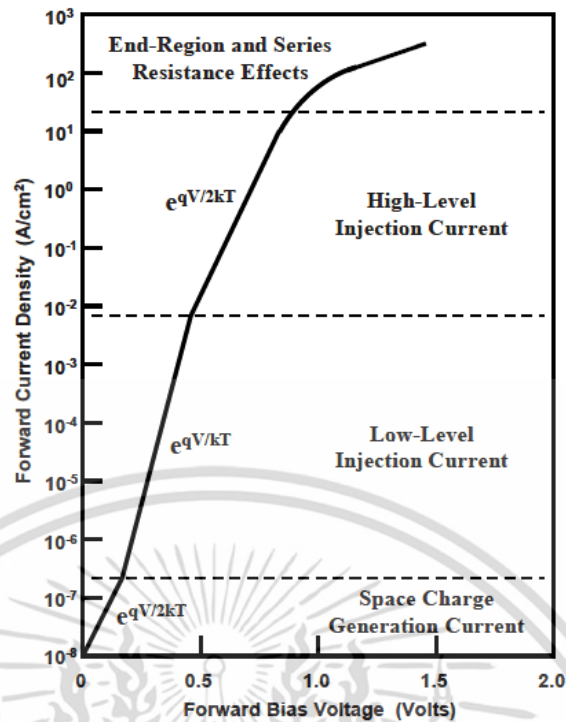
แรงดันที่ตกคร่อมถูกคำนวณสำหรับซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN กับความกว้างของบริเวณดริฟท์ ที่ 200 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 2.8 ที่ความหนาแน่นกระแสขณะ on-state 100 A cm^{-2} คาดว่าแรงดันที่ตกคร่อมจะมีค่าน้อยที่อัตรา d/L_a เท่ากับ 1 แต่จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตรา d/L_a เกิน 3



รูปที่ 2.8 แรงดันตกคร่อมขณะ on-state ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

2.2.5 คุณลักษณะการนำกระแสขณะไบอัสตรง

การวิเคราะห์กระแสไหลในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN อันดับแรกต้องบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นเมื่อมีการฉีด ที่ระดับกระแสต่ำมากๆ การควบคุมการเกิดของกระแสที่ไหลกับสัดส่วนของกระแสที่ ($qV_{ON}/2kT$) เมื่อกระแสถูกควบคุมด้วยพาหะส่วนน้อยที่ฉีดเข้าไปในบริเวณดริฟท์ กับความเข้มข้นของพาหะส่วนน้อยที่ต่ำกว่าความเข้มข้นสารเจือ กระแสไหลที่เกิดขึ้นจากการแพร่ภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับต่ำ กระแสที่ไหลนั้นเป็นสัดส่วนกับ (qV_{ON}/kT) ด้วยการเพิ่มขึ้นในความหนาแน่นกระแส ความหนาแน่นพาหะจะถูกฉีดในบริเวณดริฟท์ ก็จะเกินกว่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือ ซึ่งก็คือ เงื่อนไขการฉีดระดับสูง กระแสก็จะไหลอีกครั้งเป็นสัดส่วนกับ ($qV_{ON}/2kT$) ในโหมดการทำงานนี้ ความหนาแน่นพาหะที่ถูกฉีดในบริเวณดริฟท์ จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนต่อความหนาแน่นกระแสส่งผลให้แรงดันตกคร่อมคงที่ อิทธิพลจากการรวมตัวที่บริเวณขอบลดลงจากความหนาแน่นพาหะที่ถูกฉีดในบริเวณดริฟท์ ซึ่งเห็นได้จากกราฟรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 คุณสมบัติขณะ On-State ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

2.3 คุณสมบัติการสวิตช์ซิ่ง

ตัวเรียงกระแสกำลังมีหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของกระแสภายในวงจร ถูกประยุกต์ใช้มากมายในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาในการทำงานขณะ On-State เมื่อมีการให้แรงดันบวกกับขั้วแอโนด และขณะ Off-State เมื่อให้แรงดันลบกับขั้วแอโนด ระหว่างสถานะการทำงานทั้งสองนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่อุปกรณ์ต้องการความเร็วสูงเพื่อที่จะลดกำลังสูญเสีย การเปลี่ยนแปลงจากสถานะป้องกันแรงดันย้อนกลับเป็นสถานะ On-State มาพร้อมด้วยแรงดันที่มากในแอโนดซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของกำลังที่มีการกระจาย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การฟื้นตัวไปข้างหน้า (Forward Recovery) แม้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นมากเมื่อไดโอดมีการสวิตช์ การสะสมประจุภายในบริเวณดริฟท์ต้องถูกแยกออกก่อนการรองรับแรงดันสูง ก่อให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับมากในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ปรากฏการณ์นี้กล่าวถึง การฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery)

2.3.1 การฟื้นตัวไปข้างหน้า

เมื่อซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN มีการสวิตช์ซิ่งจากสถานะหนึ่งไปสู่สถานะหนึ่ง แรงดันที่ตกคร่อม ขณะให้แรงดันไปข้างหน้าจะมีมากกว่าแรงดันตกคร่อมภายใต้การทำงานสภาวะสมดุล โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากกระแสที่แอโนดเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว ดังนั้นแรงดันตกคร่อมบริเวณตรงกลางของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN จะไม่ขึ้นกับความหนาแน่นกระแส ถ้าอัตราของกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนของบริเวณดริฟท์ก็ยังคงสามารถอยู่ได้ ดังนั้นส่วนของบริเวณดริฟท์จะมีความต้านทานสูงเนื่องมาจากความเข้มข้นต่ำ แรงดันที่ตกคร่อมจะมีมากกว่าภายใต้การทำงานในสภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มขึ้นของแรงดันไปข้างหน้าเมื่อซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN มีการทำงานในอัตราสูง สำหรับกระแสแอโนดสามารถที่จะวิเคราะห์จากการกระจายตัวของประจุที่กักเก็บของพาหะเหมือนฟังก์ชันของเวลาและตำแหน่งในบริเวณดริฟท์ ความเข้มข้นพาหะเกินส่วนใหญ่ที่ถูกฉีดเข้าไปในบริเวณดริฟท์ นิยามโดยสมการต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \delta n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{\partial n}{\tau_n} \quad (2.64)$$

ถ้ากระแสที่ไหลส่วนใหญ่มาจากการแพร่ ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนนิยามโดย

$$J_n = qD_n \frac{\partial \delta n}{\partial x} \quad (2.65)$$

สมการการแพร่ของอิเล็กตรอน นิยามโดย

$$\frac{\partial \delta n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \delta n}{\partial x^2} - \frac{\partial n}{\tau_n} \quad (2.66)$$

ดังนั้นแรงดันตกคร่อมมากที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราสูงของกระแสภายในระยะเวลา ซึ่งมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับอายุการรวมตัว กระบวนการรวมตัวสามารถถูกละเลย เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial \delta n(x,t)}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \delta n(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.67)$$

สมการนี้อยู่ภายใต้การกระจายตัวของอิเล็กตรอนส่วนเกินในบริเวณดริฟท์เป็นฟังก์ชันของพื้นที่และเวลา การแก้ปัญหาสำหรับความเข้มข้นของอิเล็กตรอนส่วนเกินอยู่ในรูปของ

$$\delta n(x,t) = A(t)e^{-(x/\sqrt{4D_n t})} \quad (2.68)$$

เมื่อหาค่าของ $A(t)$ คือ ความหนาแน่นของกระแส, ซึ่งเพิ่มขึ้นกับฟังก์ชันของเวลา ความหนาแน่นของกระแสที่ขอบของรอยต่อพี-เอ็น (ที่ $x=0$) ภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูง นิยามโดย

$$J = J_n(0) = 2qD_n \left(\frac{d\delta n}{dx} \right)_{x=0} \quad (2.69)$$

ใช้สมการการกระจายตัวของพาหะในสมการที่ (2.68)

$$J = 2qD_n \frac{A(t)}{\sqrt{4D_n t}} = qA(t) \sqrt{\frac{D_n}{t}} \quad (2.70)$$

ระหว่างเวลาทรานเซียนด์ของการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า ความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้น มีค่าเป็นเอกสารถูกที่ (a) ดังนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

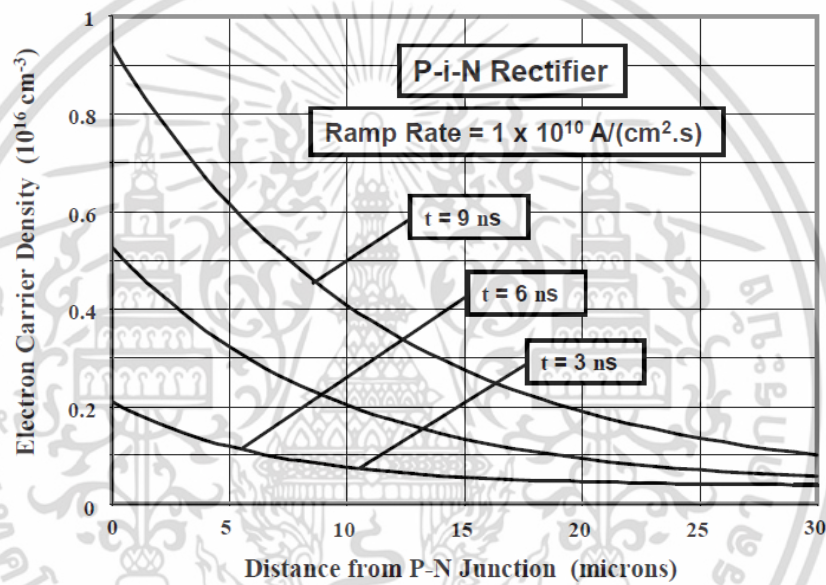
$$J = at \quad (2.71)$$

จากสมการด้านบน ค่าสัมประสิทธิ์ของ $A(t)$ กำหนดได้โดย

$$A(t) = \frac{at^{3/2}}{q\sqrt{D_n}} \quad (2.72)$$

ทำให้ความเข้มข้นอิเล็กตรอนส่วนเกินที่ขอบของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นตามฟังก์ชันของเวลา เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแส ความเข้มข้นอิเล็กตรอนส่วนเกินนั้นจะลดลงจากตรงรอยต่อพี-เอ็น ตามระยะการแพร่ นิยามโดย

$$L(t) = \sqrt{4D_n t} \quad (2.73)$$



รูปที่ 2.10 ความเข้มข้นอิเล็กตรอนในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า

การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นอิเล็กตรอนส่วนเกินภายในบริเวณดริฟท์ นิยามโดย

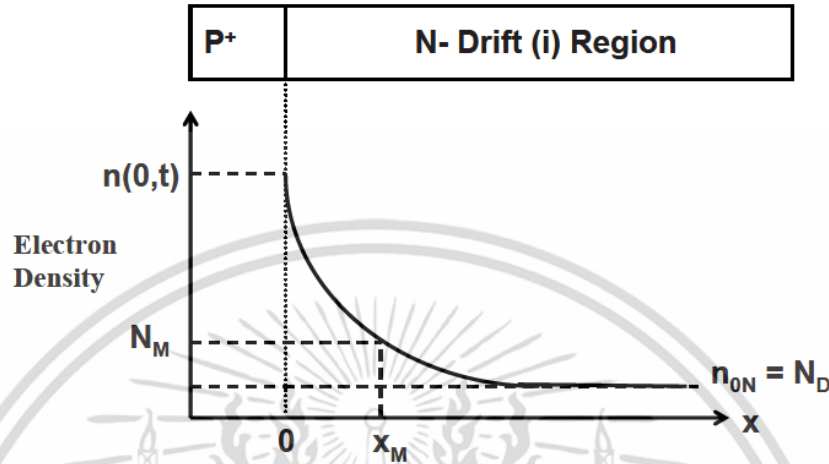
$$\delta n(x, t) = \frac{at^{3/2}}{q\sqrt{D_n}} e^{-(x/\sqrt{4D_n t})} \quad (2.74)$$

ความเข้มข้นรวมของอิเล็กตรอนภายในบริเวณดริฟท์สามารถนิยามได้จากผลรวมของความเข้มข้นอิเล็กตรอนเนื่องมาจากอะตอมสารเจือผู้ให้ที่ความเข้มข้นส่วนเกินของอิเล็กตรอน

$$n(x, t) = \delta n(x, t) + N_D = \frac{at^{3/2}}{q\sqrt{D_n}} e^{-(\frac{x}{\sqrt{4D_n t}})} + N_D \quad (2.75)$$

ความเข้มข้นรวมของอิเล็กตรอนที่ได้พลอตแสดงไว้ดังรูปที่ 2.10 สำหรับกรณีสามตัวอย่างของเวลาในอัตราเชิงลาดที่ $1 \times 10^{10} \text{ A cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN นี้ความหนาของบริเวณ ดริฟท์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ $60 \mu\text{m}$ กับความเข้มข้นการเติมอะตอมสารเจือที่ $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ที่เวลา 3 ถึง 6 ถึง 9 ns ความเข้มข้นอิเล็กตรอนที่รอยต่อพี-เอ็น ($x=0$) เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสจาก 30 เป็น 60 และ 90 Acm^{-2} ดังนั้นการกระจายตัวของอิเล็กตรอนไกลกว่าในบริเวณ ดริฟท์จากกระบวนการแพร่



รูปที่ 2.11 ความเข้มข้นอิเล็กตรอนในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณดริฟท์สามารถคำนวณจากการแทนผลของความหนาแน่นกระแส ณ เวลาต่างๆ และค่าความต้านทานของบริเวณดริฟท์ บนพื้นฐานของความหนาแน่นการกระจายตัวอิเล็กตรอน สามารถที่จะสรุปได้ว่าค่าความต้านทานของบริเวณดริฟท์ลดลงกับเวลา เพราะว่ามีค่ามากของบริเวณดริฟท์กลายเป็นตัวรับความนำเช่นเดียวกับกระแสที่มีลักษณะเชิงลาดขึ้น การวิเคราะห์ผลของความต้านทานบริเวณดริฟท์ พิจารณาส่วนระยะที่ x จากรอยต่อพี-เอ็น กับความหนาส่วนที่น้อยสุด dx นิยามได้ดัง

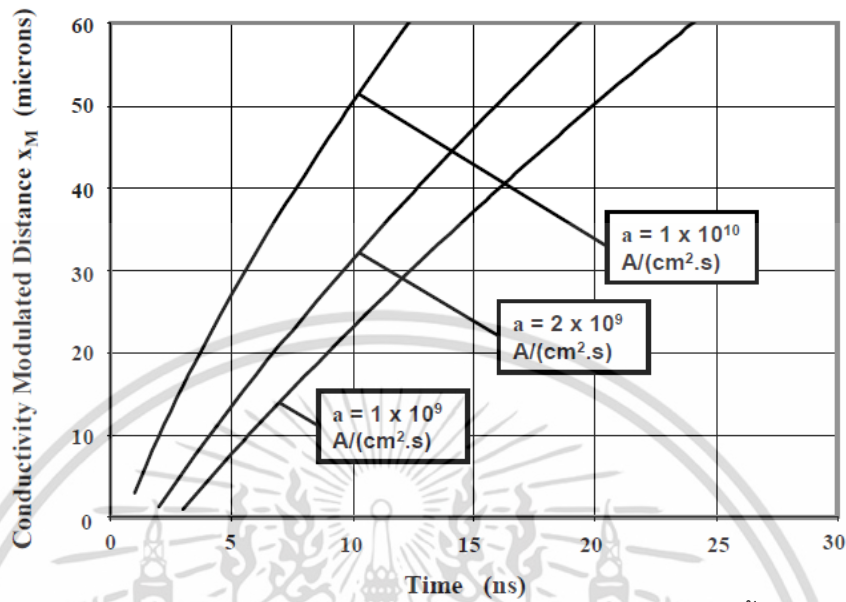
$$dR = \rho(x)dx = \frac{dx}{q\mu_n(x,t)n(x,t)} \tag{2.76}$$

เมื่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งของเวลา เพราะว่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ ค่าความต้านทานบริเวณดริฟท์ระหว่างการฟื้นตัวกลับไปข้างหน้า นิยามโดย

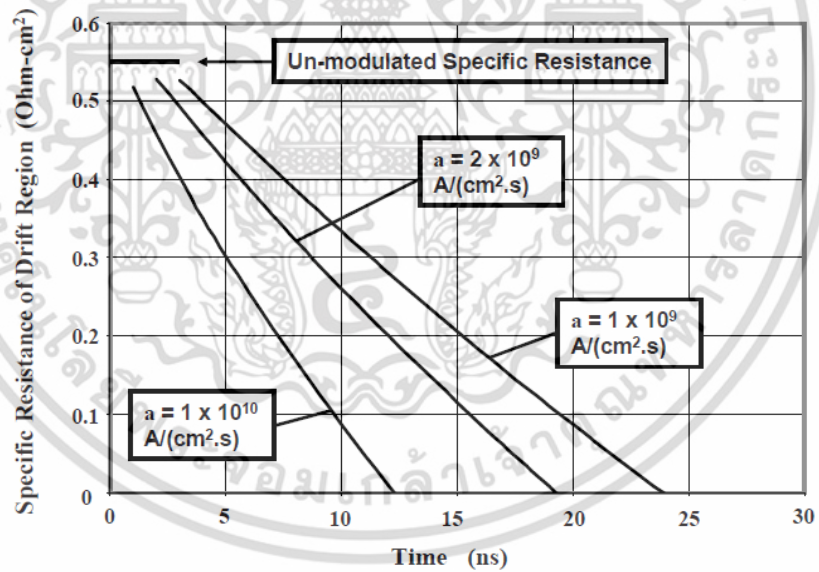
$$R_D(t) = \int_0^{W_D} dR = \int_0^{W_D} \frac{dx}{q\mu_n(x,t)n(x,t)} \tag{2.77}$$

ง่ายต่อการวิเคราะห์การแก้ปัญหาสำหรับค่าความต้านทานที่ไม่สามารถได้รับเนื่องมาจากการขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของความเข้มข้นอิเล็กตรอน วิธีทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์ค่าความต้านทานบริเวณดริฟท์บนพื้นฐานการกำหนด ค่าความเข้มข้น (N_M) บ่งชี้ให้เห็นได้จากรูปที่ 2.11 และการสมมติว่าค่าความต้านทานของบริเวณดริฟท์กับความเข้มข้นอิเล็กตรอน ค่าเหล่านี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่เหลือบริเวณดริฟท์ เมื่อไม่มีการปรับเปลี่ยนจะถือว่าเกิดขึ้น ส่วนของ Conductivity Modulate จากบริเวณดริฟท์นั้นมีระยะเท่ากับ x_M กำหนดโดยใช้สมการที่ (2.75)

$$x_M(t) = \sqrt{4D_n t} \ln \left[\frac{A(t) + N_D}{N_M} \right] \tag{2.78}$$



รูปที่ 2.12 ระยะของบริเวณ Conductivity-Modulated ระหว่างกระบวนการพื้นตัวกลับไปข้างหน้า

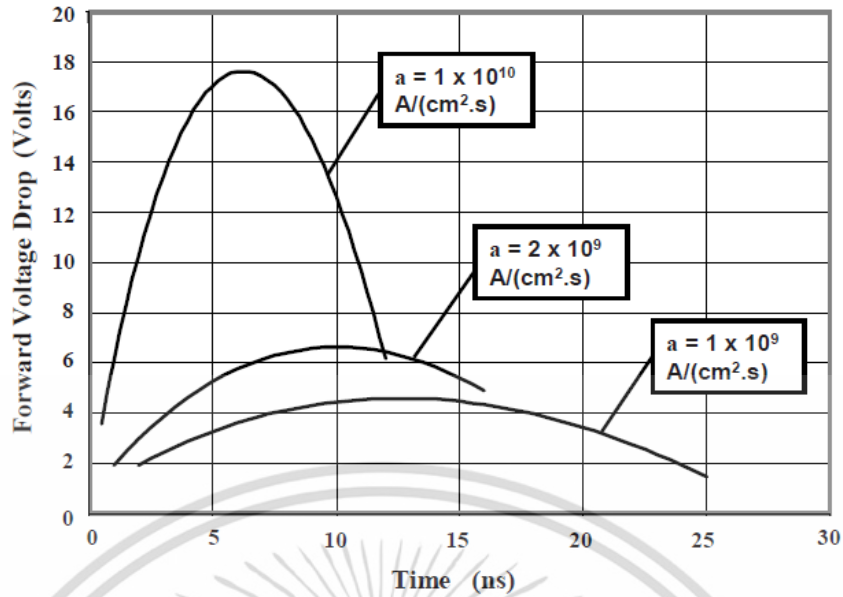


รูปที่ 2.13 การลดลงของค่าความต้านทานบริเวณดริฟท์ระหว่างกระบวนการพื้นตัวกลับไปข้างหน้า

แรงดันตกคร่อมบริเวณดริฟท์ $[V_D(t)]$ สามารถหาได้จากการคูณกันของค่าความต้านทานและค่าความหนาแน่นกระแส ในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.14

$$V_D(t) = R_D(t)J_F(t) \tag{2.79}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

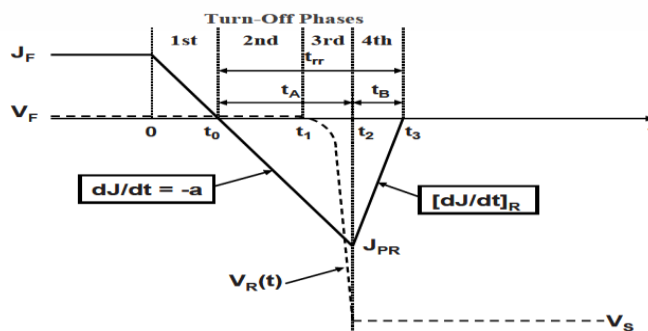


รูปที่ 2.14 แรงดันตกคร่อมซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวย้อนกลับไปข้างหน้า

2.3.2 การฟื้นตัวย้อนกลับ

การมีอยู่มากของความเข้มข้นพาหะอิสระในบริเวณดริฟท์ระหว่าง On-State การสวิตช์ของไดโอดจากสถานะหนึ่งไปยังสถานะหนึ่ง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกำจัดพาหะเหล่านี้เพื่อช่วยให้การสร้างบริเวณปลอดพาหะนั้นสามารถรองรับสนามไฟฟ้าที่สูงได้ กระบวนการสวิตช์ซึ่งจากสถานะ On-State ไปเป็นสถานะป้องกันแรงดัน นิยามว่า การฟื้นตัวกลับไปข้างหลัง (Reverse Recovery) เมื่อให้แรงดันบวกที่ขั้วแอโนด กระแสจะไม่สามารถลดลงเป็นศูนย์ได้ทันที ถ้าเกิดความผกผันของแรงดันแหล่งจ่ายและค่าความต้านทานอนุกรม กระแสคงที่ย้อนกลับสังเกตได้ภายหลังมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันจากบวกเป็นลบ กระแสยังคงไหลอยู่จนกระทั่งการสะสมประจุจะพอให้รอยต่อพี-เอ็น รองรับแรงดันด้วยการสร้างของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งกระบวนการฟื้นตัวย้อนกลับจะเกี่ยวข้องกับโหลดความต้านทาน (Resistive Load)

ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นธรรมดาที่จะใช้ตัวเรียงกระแสกำลังเพื่อเหนี่ยวนำโหลด ในกรณีนี้ กระแสที่ลดลง ณ อัตราเชิงลาดคงที่ (a) ดังรูปที่ 2.15 จนกระทั่งไดโอดสามารถรองรับแรงดันได้นั้นคือตำแหน่งของกระแสฟื้นตัวย้อนกลับสูงสุด (Peak Reverse Recovery Current J_{PR}) เกิดขึ้นเนื่องจากประจุที่สะสม ด้วยการลดลงของกระแสจนเป็นศูนย์ ซึ่งยังคงอยู่ในโหมดแรงดันไป



รูปที่ 2.15 ลักษณะกระแสและแรงดัน ระหว่างกระบวนการฟื้นตัวย้อนกลับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปข้างหน้าที่ Low On-State แรงดันตกคร่อมจะยังคงมีจนที่เวลา t_1 จากนั้นแรงดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเท่าแหล่งจ่ายแล้วตัวเรียงกระแสจะทำงานในโหมดแรงดันย้อนกลับ กระแสที่ไหลผ่านตัวเรียงกระแสในทิศทางย้อนกลับจะมีค่ามากที่สุด (J_{PR}) ที่เวลา t_2 เมื่อแรงดันย้อนกลับเท่ากับแรงดันย้อนกลับของแหล่งจ่าย (V_S) ในเวลาเดียวกันก็จะมีกระแสสูงและแรงดันสูงที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันการกระจายอยู่ในตัวอุปกรณ์กำลัง กระแสพื้นตัวย้อนกลับสูงที่ไหล ที่เกิดจากการสวิตช์นั้นจะเกิดการเพิ่มของกำลังสูญเสียภายในตัวอุปกรณ์ ดังนั้นการลดลงขนาดกระแสพื้นตัวย้อนกลับสูงและระยะเวลาพื้นตัวของทรานเซียนต์จะเกิดผลดี ซึ่งระยะเวลาที่กล่าวถึงนี้ก็คือ ระยะเวลาพื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Time t_{rr})

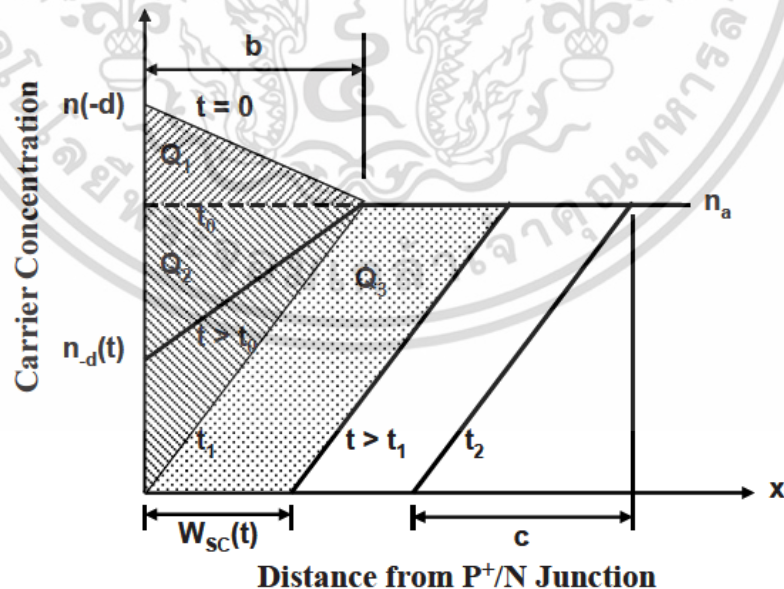
รูปแบบการวิเคราะห์ของการพื้นตัวย้อนกลับสำหรับเวลาปิดของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ภายใต้อัตราการที่ของการเปลี่ยนแปลงกระแส (กระแสอัตราเชิงลาด) สามารถนิยามได้ความเข้มข้นของพาหะอิสระในบริเวณดริฟท์ที่แสดงในรูปที่ 2.16 การกระจายพาหะที่เป็นลูกโซ่ที่เกิดจากกระแสไหลขณะ On-State ประมาณได้จากการเฉลี่ยของค่ากลางบริเวณดริฟท์และส่วนเชิงเส้นต่างๆกับความเข้มข้นของ $n(-d)$ ที่ $x=0$ ถึงความเข้มข้นเฉลี่ยของ n_a ที่ระยะ $x=b$ ความเข้มข้นพาหะนิยามได้จากสมการที่ (2.43) และ (2.47)

$$n(-d) = \frac{\tau_{HL} J_F}{2qL_a} \left[\frac{\cosh\left(\frac{-d}{L_a}\right)}{\sinh\left(\frac{d}{L_a}\right)} - \frac{\sinh\left(\frac{-d}{L_a}\right)}{2 \cosh\left(\frac{d}{L_a}\right)} \right] \tag{2.80}$$

และ

$$n_a = \frac{J_F \tau_{HL}}{2qd} \tag{2.81}$$

เมื่อ J_F คือความหนาแน่นกระแสไปข้างหน้า



รูปที่ 2.16 รูปแบบการกระจายตัวของพาหะในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ในกระบวนการพื้นตัวย้อนกลับ

กระแสมีการไหลผ่านที่เวลาต่างๆระหว่างที่ช่วงเวลาปิดกำหนดด้วยอัตราการแพร่ของพาหะที่ขอรอยต่อ P^+-N

$$J_F = 2qD_a \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=-d} \quad (2.82)$$

ในเฟสแรกของเวลาปิด ความหนาแน่นกระแสจะเปลี่ยนแปลงจาก On-State (J_F) เป็นศูนย์ ที่เวลา t_0 ระยะ b ในรูปที่ 2.16 จะได้ความสัมพันธ์ของประจุ Q_1 ที่ลดลงระหว่างเฟสแรกถึงกระแสไหล ที่ขอบสุดของเฟสแรก รูปแบบของพาหะจะมีการแฟลท (Flat) ที่เวลา t_0 เห็นได้จากเส้นประในรูปที่ 2.16 เพราะว่ากระแสที่เป็นศูนย์ที่เวลานี้ การเปลี่ยนแปลงในการสะสมประจุภายในบริเวณดริฟท์ระหว่างเฟสแรกสามารถได้รับจากพื้นที่ Cross-Hatched เห็นได้จาก Q_1 ในรูป

$$Q_1 = \frac{qb}{2} [n(-d) - n_a] \quad (2.83)$$

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

$$Q_1 = \int_0^{t_0} J(t)dt = \int_0^{t_0} (J_F - at)dt = J_F t_0 - \frac{at_0^2}{2} \quad (2.84)$$

ซึ่ง t_0 ก็คือ

$$t_0 = \frac{J_F}{a} \quad (2.85)$$

นำสมการทั้งสองมารวมกัน ได้

$$b = \frac{J_F^2}{qa[n(-d) - n_a]} \quad (2.86)$$

ความเข้มข้นพาหะ $n(-d)$ ในสมการ (2.80) สามารถเขียนได้เป็น

$$n(-d) = \frac{J_F \tau_{HL}}{2qL_a} K \quad (2.87)$$

เมื่อ

$$K = \left[\frac{\cosh\left(\frac{-d}{L_a}\right)}{\sinh\left(\frac{d}{L_a}\right)} - \frac{\sinh\left(\frac{-d}{L_a}\right)}{2 \cosh\left(\frac{d}{L_a}\right)} \right] \quad (2.88)$$

ใช้สมการที่ (2.87) ในการเชื่อมรวมกับสมการ (2.81) และ (2.86)

$$b = \frac{2dL_a J_F}{a \tau_{HL} (Kd - L_a)} \quad (2.89)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเฟสที่สองในเวลาปิดเกิดที่เวลา t_0 ที่ซึ่งกระแสเท่ากับศูนย์จนถึงเวลา t_1 เมื่อรอยต่อ $P^+ - N$ สามารถที่จะรองรับแรงดัน ลักษณะของพาหะที่เวลา t_1 แสดงดังรูปที่ 2.16 ความเข้มข้นศูนย์ที่ขยายออกจากรอยต่อ ($x=0$) และความเข้มข้นเฉลี่ย n_a ที่ระยะ b จากรอยต่อ หลังเวลา t_1 บริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ $P^+ - N$ กับความเข้มข้นพาหะศูนย์ที่ระยะห่างจากรอยต่อ เวลา t_1 ได้รับการวิเคราะห์จากประจุที่เคลื่อนที่ออกระหว่างระยะเวลาปิดจาก $t=t_0$ ถึง $t=t_1$ ในรูปที่ 2.16 ประจุที่เคลื่อนที่ออกระหว่างเวลาระยะห่างชี้ให้เห็นจากพื้นที่ Cross-Hatched นิยามโดย

$$Q_2 = \frac{1}{2} q n_a b \quad (2.90)$$

ความสัมพันธ์ของประจุที่กระแสไหลระหว่างระยะเวลาปิดจาก $t=t_0$ ถึง $t=t_1$

$$Q_2 = \int_{t_0}^{t_1} J(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} (at) dt = \frac{a}{2} (t_1^2 - t_0^2) \quad (2.91)$$

ใช้สมการ (2.85) สำหรับ t_0

$$Q_2 = \frac{a}{2} \left(t_1^2 - \frac{J_F^2}{a^2} \right) \quad (2.92)$$

รวมสมการที่ (2.90) และ (2.92)

$$t_1 = \sqrt{\frac{q n_a b}{a} + \frac{J_F^2}{a^2}} \quad (2.93)$$

$$t_1 = \frac{J_F}{a} \sqrt{\frac{L_a}{Kd - L_a} + 1} \quad (2.94)$$

ระหว่างตลอดเวลาจาก $t=0$ จนกระทั่งเวลา $t=t_1$ รอยต่อ $P^+ - N$ ภายในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด Pin จะยังคงมีแรงดันไปข้างหน้าอยู่ เพราะว่ายังคงมีความหนาแน่นพาหะส่วนน้อยในบริเวณ ทรินท์ที่รอยต่อ $[p(-d,t)]$ เหนือจุดสมดุลของความเข้มข้นพาหะส่วนน้อย (p_{0N}) ภายใต้การสมมติของเงื่อนไขการฉีดระดับสูงในบริเวณทรินท์ ความหนาแน่นพาหะส่วนน้อย $[p(-d,t)]$ จะเท่ากับความหนาแน่นพาหะส่วนมาก $[n(-d,t)]$ ดังรูปที่ 2.16 ความหนาแน่นกระแสที่ตำแหน่งต่างๆในเวลา นิยามโดย

$$J(t) = 2qD_a \left(\frac{dn}{dx} \right)_{x=-d} = 2qD_a \frac{[n(-d,t) - n_a]}{b} \quad (2.95)$$

ดังนั้นความเข้มข้นพาหะในบริเวณทรินท์ที่รอยต่อจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแส โดย

$$p(-d,t) = n(-d,t) = n_a + \frac{J(t)b}{2qD_a} = n_a + \frac{(J_F - at)b}{2qD_a} \quad (2.96)$$

แสดงให้เห็นว่าค่าทั้งสองที่เป็นบวกและลบสามารถใช้ได้สำหรับความหนาแน่นกระแสระหว่างขณะเวลาปิดที่ t_1 แรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าที่รอยต่อระหว่างช่วงเวลาสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's Relationship)

$$V_F(t) = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{p(-d)}{p_{0N}} \right] = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(J_F - at)b}{2qD_a p_{0N}} + \frac{n_a}{p_{0N}} \right] \quad (2.97)$$

สมการนี้อธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ระหว่างขณะเวลาเวลาปิดจนกระทั่งรองรับแรงดันย้อนกลับได้

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

$$Q_3 = qn_a W_{SC}(t) \quad (2.98)$$

ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสที่ไหลระหว่างขณะเวลาปิดที่เวลา t_1 ถึงเวลา t

$$Q_3 = \int_{t_1}^t J(t) dt = \int_{t_1}^t (J_F - at) dt = J_F(t - t_1) - \frac{a}{2}(t^2 - t_1^2) \quad (2.99)$$

รวมความสัมพันธ์ข้างต้นดังกล่าวเข้าด้วยกัน สำหรับประจุ Q_3 จะสามารถอธิบายการเพิ่มขึ้นของขนาดบริเวณปลอดพาหะที่เป็นไปตามฟังก์ชันของเวลา

$$W_{SC}(t) = \frac{a}{2qn_a}(t^2 - t_1^2) - \frac{J_F}{qn_a}(t - t_1) \quad (2.100)$$

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ สามารถคำนวณได้จากสมการปัวซองส์ (Poisson's Equation)

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{Q(x)}{\epsilon_s} \quad (2.101)$$

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

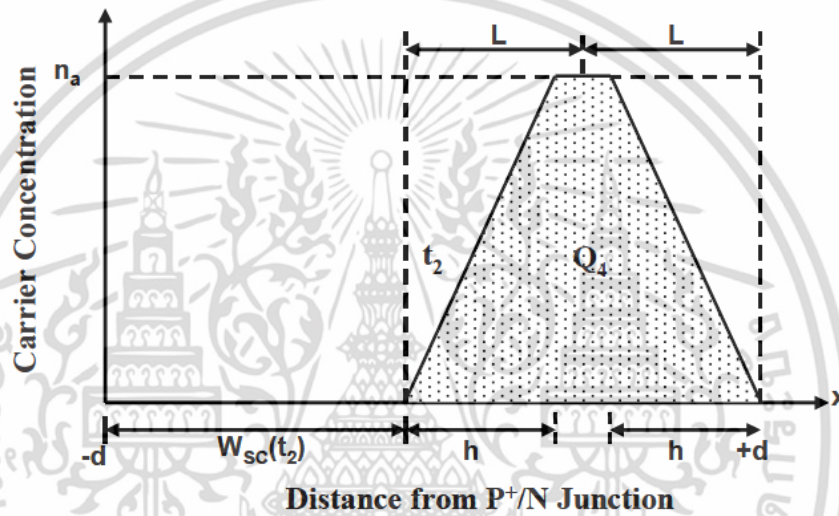
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p(t) = \frac{J_R(t)}{qV_{sat,p}} = \frac{at - J_F}{qV_{sat,p}} \quad (2.102)$$

แรงดันที่รองรับบริเวณปลอดพาหะ นิยามโดย

$$V_R(t) = \frac{q[N_D + p(t)]}{2\epsilon_s} [W_{sc}(t)]^2 \quad (2.103)$$

สำหรับการขยายออกของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งให้เห็นว่าแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังเวลา t_1 ในตอนสุดท้ายของเฟสที่สามเกิดขึ้นเมื่อแรงดันย้อนกลับตกร้อมเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย (V_S) การใช้ค่าในสมการ (2.103) กับ (2.100) ที่เวลา t_2 ได้



รูปที่ 2.17 ประจุสะสมภายในซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN หลังจากสิ้นสุดเฟสที่สาม

ระหว่างเฟสที่สี่ของเวลาปิด กระแสย้อนกลับลดลงอย่างรวดเร็วที่การประมาณของอัตราคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ขณะที่แรงดันยังคงที่เท่ากับแหล่งจ่าย ประจุสะสมภายในบริเวณดริฟท์หลังจากสิ้นสุดเฟสที่สามดังรูปที่ 2.17 บริเวณส่วนที่แรเงา Q_4 ที่ตำแหน่งสิ้นสุดของเฟสสามในเวลาปิด ($t=t_2$) กระแสพื้นตัวย้อนกลับสูงสุด J_{PR} ที่ไหลผ่านโครงสร้างนั้น กระแสมีความสัมพันธ์กับพาหะอิสระ ตาม

$$J_{PR} = 2qD_a \frac{dn}{dx} = 2qD_a \frac{n_a}{h} \quad (2.104)$$

เมื่อขนาด h แสดงดังรูปที่ 2.17 โดยใช้สมการ

$$h = \frac{2qD_a n_a}{J_{PR}} \quad (2.105)$$

ประจุสะสมที่ยังเหลืออยู่ในบริเวณดริฟท์ที่เวลา t_2 นิยามโดย

$$Q_4 = qn_a [2d - W_{sc}(t_2) - h] \quad (2.106)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุต้องการการกำจัดออกระหว่างเฟสที่สี่ที่เวลาปิด ในระหว่างเฟสที่สี่กระแสที่ลดลงเป็นศูนย์ที่การประมาณอัตราการที่ชี้ให้เห็นดังรูปที่ 2.15 $[dj/dt]_R$ เหนือคาบเวลา t_B มีการขยายจากเวลา t_2 ไป t_3 ประจุที่ถูกกำจัดออกเนื่องมาจากกระแสที่ไหลระหว่างเวลาดังกล่าว นิยามโดย

$$Q_R = \frac{1}{2} J_{PR} t_B \quad (2.107)$$

ช่วงเวลากการลดลง (t_B) ของกระแสย้อนกลับ นิยามโดย

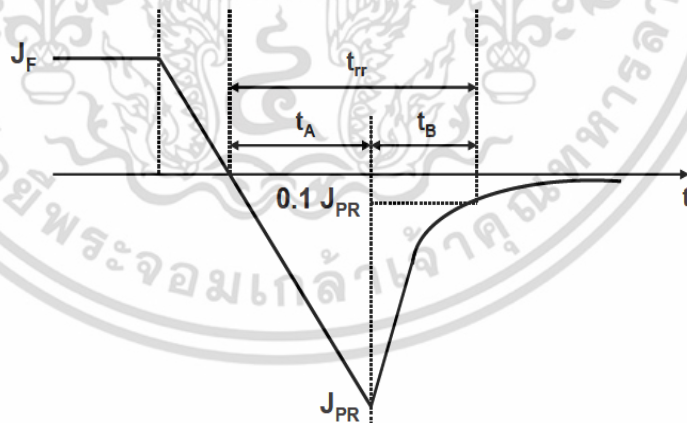
$$t_B = (t_3 - t_2) = \frac{2qn_a}{J_{PR}} [2d - W_{SC}(t_2) - h] \quad (2.108)$$

อัตราเชิงลาดย้อนกลับนิยามโดยการหารของกระแสพื้นตัวย้อนกลับสูงสุดด้วยช่วงเวลา

$$\left[\frac{dj}{dt} \right]_R = \frac{J_{PR}}{t_B} = \frac{J_{PR}^2}{2qn_a [2d - W_{SC}(t_2) - h]} \quad (2.109)$$

2.4 เทรดออฟของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

นอกจากกำลังสูญเสียจะเกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์ขณะช่วงเวลาปิดแล้ว ขณะ On-State แรงดันที่ตกคร่อมเพิ่มในตัวอุปกรณ์เมื่ออายุพหะส่วนน้อยลดลง ซึ่งจะส่งผลให้มีการเพิ่มกำลังสูญเสียระหว่างกระแสไหลได้ เพื่อที่จะลดกำลังสูญเสียโดยทั่วไปเราจะทำการปรับปรุงเส้นของเทรดออฟ (Tradeoff) ซึ่งอยู่ระหว่างเวลา On-State และการสวิตซ์ซิ่ง



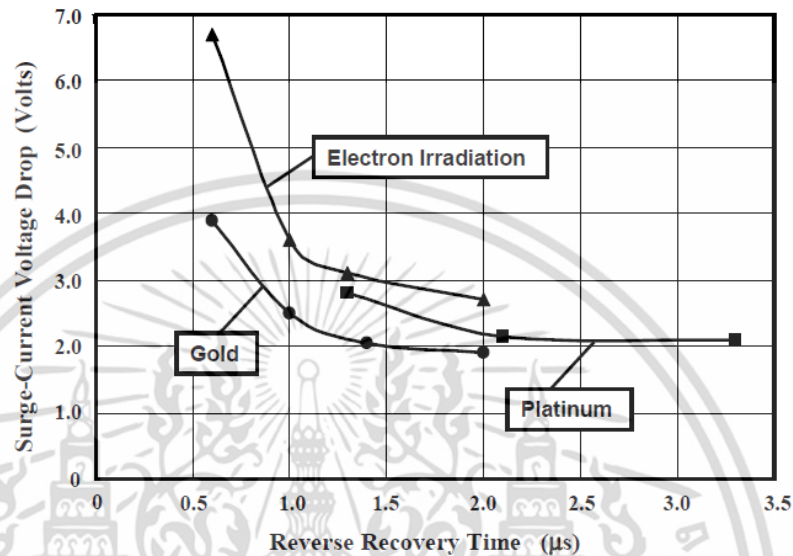
รูปที่ 2.18 กราฟกระแสพื้นตัวย้อนกลับ ขณะเวลาปิด

เส้นของเทรดออฟสามารถพลอตขึ้นขณะแรงดันตกคร่อมตอน On-State กับช่วงเวลาปิดพื้นตัวย้อนกลับ ช่วงเวลาปิดของกราฟนั้นประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างเฟสที่สี่ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ช่วงเวลาปิด (t_{PR}) นิยามโดยเวลาที่กระแสย้อนกลับลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ของกระแสพื้นตัวย้อนกลับสูงสุด (J_{PR}) หลังจากที่กระแสเท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การควบคุมอายุพาหะ

การปรับระยะเวลาการรวมตัวในบริเวณดริฟท์สามารถดำเนินการได้โดยหลายวิธี ในตำแหน่งของระดับลิทภายในแถบช่องว่าง ส่วนใหญ่ภายในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตสารกึ่งตัวนำจะใช้วิธีการแพร่อะตอมสารเจือพวกทองและแพลตตินั่มลงไปหรือใช้วิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอน



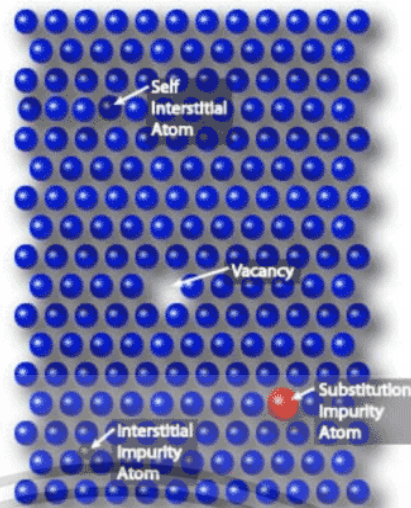
รูปที่ 2.19 กราฟเทรตอพอของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ได้รับการควบคุมอายุพาหะในวิธีต่างๆ

จากรูปที่ 2.19 อุปกรณ์ที่ใช้มีสภาพความต้านทาน 60-90 Ωcm ซิลิคอน N-type แรงดันพังทลาย 2,500 โวลต์

2.5 ผลกระทบและความเสียหายจากการฉายรังสี

2.5.1 เทคนิคการฉายรังสี

อนุภาคพลังงานสูงทะลุผ่านโครงสร้างผลึก พลังงานเหล่านี้เกิดการสูญเสียจากการทำปฏิกิริยากับโครงสร้างอะตอม ซึ่งทำให้เกิดการย้ายตำแหน่งไปจากเดิมที่เคยอยู่และเกิดเป็นตำหนิ ตำแหน่งว่างเหล่านี้เป็นได้ทั้งตำแหน่งว่างคู่, ตำแหน่งว่างกับสารเจือปน, การแทรกโครงสร้างอะตอม และส่วนประกอบของตำแหน่งว่างสารเจือปนกับการแทรกโครงสร้างอะตอม ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะความเสียหายจากโครงสร้างผลึกในแบบต่างๆ

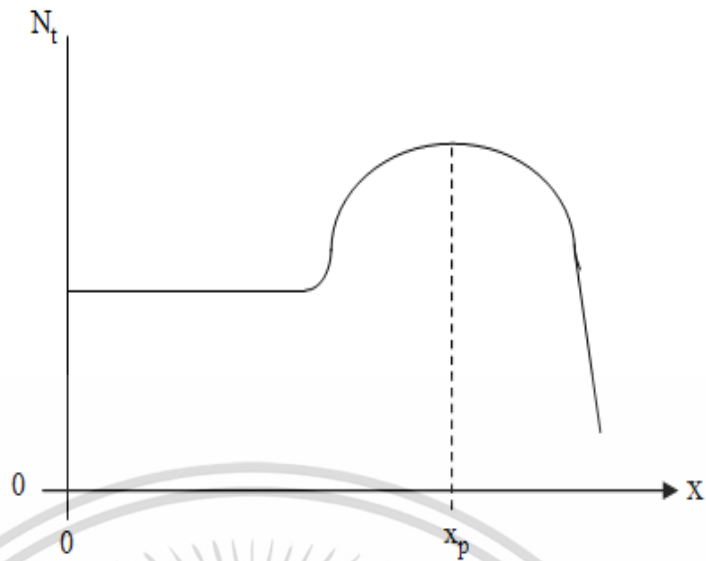
ทั้งหมดนี้นำไปสู่การเกิดศูนย์กลางการรวมตัวในซิลิคอน รั้งสีของอิเล็กตรอน, โปรตอน, อัลฟา, และแกมมา สามารถนำมาใช้ในเทคนิคนี้ได้โดยจะมีผลกระทบต่ออายุพหะ ระดับลึกที่เกิดจากการฉายรังสี แสดงดังรูปที่ 2.21

	Au	Pt	Pd	Ir	e	H ⁺	He ⁺⁺	
		0.19	0.22	0.28	0.16	0.17	0.17	W_c
		0.32	0.37		0.23	0.24	0.25	
					0.42	0.41	0.41	W_i
	0.54			0.55				
	0.36	0.42	0.32		0.36	0.37	0.36	
		0.26				0.26		W_v

รูปที่ 2.21 ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในแถบช่องว่างพลังงานของซิลิคอนที่เหมาะสมสำหรับการลดอายุของพหะ

แผนผังแสดงความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงสร้างผลึกกับความลึกหลังจากการฉายรังสีอนุภาคพลังงานสูงดังรูปที่ 2.22 ซึ่งแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตำหนิกับความลึกได้ผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

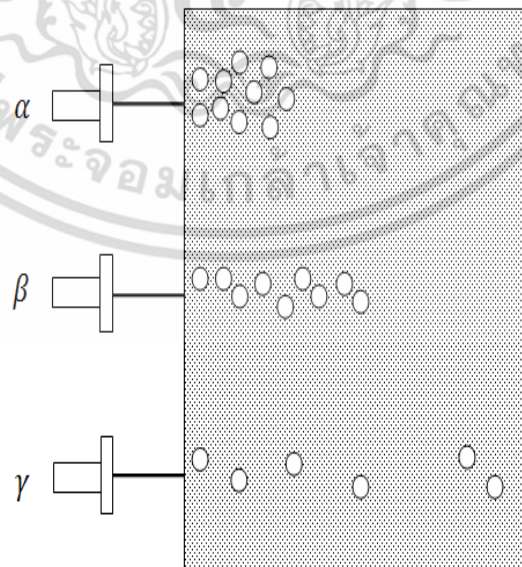


รูปที่ 2.22 แผนผังความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงสร้างผลึก กับความลึกหลังจากการฉายรังสีอนุภาคสูง

ความลึก x_p มีค่าสูงสุด (ความลึกที่ทะลุผ่าน) เป็นฟังก์ชันกับมวลและพลังงานของอนุภาค สำหรับการให้พลังงาน ความลึกทะลุผ่านโดยประมาณจะแปรผกผันกับมวลของอนุภาค ความเสียหายจากรังสีโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงท้ายสุดของช่วงอนุภาค

2.5.2 การแตกตัวเป็นไอออนของรังสี

จากตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของรังสีชนิดต่างๆ สำหรับค่าพลังงานจลน์ที่ 1 MeV โดยอนุภาคที่มีมวลมากหรือหนักกว่าจะสามารถเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอนุภาคที่มีมวลมากกว่า จึงทำให้ระยะทางที่อนุภาคนั้นสามารถทะลุผ่านได้มีค่าน้อยกว่า ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ลักษณะการทะลุผ่านของรังสีชนิดต่างๆ

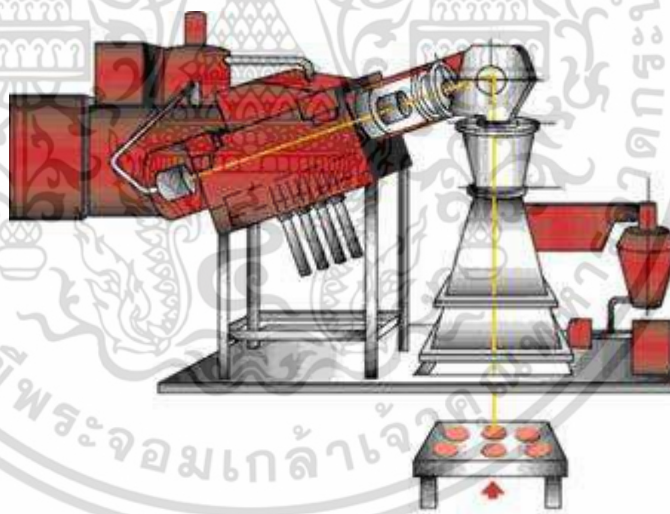
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของรังสีชนิดต่างๆ

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

2.5.3 เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนความเร็วสูง

คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง (E-Beam) ของศูนย์ฉายรังสีอัญมณีแห่งใหม่ (อาคาร E-Beam) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ติดตั้งอยู่ในศูนย์วิจัยของครีทซ์ อ่าเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก นั้นเป็นเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนแบบเชิงเส้น (Electron Linacs) รังสีที่เอามาใช้งานคือ อิเล็กตรอน และ เบริลล์สตราลูง ซึ่งเป็นเครื่องเร่งที่ประหยัดมากที่สุด โดยปกติออกแบบสร้างที่สามารถปรับเปลี่ยนพลังงานบีมได้ในช่วง 10 - 20 MeV (10-20 kW) สำหรับเครื่องเร่งอิเล็กตรอนบีม 20 MeV ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 1.5 mA หลังการฉายรังสีจะมีกัมมันตภาพรังสีต่ำ



รูปที่ 2.24 ลักษณะโครงสร้างเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้าง และการทดลอง

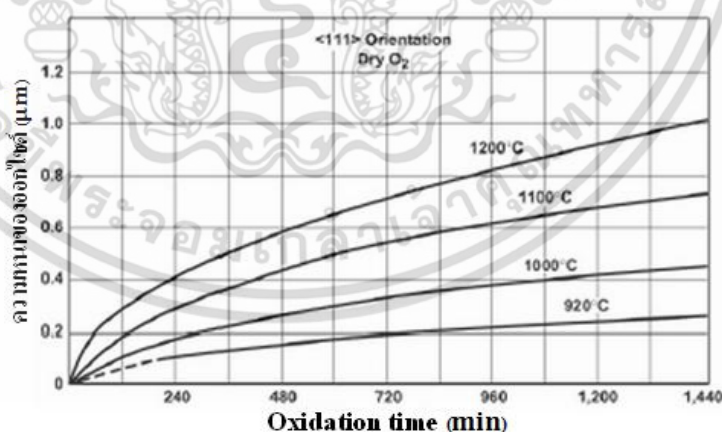
ในบทนี้เป็นการแสดงถึงเทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์โครงสร้าง PiN แล้วนำมาทำการฉายรังสีอิเล็กตรอน เพื่อลดค่าอายุพหะของตัวอุปกรณ์และศึกษาคุณสมบัติการทำงานกับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติของตัวอุปกรณ์

3.1 เทคโนโลยีการสร้างเบื้องต้น

3.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน

กระบวนการออกซิเดชัน หรือ Oxidation คือ กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) บนพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ เพื่อป้องกันวัสดุที่อยู่ด้านล่างจากการปนเปื้อน (Contamination) และทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างชั้นสาร ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันมีอยู่สองวิธี ได้แก่

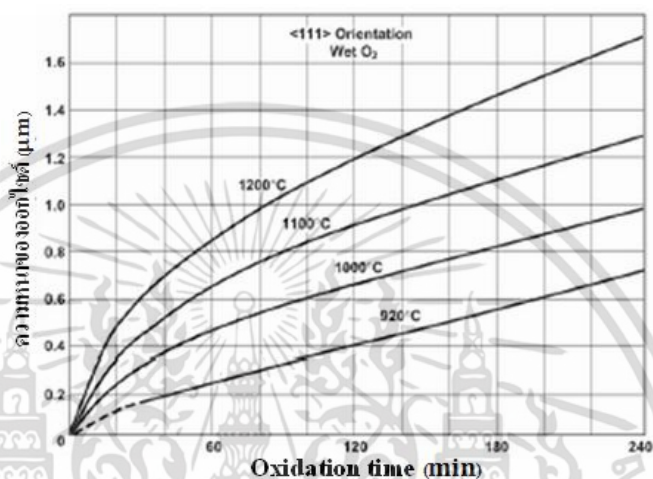
- กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation) ซึ่งใช้ในการสร้างชั้นออกไซด์ที่บาง (100 \AA - 1000 \AA) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของแก๊สออกซิเจนที่บริสุทธิ์กับอะตอมของซิลิคอนที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับอะตอมของออกซิเจนจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีสำหรับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้น SiO_2 ที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง

- กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation) ซึ่งใช้ในการสร้างชั้นออกไซด์ที่หนา ($>1000 \text{ \AA}$) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนและอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำโดยการให้ร้อนที่อุณหภูมิประมาณ $90-95 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งอัตราการเกิดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบชื้นนี้จะเร็วกว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดที่ได้จากกระบวนการแบบแห้งถึง 4 เท่า เนื่องจากขนาดของโมเลกุลน้ำเล็กกว่าของโมเลกุลออกซิเจนครึ่งหนึ่ง ดังนั้นอัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำไปยังชั้น SiO_2 จึงมากกว่าอัตราการแพร่ของออกซิเจน แม้ว่าอัตราของการเกิดออกไซด์ด้วยโมเลกุลน้ำจะมากกว่าออกซิเจน แต่ในออกไซด์แบบแห้งจะมีความหนาแน่นของโครงสร้างออกไซด์ที่สูงกว่าแบบชื้น ดังนั้นกระบวนการออกซิเดชันโดยทั่วไปจะนิยมใช้ “แห้ง-ชื้น-แห้ง” สำหรับความหนาของออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบชื้นเป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้น SiO_2 ที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น

การหาความหนาของชั้นออกไซด์ นอกจากจะพิจารณาจากกราฟรูปที่ 3.1 และ 3.2 แล้ว ยังสามารถบอกความหนาของชั้นออกไซด์ได้โดยการดูสีของชั้นออกไซด์จากการสะท้อนแสงฟลูออเรสเซนซ์ตรงๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆกัน

Film thickness (microns)	Order (5450 Å)	Color and comments
0.050		Tan
0.075		Brown
0.100		Dark violet to red-violet
0.125		Royal blue
0.150		Light blue to metallic blue
0.175		Metallic to very light yellow-green

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

Film thickness (microns)	Order (5450 Å)	Color and comments
0.200		Light gold or yellow-slightly metallic
0.225		Gold with slight yellow-orange
0.250		Orange to melon
0.275		Red-violet
0.300		Blue to violet-blue
0.310		Blue
0.325		Blue to blue-green
0.345		Light green
0.350		Green to yellow-green
0.365	II	Yellow-green
0.375		Green-yellow
0.390		Yellow
0.412		Light orange
0.426		Carnation pink
0.443		Violet-red
0.465		Red-violet
0.476		Violet
0.480		Blue-violet
0.493		Blue
0.502		Blue-green
0.520		Green (broad)
0.540		Yellow-green
0.560	III	Green-yellow
0.574		Yellow to "yellowish"
0.585		Light orange or yellow to pink borderlines
0.60		Carnation pink
0.63		Violet-red
0.68		Bluish
0.72	IV	Blue-green to green (quite broad)
0.77		Yellowish

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

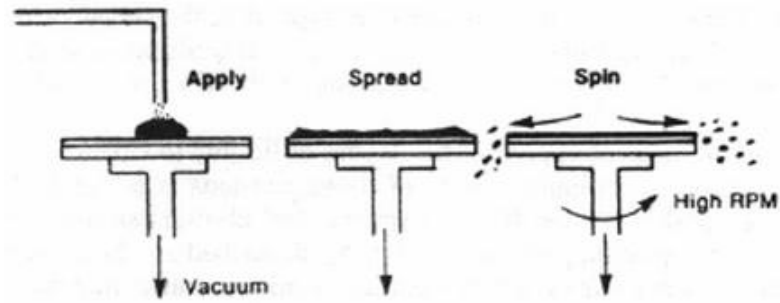
ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

Film thickness (microns)	Order (5450 Å)	Color and comments
0.80		Orange (rather broad for orange)
0.82		Salmon
0.85		Dull, light red-violet
0.86		Violet
0.87		Blue-violet
0.89		Blue
0.92	V	Blue-green
0.95		Dull yellow-green
0.97		Yellow to "yellowish"
0.99		Orange
1.10		Green
1.11		Yellow-green
1.12	VI	Green
1.18		Violet
1.19		Red-violet
1.21		Violet-red
1.24		Carnation pink to salmon
1.25		Orange
1.28		"yellowish"
1.32	VII	Sky blue to green-blue
1.40		Orange
1.45		Violet
1.46		Blue-violet
1.50	VIII	Blue
1.54		Dull yellow-green

3.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

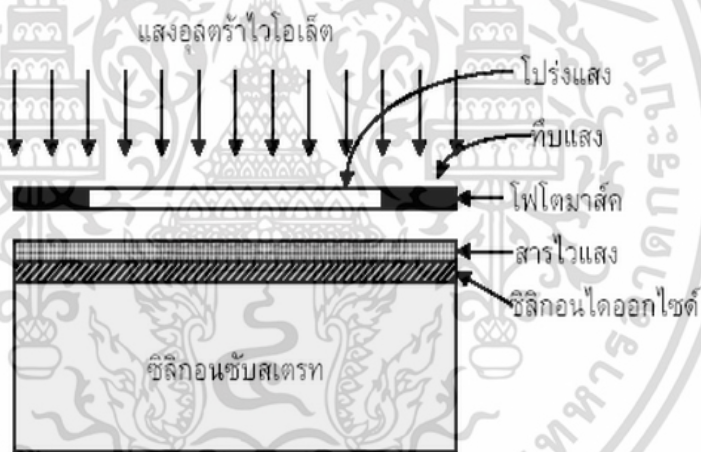
เป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากการเคลือบสารไวแสง (Photoresist) ลงบนชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ทั่วทั้งแผ่น โดยใช้วิธีการในการปล่อยน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์ จากนั้นทำการหมუნแผ่นเวเฟอร์เพื่อเกลี่ยให้น้ำยาไวแสงคลุมพื้นที่ทั่วแผ่นดังแสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



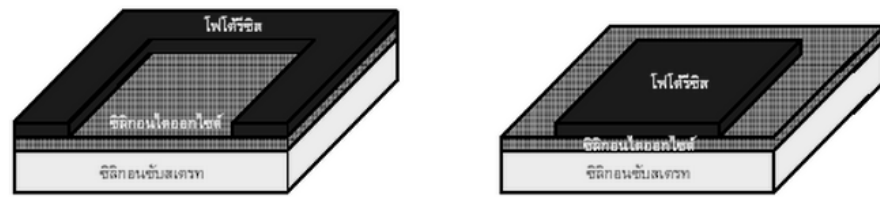
รูปที่ 3.3 การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์

สารไวแสงหรือน้ำยาไวแสงนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีถ้าถูกแสง น้ำยาไวแสงดังกล่าวมีทั้งชนิดบวกและชนิดลบ จากนั้นแผ่นเวเฟอร์ที่เคลือบน้ำยาไวแสงไปอบในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ทำให้น้ำยาไวแสงยึดติดกับผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น หลังจากนั้นจะนำไปฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านโฟโตมาร์ค (Photo Mask) ไปตกกระทบบนแผ่นเวเฟอร์ เพื่อให้เกิดรูปแบบหรือลวดลายตามแบบที่ต้องการบนแผ่นเวเฟอร์



รูปที่ 3.4 ลักษณะการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านโฟโตมาร์ค

หลังจากที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้วจะนำแผ่นเวเฟอร์ไปทำการล้าง (Develop) เพื่อเอาส่วนของน้ำยาไวแสงที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับว่าใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Resist) หรือชนิดลบ (Negative Resist) ถ้าใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวกพื้นที่ที่ถูกฉายแสงจะทำปฏิกิริยาทางเคมีและกลายเป็นส่วนที่สามารถละลายได้ น้ำยาไวแสงชนิดลบส่วนน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงจะกลายเป็นส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ ดังรูปที่ 3.5



ก.

ข.

รูปที่ 3.5 (ก.) น้ำยาไวแสงชนิดลบ (ข.) น้ำยาไวแสงชนิดบวก

3.1.3 กระบวนการกัด (Etching)

กระบวนการกัด หรือ Etching คือ การนำเอาชิ้นสารต่างๆ ออกจากแผ่นซิลิคอน ซึ่งสามารถกระทำได้อยู่ 2 วิธี คือ

- การกัดแบบเปียก โดยใช้สารเคมี
- การกัดแบบแห้ง โดยใช้แก๊สที่มีไอออนของสารเคมี

3.1.4 กระบวนการโด๊ป (Doping)

กระบวนการโด๊ปสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่

3.1.4.1 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

กระบวนการในการแพร่สาร หมายถึง กระบวนการที่สารชนิดหนึ่งที่มีความหนาแน่นสูง ถูกนำไปใส่ไว้ในสารอีกชนิดหนึ่งที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า สารที่มีความหนาแน่นสูงจะแพร่กระจายออกไป ตัวอย่างเช่นการหยดหมึกลงในน้ำ โดยการแพร่สารเจือในของแข็งนั้นเป็นไปได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และมีกลไกการแพร่ของสารเจือเป็น 2 แบบ คือ การเข้าไปแทนที่อะตอม และการเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างอะตอม

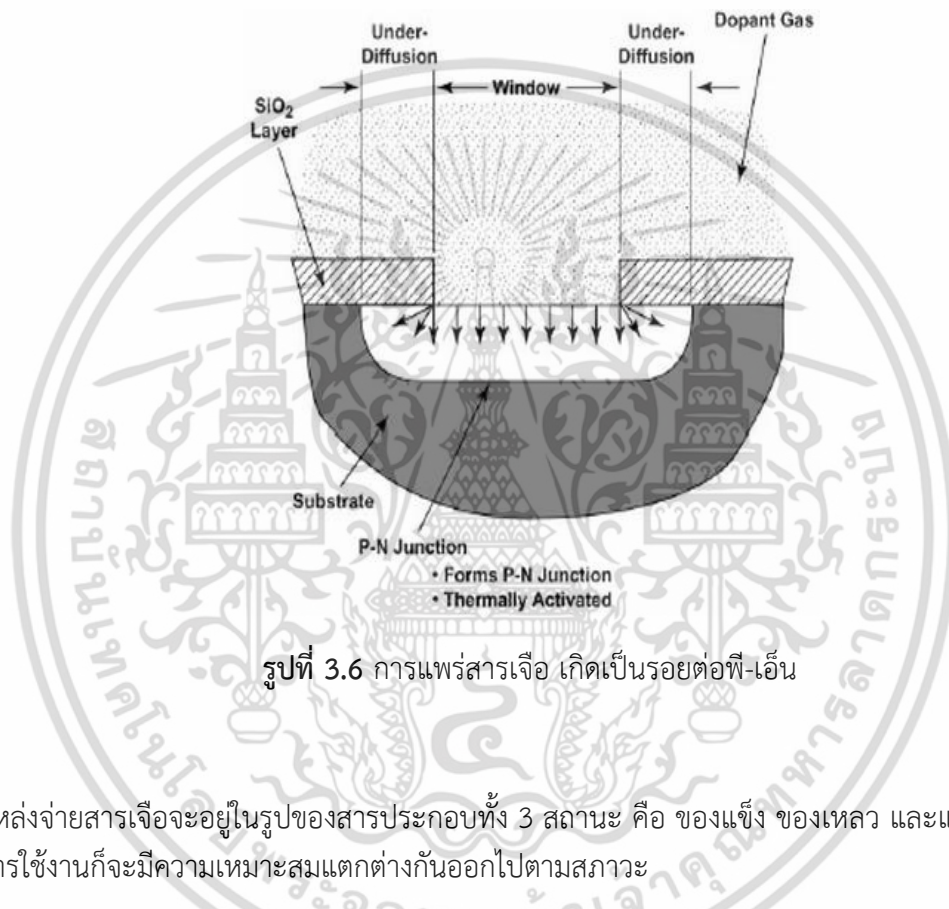
- การแพร่แบบเข้าไปแทนที่

วาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิคอนหรือเยอรมาเนียมมี 4 ตัวและการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอม ทำกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalence Bond) และเกาะกันเป็นโครงผลึก (Lattice) เมื่อให้พลังงานสูงขึ้นคู่พันธะจะแตกออกอะตอมของสารเจือจะเข้าไปแทนที่ ลักษณะการแทนที่เช่นนี้ อะตอมของสารเจือจะต้องมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของอะตอมที่จะถูกแทนที่ซึ่งเป็นกรณีเดียวกับการแพร่ของโบรอน ฟอสฟอรัส อาเซนิก ในซิลิคอนหรือเยอรมาเนียม เมื่อมีการแทนที่แล้ว ถ้าหากอะตอมของสารเจือได้รับพลังงานมากพอก็อาจจะหลุดไปและมีการแทนที่ในใหม่ที่ใหม่ได้เช่นกัน

- การแพร่แบบเข้าไปแทรกตัว

โดยการแพร่แบบนี้จะเกิดขึ้นกับสารเจือที่มีขนาดอะตอมใหญ่กว่าอะตอมของสารกึ่งตัวนำเอกสารนี้มาก เช่น การแพร่ของทองคำในซิลิคอน เป็นต้น กระจกเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในกระบวนการของการแพร่สารเจือจะต้องประกอบด้วย การ Deposition การ Drive-In และการ Activation จะเห็นว่าแผ่นเวเฟอร์จะถูกเคลือบด้วยสารเจือทั่วทั้งแผ่น มีการเปิดช่องเพื่อให้สารเจือเข้าไปได้โดยผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการกัดแล้ว เรียกขั้นตอนนี้ว่าการ Deposition จากนั้นแผ่นเวเฟอร์จะถูกทำให้ร้อนเพื่อให้อะตอมของสารเจือได้แทรกตัวเข้าไปในโมเลกุลของซิลิคอนหรือเยอรมาเนียมในแผ่นเวเฟอร์ เรียกขั้นตอนนี้ว่าการ Drive-In หลังจากนั้นอะตอมของซิลิคอนหรือเยอรมาเนียมจะถูกแทรกด้วยอะตอมของสารเจือทำให้เกิดอะตอมผู้ให้ (Donor) หรืออะตอมผู้รับ (Acceptor) ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ เรียกขั้นตอนนี้ว่า Activation

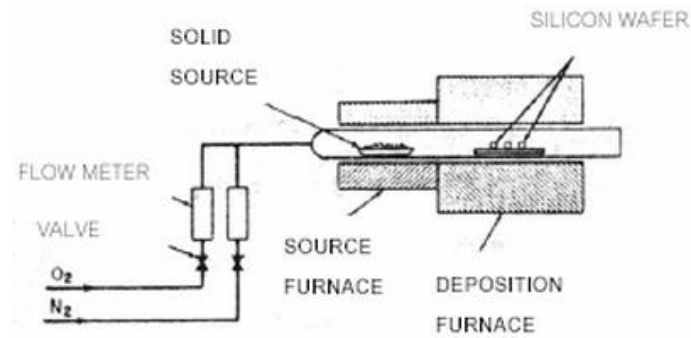


รูปที่ 3.6 การแพร่สารเจือ เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็น

แหล่งจ่ายสารเจือจะอยู่ในรูปของสารประกอบทั้ง 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส รูปแบบการใช้งานก็จะมีเหมาะสมแตกต่างกันออกไปตามสภาวะ

- การแพร่สารเจือเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในลักษณะของแข็ง แหล่งจ่ายสารเจือที่เป็นของแข็ง จะเป็นสารประกอบของโบรอน ฟอสฟอรัสและอาเซนิก ซึ่งเตาแพร่สารมักจะเป็นแบบ Two-Zone Diffusion Furnace ดังรูปที่ 3.7

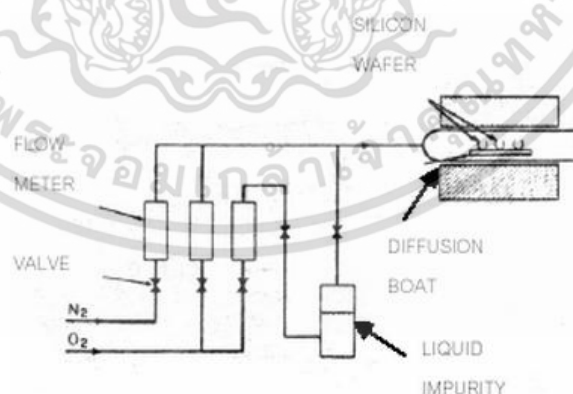
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 เตาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นของแข็ง (Solid Source)

จากรูปที่ 3.7 เตาแพร่สารเจือจะแบ่งออกเป็น 2 ตอน ตอนหลังซึ่งมีแหล่งจ่ายสารเจืออยู่จะมีอุณหภูมิ ต่ำ ประมาณ $200-400^{\circ}\text{C}$ แต่ส่วนตอนหน้าซึ่งเป็นตำแหน่งวางเวเฟอร์จะมีอุณหภูมิประมาณ $800-1,250^{\circ}\text{C}$ แก๊สพาหะจะใช้ทั้งออกซิเจนและไนโตรเจน

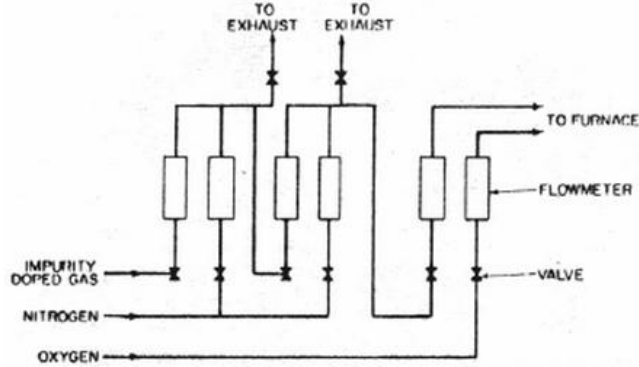
- การแพร่สารเจือเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในลักษณะของเหลว โดยทั่วไปแหล่งจ่ายสารเจือจะเป็น Phosphorus Oxychloride (POCl_3) และ Boron tribomide (BBr_3) ซึ่งมีกระบวนการคล้ายกับการทำ Wet Oxidation คือ ผ่านแก๊สเฉื่อยลงไปบนสารละลาย จากนั้นไอของ BBr_3 หรือ POCl_3 ก็จะผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์ ซึ่งมีแผ่นเวเฟอร์อยู่ดังรูปที่ 3.8 ในทางปฏิบัติสามารถควบคุมความหนาแน่นในการแพร่สารเจือได้โดยการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งตัวแปรอื่น ๆ เช่น เวลา อัตราการไหลของแก๊ส ปริมาณออกซิเจน มักจะถูกจำกัดให้มีค่าคงที่เอาไว้ ข้อดีของการแพร่สารเจือแบบนี้คือสามารถแพร่สารเจือให้มีความหนาแน่นได้สูง ประมาณ 10^{22} Atom/cm^3 แต่มีข้อเสีย คือ การแพร่ให้มีความหนาแน่นของสารเจือสูงๆ อาจเกิดความเสียหายของผิวหน้า เนื่องจากโบรมีน และคลอรีนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาได้



รูปที่ 3.8 เตาเผาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นของเหลว (Liquid Source)

- การแพร่สารเจือเมื่อแหล่งจ่ายอยู่ในลักษณะแก๊ส โดยจะใช้สารประกอบของโบรอน ฟอสฟอรัส และอาเซนิก แสดงดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

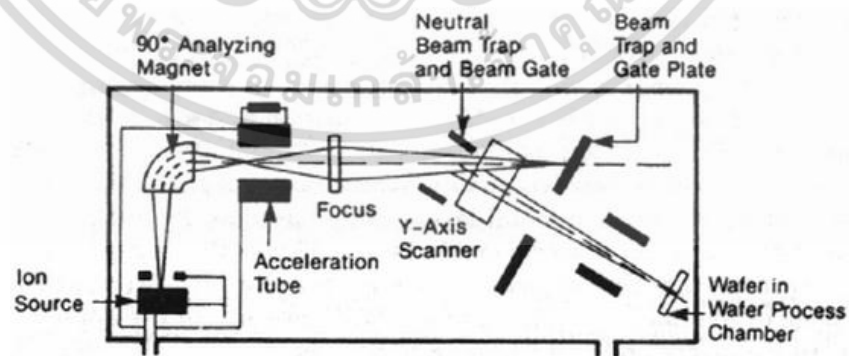


รูปที่ 3.9 เตาแพร่สารเจือที่มีแหล่งจ่ายเป็นแก๊ส (Gas Source)

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

3.1.4.2 การยิงไอออน (Ion-Implantation)

การโคปโดยวิธีการแพร่สารเจือเป็นวิธีที่ใช้ได้ดีกับวงจรรวมที่มีขนาดไม่หนาแน่นมากนัก เช่นวงจรรวมแบบ SSI MSI หรือ LSI แต่ถ้าเป็นวงจรรวมขนาดใหญ่การโคปโดยวิธีการแพร่สารเจือจะทำได้ยาก เนื่องจากการควบคุมขอบเขตของการแพร่สารจะกระทำได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการกระบวนกรโคปโดยใช้วิธีการยิงไอออน เนื่องจากสามารถควบคุมให้มีความเที่ยงตรงแน่นอน ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อ หรือปริมาณอะตอมของสารเจือ เครื่องยิงไอออนแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมการทำงานของ Ion-Implantation

อะตอมของสารเจือจะถูกเลือกโดย Analyze Magnet หลังจากนั้น ก็จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า (Acceleration Tube) ผ่านเลนส์แม่เหล็กเข้าสู่ระบบการสแกน (อาจจะสแกนลำอนุภาคหรือเลือนเอกสารนี้เป็นเอกลักษณ์ที่สวนเวลา หรือการเชิงในเพื่อการวัด) เมื่ออนุภาคเดินทางไปถึงระยะที่ต้องการ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นเวเฟอร์ก็ได้) เพื่อให้ตกกระทบสู่แผ่นเวเฟอร์ปกติแล้วจะใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) หนาๆ หรือสารไวแสง (Photoresist) หนาๆ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ในส่วนที่ไม่ต้องการ ความลึกของอนุภาคสารเจือที่จะเข้าไปสู่แผ่นซิลิคอน สามารถที่จะกำหนดได้โดยการปรับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เร่งอนุภาคสารเจือ

3.1.5 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization)

เมื่อผ่านกระบวนการมาถึงขั้นตอนนี้จะได้ชิ้นส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์วงจรรวมบนแผ่นเวเฟอร์ แต่ส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์เหล่านั้นยังไม่มีส่วนใดที่ต่อเชื่อมถึงกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์เหล่านั้นเข้าด้วยกันตามโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้เพื่อที่จะให้ได้วงจรรวมที่ทำงานตามหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ การเชื่อมต่อส่วนต่างๆ ดังกล่าวเข้าด้วยกันจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization) เพื่อสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic Contact) โดยใช้ตัวนำไฟฟ้าที่ทำให้รอยสัมผัสที่ค่าความต้านทานต่ำทำให้ส่วนต่างๆ เชื่อมต่อกันได้อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 3.2 จุดหลอมเหลว (Melting Points) และสภาพความต้านทาน (Resistivities)

โลหะ	จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	สภาพความต้านทาน ($\mu\Omega\text{-cm}$)
Al	660	2.7
Cr	1878	12
Mo	2615	5.7
Ti	1670	41.2
W	3417	5.6

ขั้นตอนของกระบวนการเมทัลไลเซชัน เริ่มจากการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon Nitride) ที่มีความหนาปกคลุมผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ เรียกส่วนนี้ว่า Top Nitride เพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนบนผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ ป้องกันความชื้น ฝุ่นละออง และรอยขีดข่วนที่อาจเกิดขึ้นกับชั้นของสารกึ่งตัวนำในขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้โฟโตมาร์ค และกระบวนการกัดเพื่อเปิดช่องสำหรับนำโลหะมาสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกต่อส่วนต่างๆ ของวงจรรวมบนแผ่นเวเฟอร์ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกโดยใช้โลหะ เช่น อลูมิเนียมมาสร้างเป็นชั้นปกคลุมผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ จากนั้นก็จะใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี พร้อมด้วยโฟโตมาร์ค และกระบวนการกัดเพื่อเอาส่วนของตัวนำในส่วนที่ไม่ต้องการออกไป

3.1.6 กระบวนการซินเตอร์ริง

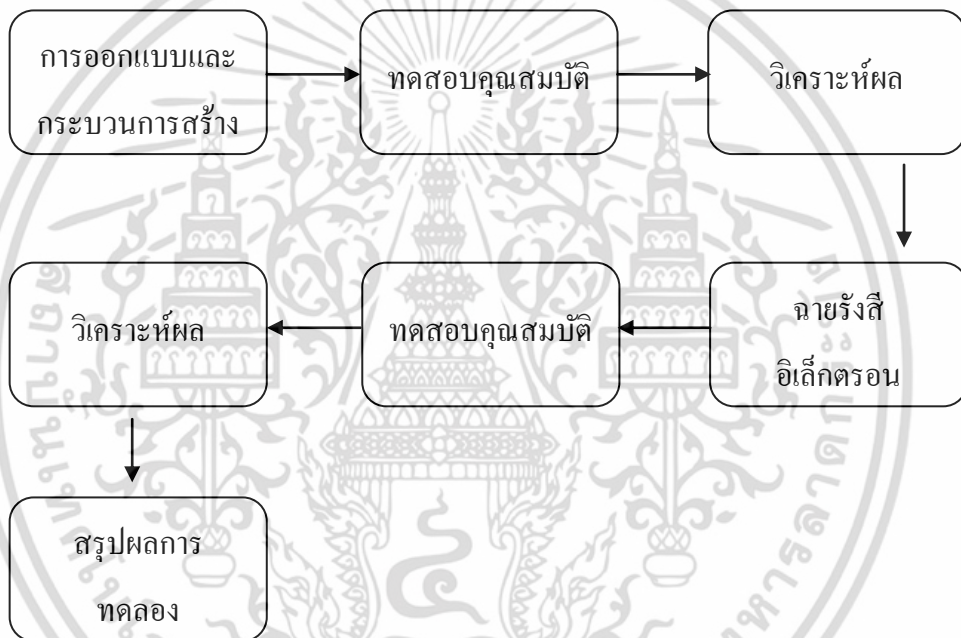
หลังจากทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียม และทำการโฟโตลิโธกราฟีแล้วอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นแถบตัวนำ และก่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มมิกแต่รอยสัมผัสนี้อาจจะไม่สมบูรณ์เพียงพอ ดังนั้นกระบวนการอัลลอยจะช่วยให้อรอยต่อสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียม และซิลิคอนเป็นรอยต่อที่สมบูรณ์ การอัลลอยจะทำในเตาแพร่สาร อุณหภูมิตั้งแต่ $450\text{-}550^{\circ}\text{C}$ ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยใช้เวลาประมาณ 10-30 นาที ถ้าในขณะที่อัลลอยปล่อยแก๊สซึ่งมีไฮโดรเจนรวมอยู่เข้าไปด้วย เรียกว่า การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซินเตอร์ริง เพื่อช่วยให้คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติที่ดี และไม่เปลี่ยนแปลงง่ายต่อสภาพแวดล้อม

3.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

การสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN เพื่อการศึกษาคุณลักษณะไฟตรงทั้งก่อนและหลังจากการได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน เช่น แรงดันตกคร่อมไปข้างหน้า (V_F), ค่าความต้านทานอนุกรม (R_S), ค่าอุดมคติ (Ideality Factor), และค่ากระแสรั่วไหล (I_{leak}) จากรูปที่ 3.11 แสดงแผนภาพไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานตั้งแต่กระบวนการสร้างไปจนถึงกระบวนการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง

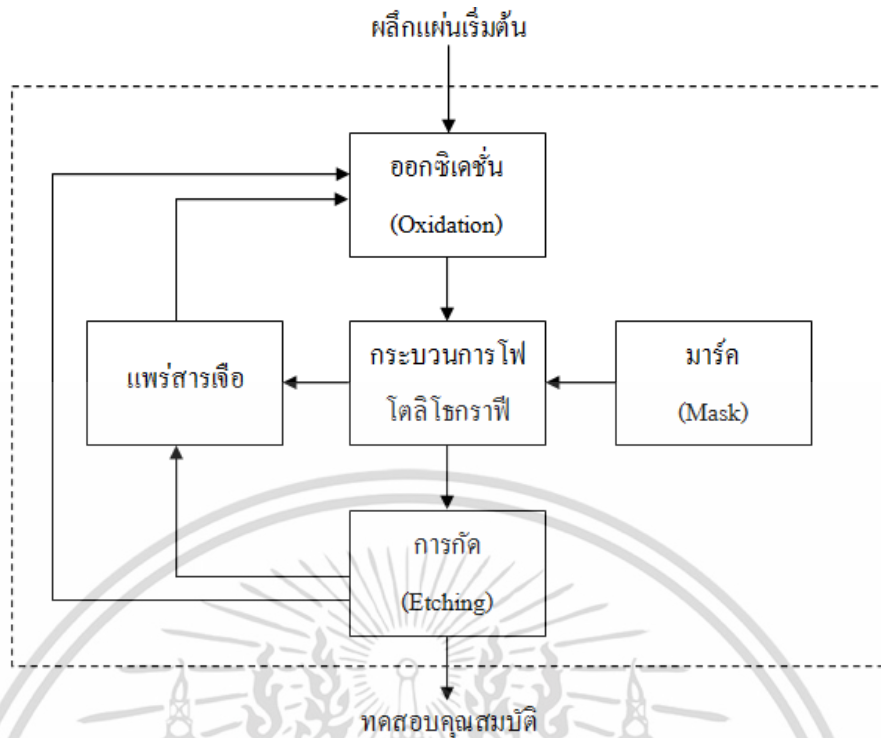


รูปที่ 3.11 แผนภาพไดอะแกรมของการทำงาน

3.2.1 กระบวนการสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

กระบวนการสร้างจะประกอบไปด้วยกระบวนการพื้นฐาน 5 กระบวนการ คือ ออกซิเดชัน กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี การแพร่สารเจือ และการกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน

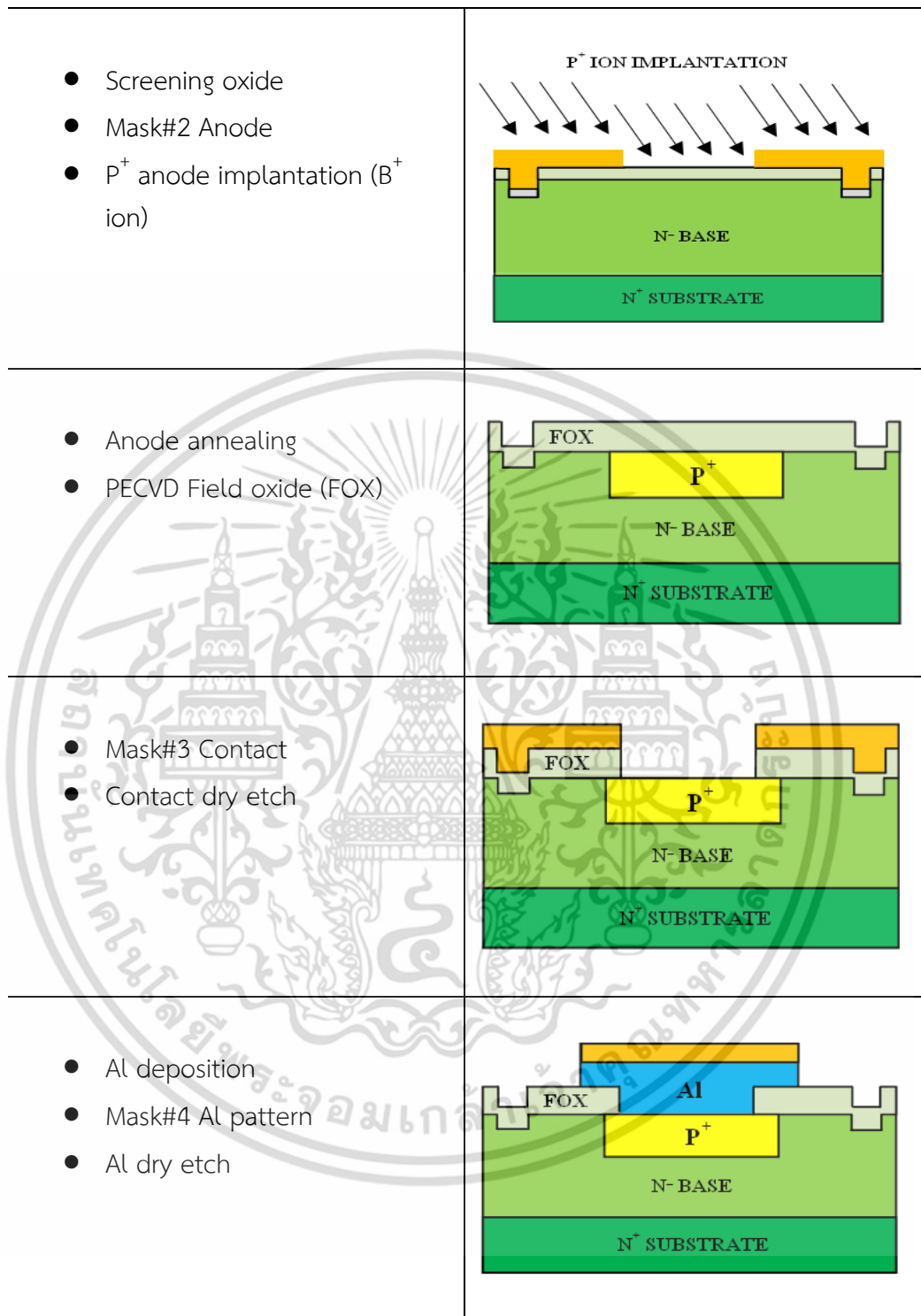
เริ่มจากแผ่นผลึกเริ่มต้นชนิด FZ-NTD (Neutron Transmutation Doping) N⁻/N⁺Epi, หนา 111 มีสภาพต้านทาน 60 Ω.cm หนา 60 μm, ชั้น N⁺ หนา 240 μm มีความหนาแน่นอะตอม 1.0x10²⁰ cm⁻³ ยิ่งประจุโบรอน (Implantation B⁺ ion) ที่พลังงาน 60 keV, ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ 1.0x10¹³ cm⁻² สำหรับสร้างรอยต่อ p⁺n เสร็จแล้วสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมให้กับไดโอดกำลังชนิด PiN จากนั้นไดโอดจะถูกนำไปฉายรังสีอิเล็กตรอนด้วยเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง (E-beam) ของศูนย์ฉายรังสีอัญมณีแห่งใหม่ (อาคาร E-beam) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนการสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

<ul style="list-style-type: none"> • Mask#1 Alignment • Si dry etch 	
---	--

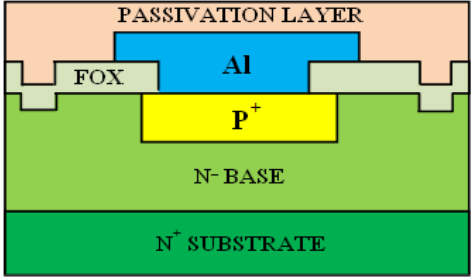
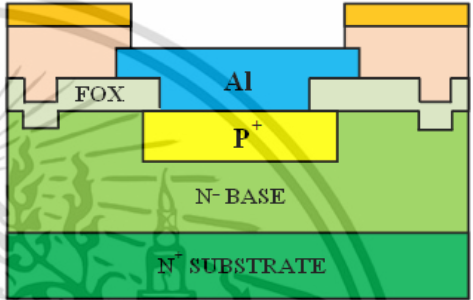
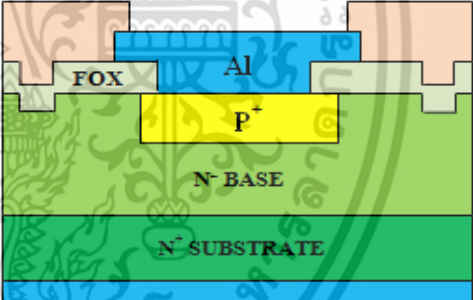
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

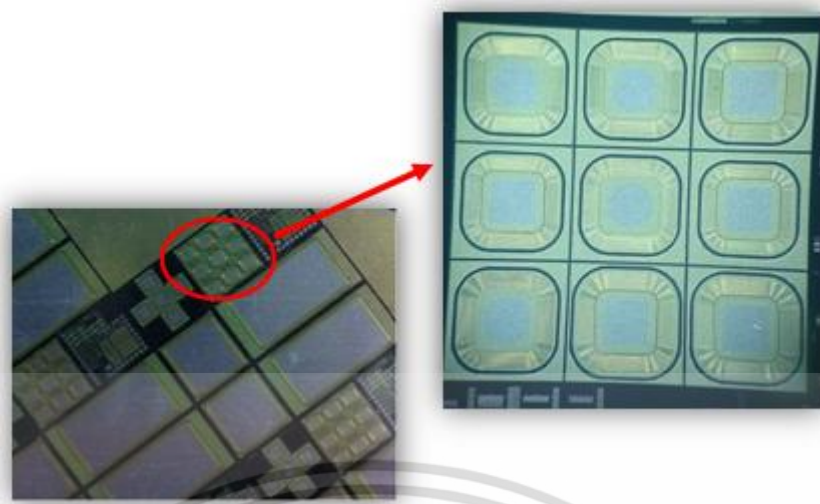


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

<ul style="list-style-type: none"> • Passivation layer 	
<ul style="list-style-type: none"> • Mask#5 Passivation • Oxide dry etch 	
<ul style="list-style-type: none"> • Back-side dry etch • Al back side • Sinter 	

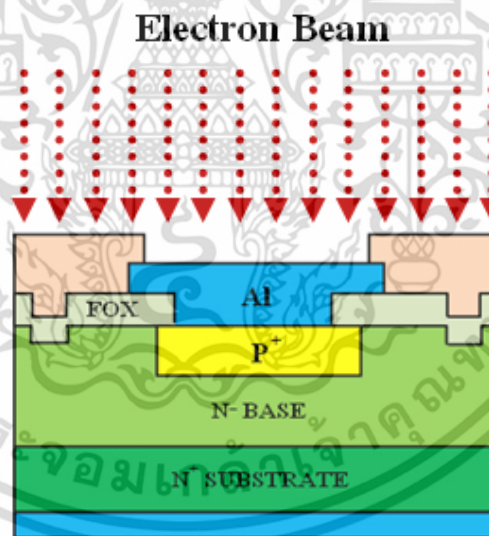
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ผ่านกระบวนการสร้างเสร็จแล้ว

3.3 ขั้นตอนกระบวนการฉายรังสี

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN แล้วโดยยังไม่ได้ทำการแพ็คเกจ (Packaging) จากนั้นนำมาฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์พลังงานสูง (E-beam) ของศูนย์วิจัยรังสีอณูมณีแห่งใหม่ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ



รูปที่ 3.14 ลักษณะการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ลงบนตัวอุปกรณ์

การฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์กระทำที่พลังงาน 12 MeV, ที่ปริมาณรังสี 3 เรือไนซ์ ได้แก่ 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ โดยเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์พลังงานสูงจะทำงานร่วมกับเครื่องจักรต่างๆ รวมเป็นระบบการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ ทำการขับเคลื่อนภาคบรรจุชิ้นงานทดลองด้วยระบบแรงดันสูงผ่านกระบอกสูบควบคุมทิศทางด้วยวาล์วไฟฟ้า ซึ่งจะมีการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบด้วยสวิตช์ไฟฟ้า และมีอุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณต่างๆ และระดับความแรงของรังสีในจุดต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดถูกควบคุมผ่าน PLC หรือ Programmable Logic ซึ่งจะมีการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานทั้งหมดไว้แล้วผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์สั่งการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ลักษณะของระบบขับเคลื่อนภาตบรรจุชิ้นงาน



รูปที่ 3.16 ห้องควบคุมระบบการฉายรังสีด้วยโปรแกรมสั่งการอัตโนมัติ

สำหรับชิ้นงานทดลองที่ไม่เคยนำมาฉายรังสีมาก่อน จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำมาทำการ Dose mapping เพื่อหาตำแหน่งที่ได้รับปริมาณรังสีสูงสุด (Maximum Dose) และตำแหน่งที่ได้รับปริมาณรังสีต่ำสุด (Minimum Dose) ของชิ้นงานทดลองนั้นๆ ก่อน

3.3.1 การทำ profile และหาค่าความสม่ำเสมอของลำอิเล็กตรอน

การทำ Dose mapping ใช้เครื่องวัดปริมาณรังสีแบบแผ่นฟิล์ม การตอบสนองของแผ่นฟิล์มเซลลูโลสไตรอะซีเตต (Cellulose Triacetate) ต่อรังสีอิเล็กตรอนได้ในช่วงปริมาณ <math><1.0</math> to 150 kGy โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) รุ่น Genesys 20 หลังจากการฉายรังสีแผ่นฟิล์มจะมีการตอบสนองต่อรังสีอิเล็กตรอน โดยสีของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนจากสีชมพูเข้มเป็นสีชมพูอ่อน และการตอบสนองของแผ่นฟิล์มต่อปริมาณรังสีอิเล็กตรอน จะมีความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Genesys 20



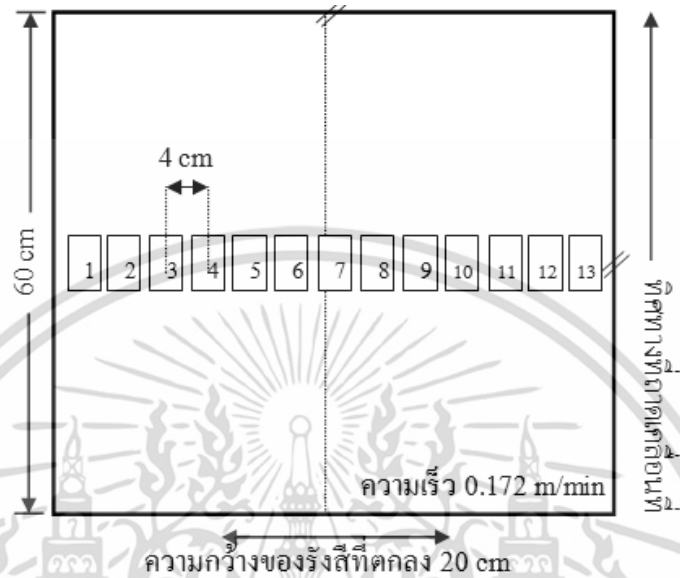
รูปที่ 3.18 แผ่นฟิล์มสำหรับวัดปริมาณรังสี พร้อมแถบบาร์โค้ดเพื่อบันทึกข้อมูล



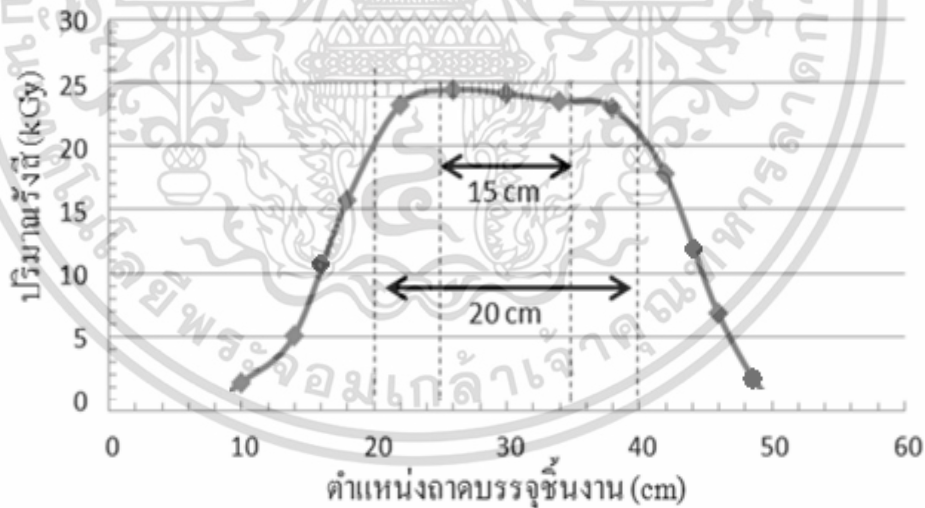
รูปที่ 3.19 เครื่องอบแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการวัดปริมาณรังสีแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการทำ Dose mapping เพื่อหาตำแหน่งที่ได้รับปริมาณรังสีสูงสุด, ตำแหน่งที่ได้รับปริมาณรังสีต่ำสุด, ลักษณะ Profile, และความสม่ำเสมอของปริมาณรังสีในภาคบรรจุชิ้นงาน โดยการนำแผ่นฟิล์มวัดปริมาณรังสีจำนวน 13 ชั้น ติดลงในบริเวณกึ่งกลางของภาคบรรจุชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.20 แสดงปิกัดการวางแผ่นฟิล์มวัดปริมาณรังสี และลักษณะมิติของภาคบรรจุชิ้นงาน



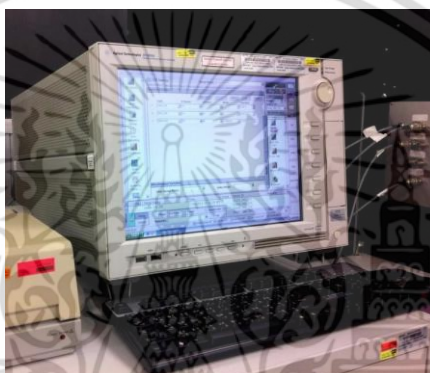
รูปที่ 3.21 ลักษณะ Profile ปริมาณรังสีในภาคบรรจุชิ้นงาน หลังฉายพลังงาน 12 MeV, 25 kGy

เมื่อทราบถึงลักษณะ Profile ของปริมาณรังสีแล้ว ซึ่งพบว่าบริเวณที่มีความสม่ำเสมอของรังสีอยู่ในช่วงประมาณ 15 เซนติเมตร ตรงกลางของภาคบรรจุชิ้นงาน ดังนั้นในการทดลองจะใช้บริเวณดังกล่าวสำหรับการวางชิ้นงานอุปกรณ์ที่จะทำการฉายรังสีอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า

การศึกษานี้ได้ทำการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ขณะได้รับแรงดันไบอัสตั้งแต่ช่วง -10 ถึง 2 V (ที่กระแสทดสอบ 10 A/cm²) ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิการวัด 27, 57, 87, 117 และ 147 °C ตามลำดับ โดยความถี่ที่ใช้ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าอยู่ที่ 100 kHz ซึ่งได้ทำการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ในเรื่องของ กระแส-แรงดันไฟฟ้า และความจุ-แรงดันไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A, หัววัดใช้ Cascade Microtech Model M โดยมี ERS Aircool SP72-300 thermo chuck เป็นตัวควบคุมและปรับเปลี่ยนอุณหภูมิฐานรอง ซึ่งผลการทดลองและการอภิปรายจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 3.22 เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A



รูปที่ 3.23 Cascade Microtech Model M 150



รูปที่ 3.24 TVR 6000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

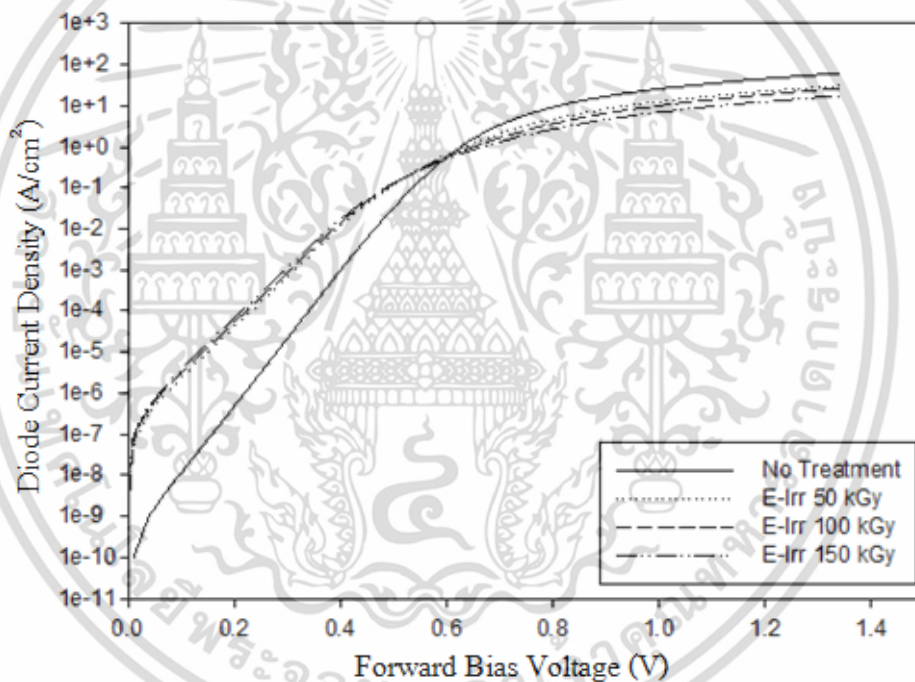
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลของคุณลักษณะทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์ความถดถอยของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN หลังผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอน โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน

4.1 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสไปข้างหน้า

จากการศึกษาผลของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN เมื่อได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนในด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ คุณลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า และความจุ-แรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้



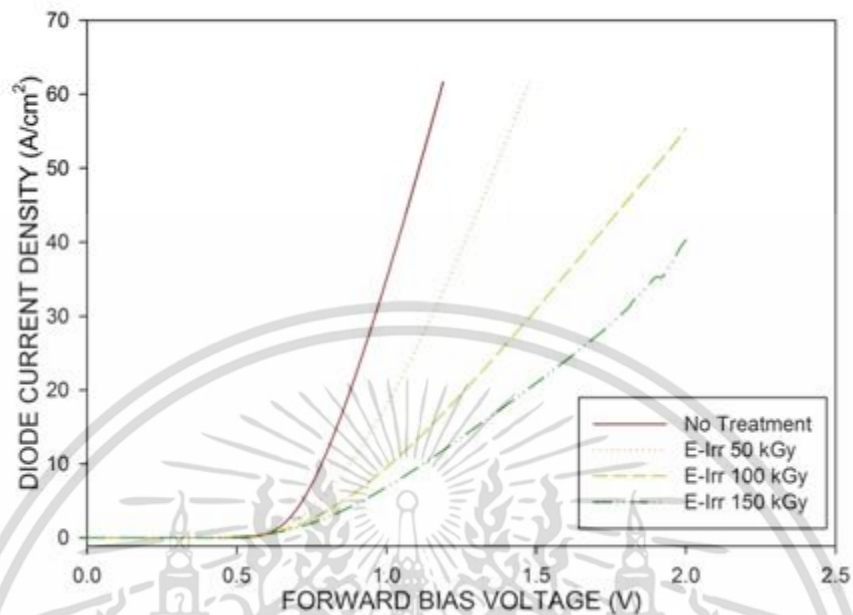
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 4.1 เห็นได้ชัดว่า การนำกระแสในย่านไบอัสไปข้างหน้า ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอน จะมีการนำกระแสในช่วงแรงดันต่ำได้ดี แต่จะลดลงตามปริมาณของการฉายรังสีที่แรงดันสูง โดยความหนาแน่นกระแสไปข้างหน้าที่เพิ่มขึ้นเกิดจากกระบวนการรวมตัวภายในบริเวณปลอดพาหะ ที่ความกว้าง W_D ดังสมการ

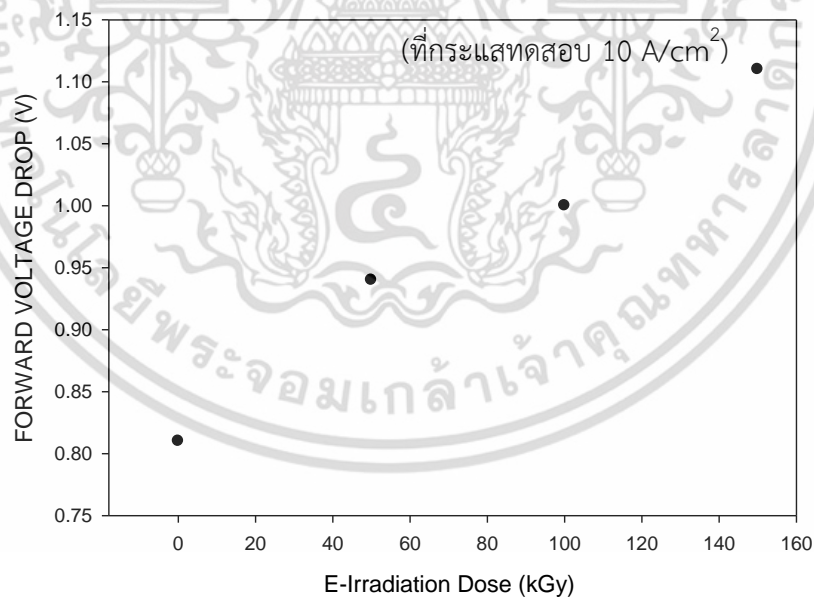
$$J_{FR} = qUW_D = \frac{qn_iW_D}{\tau_{sc}} e^{qV_a/2kT} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ n_i คือ ความเข้มข้นของพาหะอินทรินสิค
 τ_{sc} คือ อายุพาหะการเกิดภายในบริเวณปลอดพาหะ



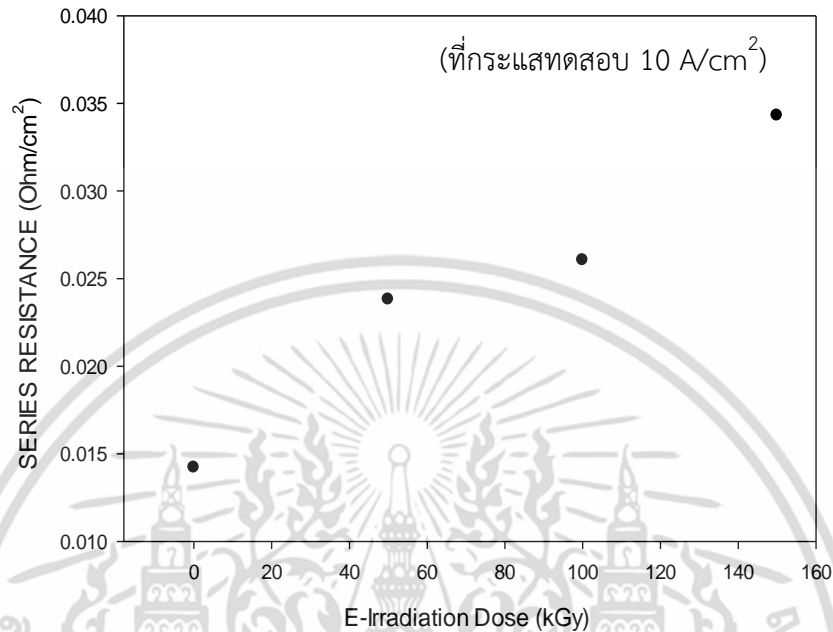
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

จากกราฟรูปที่ 4.2 และ 4.3 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ เห็นได้ชัดเจนว่ามีการเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าตามปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าความต้านทานของฐานรองเพิ่มขึ้นนั่นเอง [3] โดยสามารถอธิบายได้จาก ผลของการฉายรังสีที่สร้างจุดบกพร่องในเนื้อซิลิคอนก่อให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางรวมตัว ซึ่งศูนย์กลางนี้เป็นต้นเหตุให้อายุพาหะลดและทำให้ประสิทธิภาพการสวิตช์ดีขึ้น แรงดันตกคร่อมจึงเพิ่มขึ้นถึง ที่บริเวณนอกเขตปลอดพาหะเมื่อมีการไหลของกระแสสูง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

จากกราฟรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่า เมื่อนำซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ไปฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของการฉายรังสี โดยไดโอดที่ไม่ได้รับการฉายรังสี มีค่าความต้านทานอนุกรมเท่ากับ $5.53439 \Omega/\text{cm}^2$ และไดโอดที่ได้รับการฉายรังสีมีค่าเท่ากับ 11.25360865 , 22.47374 , และ $32.05395 \Omega/\text{cm}^2$ ที่ปริมาณ 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ

จากสมการของช็อกเคิลีย์ (Shockley' Equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไบอัสของรอยต่อพี-เอ็น ดังนี้

$$I = I_0 \cdot (e^{qV_A/KT} - 1) \quad (4.2)$$

โดยที่

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

โดยที่

- q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
- V_A คือ แรงดันไบอัสที่ป้อนให้
- k คือ ค่าคงที่ของโบสท์มันส์
- T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.2) ในกรณีที่ $V_A > \frac{kT}{q}$ เช่น ที่อุณหภูมิห้อง $T=300$ K, จะได้ว่า $\frac{kT}{q} = 0.0259$ V ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (4.2) อาจประมาณเป็น

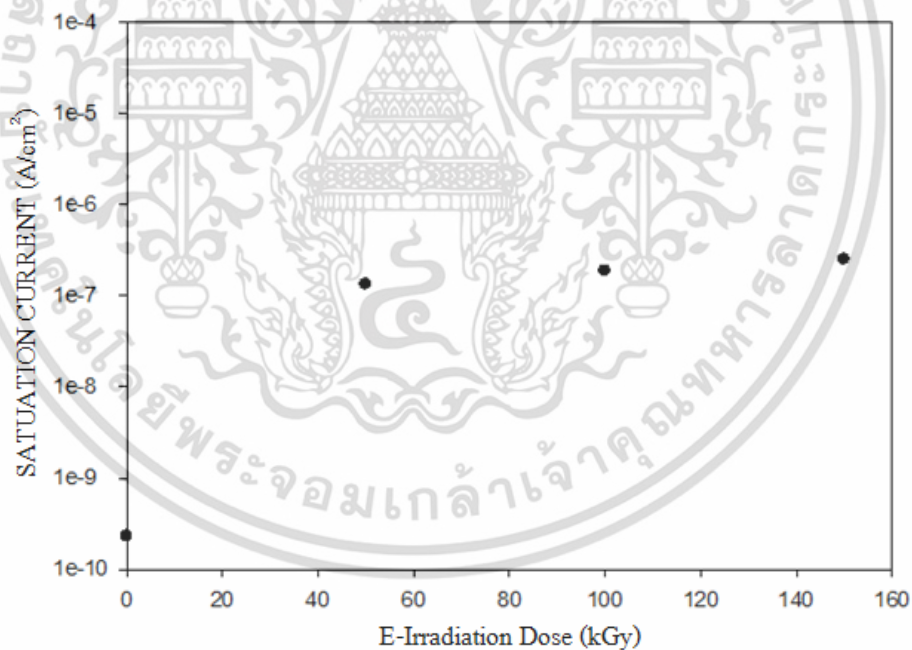
$$I \approx I_0 \cdot e^{qV_A/kT} \quad (4.4)$$

และ

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

จากสมการที่ (4.5) เห็นได้ว่าหาก $V_A > 0$ บนกราฟกึ่งล็อก (Semi-log) ระหว่าง $\ln(I)$ กับ V_A จะปรากฏในย่านที่เป็นช่วงเชิงเส้น โดยเส้นตรงจะตัดแกนกระแสที่ I_0 ซึ่งพบว่าค่ากระแสอิ่มตัวของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 2.45×10^{-10} A/cm² และที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 8.793×10^{-8} A/cm², 1.84×10^{-7} A/cm², และ 2.37×10^{-7} A/cm² ตามปริมาณการฉายรังสีที่ 50, 100 และ 150 kGy ตามลำดับ

โดยแสดงให้เห็นได้ชัดจากกราฟรูปที่ 4.5 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิ่มตัวและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิ่มตัวและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 4.4 พบว่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกระแสในช่วงที่มีการฉีดพาหะที่ระดับต่ำ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสมการกระแสอิ่มตัวของรอยต่อพีเอ็น [6]

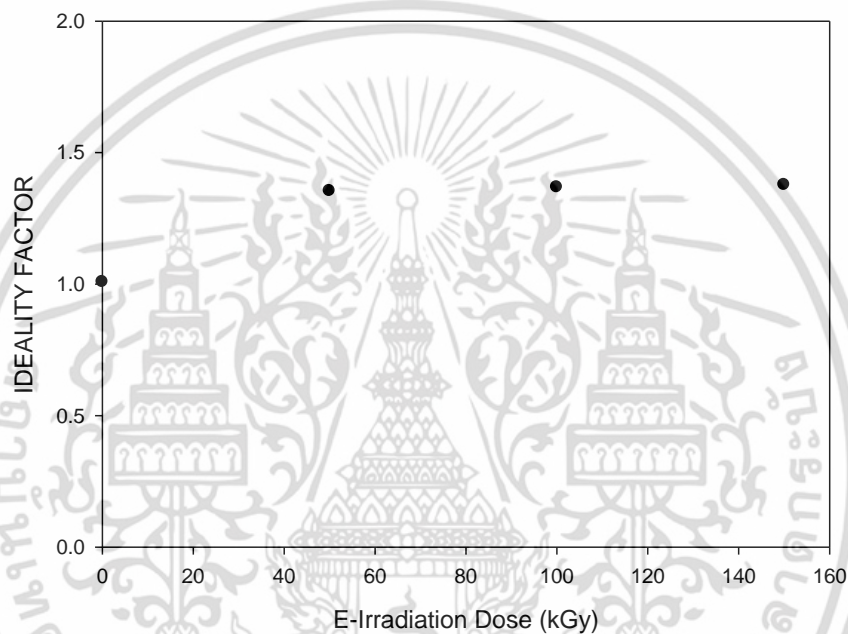
$$J_0 = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_p คือ ระยะการแพร่ของโพลซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอายุพาหะ

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

เมื่อเทอมหลังของอิเล็กทรอนิกส์มีค่าน้อยมาก ดังนั้นกระแสอิ่มตัวจึงมีค่าลดลงเมื่อมีการฉายรังสีเพื่อลดอายุพาหะ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ideality factor และปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

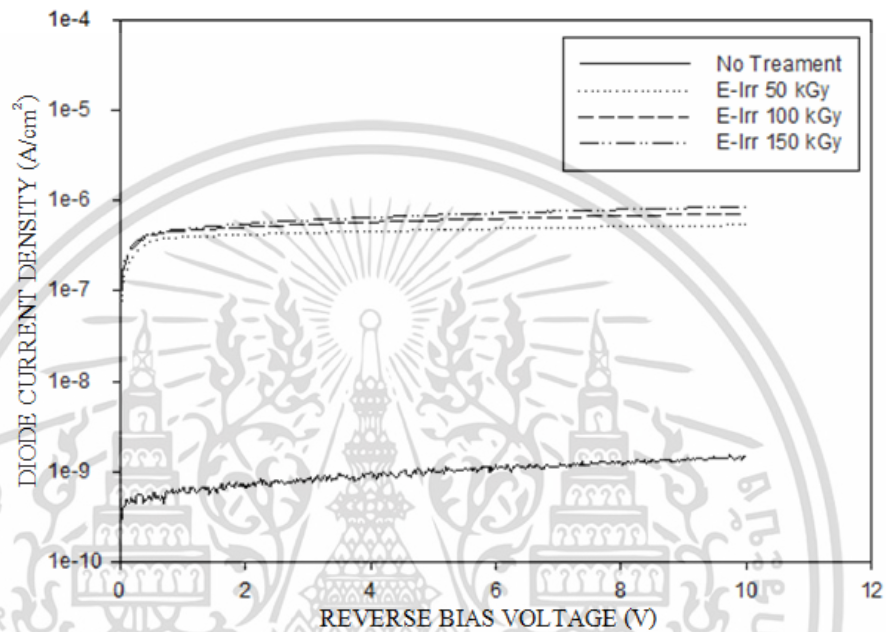
ค่าอุดมคติ (Ideality factor) เป็นค่าที่บอกความใกล้เคียงการนำกระแสของไดโอดอุดมคติ จากรูปที่ 4.6 ไดโอดที่ไม่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ คำนวณหาค่าอุดมคติได้ประมาณ 1 หมายถึงมีลักษณะใกล้เคียงกับไดโอดอุดมคติมาก และค่าอุดมคติมีการเพิ่มขึ้นในไดโอดที่ผ่านการฉายรังสี นั่นหมายถึงมีกระแสที่เกิดจากกระแสการรวมตัวผ่านจุดบกพร่องมากขึ้นจนทำให้ค่าอุดมคติเพิ่มขึ้น

4.2 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

สำหรับการทดสอบย่านไบอัสแรงดันย้อนกลับ พบว่าไดโอดที่ผ่านฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์มีการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลย้อนกลับอย่างชัดเจน ดังกราฟรูปที่ 4.7 โดยเพิ่มขึ้นจากไดโอดที่ไม่ฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ถึงเกือบ 1000 เท่า ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดลองย่านไบอัสแรงดันไปข้างหน้า ที่ได้กระแสอิ่มตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าที่ได้ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน

ตัวแปร	No-Treatment (A/cm ²)	E-Irradiation 50 kGy (A/cm ²)	E-Irradiation 100 kGy (A/cm ²)	E-Irradiation 150 kGy (A/cm ²)
ค่ากระแส อิ่มตัว	2.45×10^{-10}	8.79×10^{-8}	1.84×10^{-7}	2.37×10^{-7}



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน

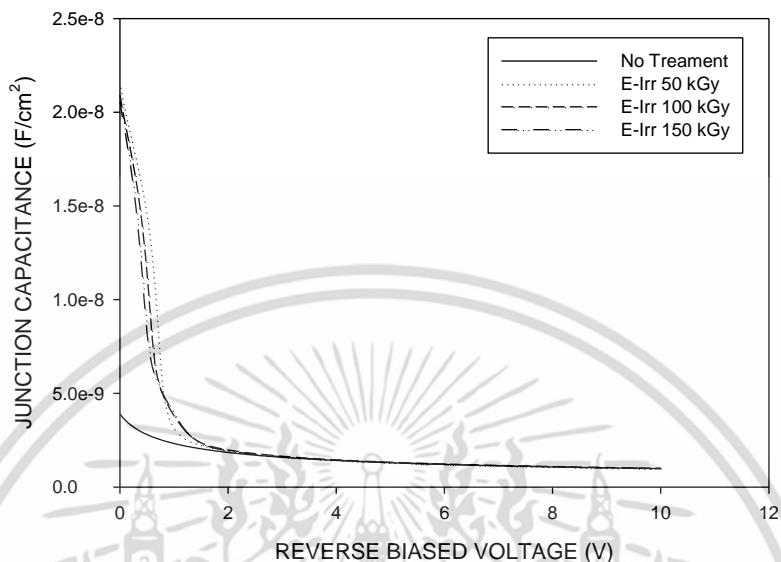
ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรต่างๆ ของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

คุณลักษณะทางไฟฟ้า	No-Treatment	E-Irradiation 50 kGy	E-Irradiation 100 kGy	E-Irradiation 150 kGy
แรงดันไปข้างหน้า (Volt)	0.77	0.86	1.00	1.11
ความต้านทานอนุกรม $\Omega\text{-cm}^2$	5.53439	11.25360865	22.47374	32.05395
ค่าอุดมคติ	1.01	1.33	1.36	1.37

4.3 คุณลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า

ค่าความจุไฟฟ้าของไดโอด แบบรอยต่อพี-เอ็น นั้นสามารถบอกให้ทราบถึงความลาดชันของสารเจือของรอยต่อได้ สามารถหาค่าแรงดันภายในรอยต่อได้ (V_{bi}) และความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ (N_b) ได้ เห็นได้จากกราฟรูปที่ 4.8 ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ไม่ได้รับการฉายรังสีพบว่า มีค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ำกว่าซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ได้รับการฉายรังสี แสดงให้เห็นถึงการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอุปกรณ์ ดังจะเห็นได้จากกราฟไดโอดที่ฉายรังสีผิดเพี้ยนไปจากไดโอดที่ไม่ได้ฉายรังสี



รูปที่ 4.8 คุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

จากความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_A^2$ กับ แรงดันไบอัสย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 4.9 จุดตัดแกน x สามารถหาค่าแรงดันภายในของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ได้เท่ากับ 0.56 V และซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ได้เท่ากับ 0.24, 0.19, และ 0.16 V ที่ปริมาณการฉายรังสี 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าค่าแรงดันภายในมีค่าลดลงเมื่อได้รับการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

หรือสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right] \quad (4.8)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของโบสท์ทันทส์

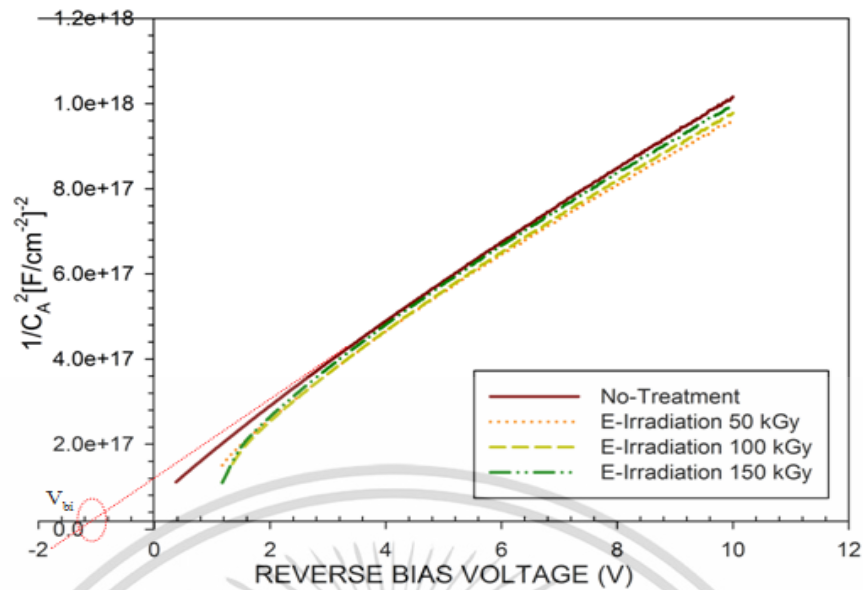
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

N_A คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ

N_D คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้

n_i คือ ค่าความหนาแน่นอินทรินสิค

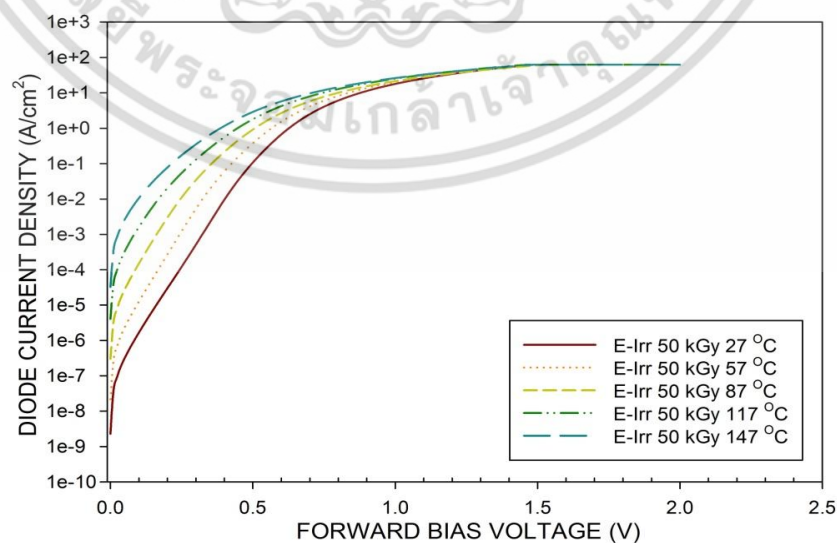


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_A^2$ กับ แรงดันไบอัสย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

ส่วนค่าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.25 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ส่วนที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.25 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, $1.24 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, และ $1.22 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ที่ปริมาณการฉายรังสี 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าค่าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือนั้นไม่ส่งผลเปลี่ยนแปลงต่อการฉายรังสี

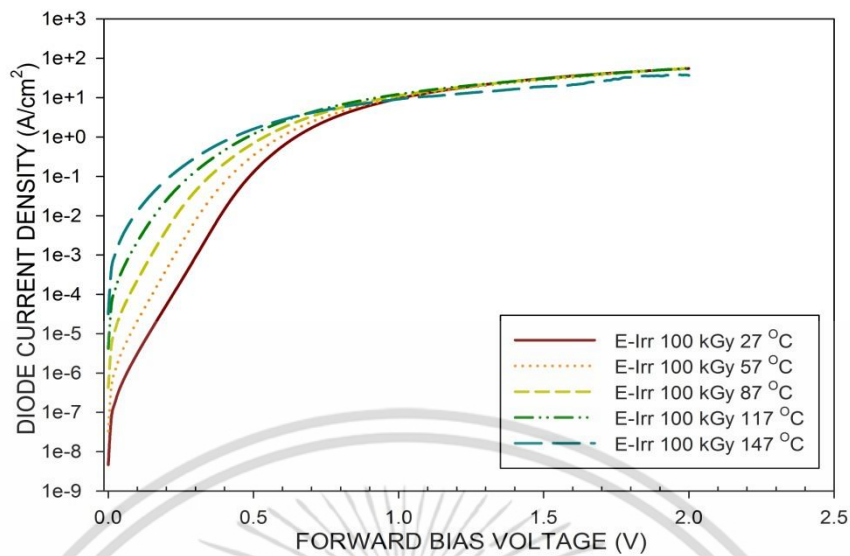
ค่าระยะเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_r) ที่วัดได้จากเครื่อง TVR 6000 พบว่าซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ไม่ได้ทำการฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1,673 ns หลังผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าลดลงเท่ากับ 81, 58, และ 46 ns ที่ปริมาณการฉายรังสี 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ

4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้า

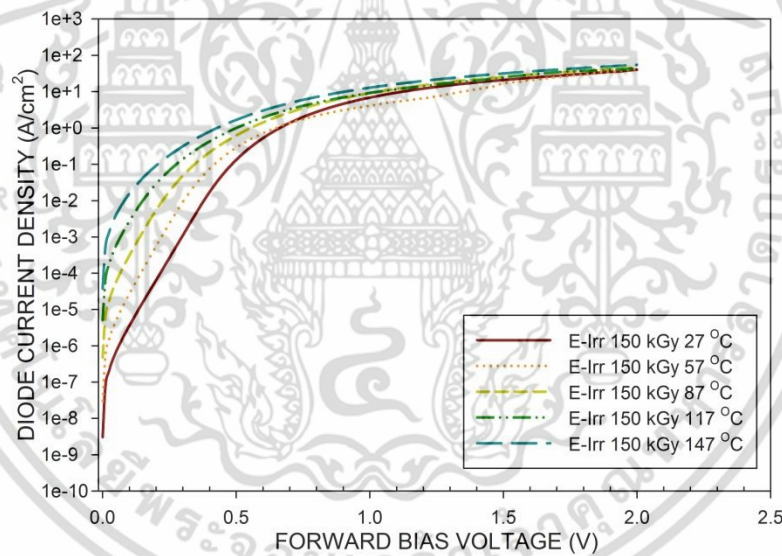


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอด ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณการฉายรังสี 50 kGy

เอกสารนี้เป็นเอกสารรังสี 50 kGy ทรัพยากรการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอด ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณรังสี 100 kGy



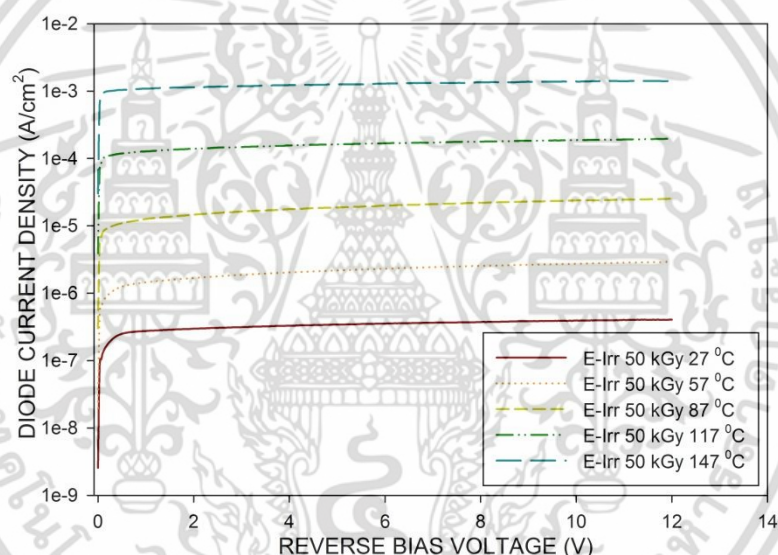
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอด ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณรังสี 150 kGy

จากกราฟรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอด ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณรังสี 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการนำกระแสในช่วงแรงดันต่ำจะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ และส่งผลทำให้แรงดันตกคร่อมไปข้างหน้ามีค่าลดลง (ที่กระแสทดสอบ 10 A/cm^2) และเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิเดียวกันพบว่าแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้ามีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3

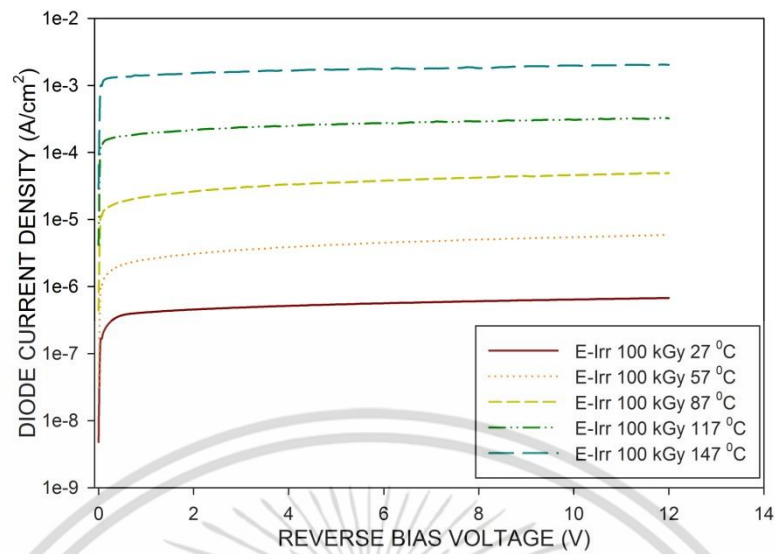
ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้าของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

แรงดันตกคร่อมไป ข้างหน้า (V) ที่ปริมาณรังสี (kGy)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)				
	27	57	87	117	147
50	0.86	0.82	0.78	0.73	0.69
100	1.00	0.99	0.95	0.91	0.90
150	1.11	1.33	1.02	1.02	0.89

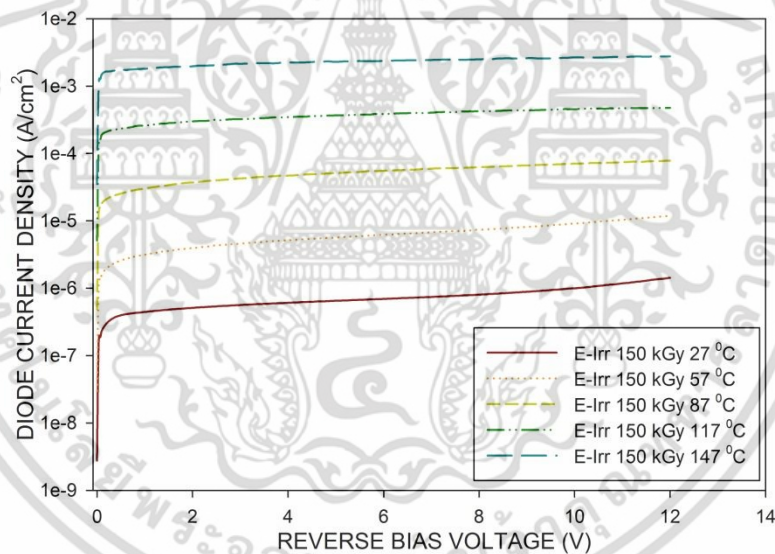
การใช้งานไดโอดยังมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้งานอีกด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรั่วไหลของกระแสย้อนกลับ โดยเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่แต่ละปริมาณรังสี ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.15



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่ ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณการฉายรังสี 50 kGy



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่ ๓ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณการฉายรังสี 100 kGy



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่ ๓ อุณหภูมิต่างๆ ที่ปริมาณการฉายรังสี 150 kGy

จากกราฟรูปที่ 4.13 ถึง 4.14 พบว่าที่ปริมาณรังสีเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นส่งผลทำให้กระแสรั่วไหลย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

กระแสรั่วไหล ย้อนกลับ (A/cm^2) ที่ปริมาณรังสี (kGy)	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)				
	27	57	87	117	147
50	8.79E-08	1.32E-06	5.21E-05	8.45E-04	5.84E-03
100	1.84E-07	2.86E-06	1.13E-04	1.62E-03	9.78E-03
150	2.37E-07	4.82E-06	1.82E-04	2.37E-03	1.19E-02



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

อุปกรณ์สวิตชิงความเร็วสูงในปัจจุบันมีความต้องการ การทำงานของไดโอดความเร็วสูง และต้องการลดกำลังสูญเสียขณะการเปลี่ยนสถานะจากช่วงนำกระแส (on-state) ไปเป็นช่วงหยุดนำกระแส (off-state) ซึ่งวิธีการที่จะทำให้อุปกรณ์นั้นมีความเร็วในการสวิตชิงสูงสามารถทำได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับกระบวนการของการฉายรังสีอิเล็กตรอน ซึ่งมีขั้นตอนและกระบวนการที่ง่ายต่อการปรับปรุงคุณภาพของไดโอด

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการปรับค่าอายุพหุส่วนน้อยของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN โดยการสร้างจุดบกพร่องภายในโครงสร้างผลึก เพื่อทำให้เกิดระดับพลังงานระดับลึก ด้วยกระบวนการฉายรังสีอิเล็กตรอน จุดบกพร่องเหล่านี้มีคุณสมบัติทำให้เกิดระดับลึกในแถบพลังงาน โดยแถบพลังงานจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จึงเป็นเหตุผลให้ค่าอายุการเกิด และค่าอายุการรวมตัวใหม่ของพาหะมีการเปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะต่างๆ ทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอผลของคุณลักษณะทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ได้รับการฉายรังสี และที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอน โดยได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวแปรสำคัญของไดโอด ได้แก่ คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสไปข้างหน้า เห็นได้ชัดว่า การนำกระแสในย่านไบอัสไปข้างหน้า ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอน จะมีการนำกระแสในช่วงแรงดันต่ำได้ดี แต่จะลดลงตามปริมาณของการฉายรังสีที่แรงดันสูง โดยความหนาแน่นกระแสไปข้างหน้าที่เพิ่มขึ้นเกิดจากกระบวนการรวมตัวภายในบริเวณปลอดพาหะ และผลของแรงดันตกคร่อมไปข้างหน้า (V_F) ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 0.86, 1.00, และ 1.11 V ที่ปริมาณรังสี 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความต้านทานของฐานรองเพิ่มขึ้น โดยสามารถอธิบายได้จาก ผลของการฉายรังสีที่สร้างจุดบกพร่องในเนื้อซิลิคอน ส่งผลให้ค่าความต้านทานอนุกรมนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 11.25360865, 22.47374, และ 32.05395 $\Omega\text{-cm}^2$ ที่ปริมาณ 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ ซึ่งค่าอุดมคติ หรือ Ideality factor จะเป็นค่าที่บ่งชี้ได้ถึงความใกล้เคียงการนำกระแสของไดโอดอุดมคติ โดยมีค่าเท่ากับ 1.33, 1.36, และ 1.37 ที่ปริมาณรังสี 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ เห็นได้ว่ามีค่าต่างจากซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ไม่ได้รับการฉายรังสีซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.01 ซึ่งค่าอุดมคติที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้จากการที่กระแสการรวมตัวผ่านจุดบกพร่องมากขึ้นนั่นเอง ในเรื่องของคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ พบว่ากระแสการรวมตัวมากขึ้น ส่งผลให้การสวิตชิงเร็วขึ้น โดยค่าระยะเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (t_{rr}) ที่วัดได้มีค่าลดลงจากที่ไม่ได้ฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1673 ns ภายหลังการฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 81, 51, และ 46 ns ที่ปริมาณรังสี 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ และมีการใช้กำลังงานที่น้อยลง มีเสถียรภาพกับอุณหภูมิ ส่วนคุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อและแรงดันย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN พบว่าซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ไม่ได้รับการฉายรังสี มีค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ำกว่าซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ได้รับการฉายรังสี แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอุปกรณ์ ดังจะเห็นได้จากกราฟไดโอดที่ฉายรังสีผิดเพี้ยนไปจากไดโอดที่ไม่ได้ฉายรังสีที่เดิกล่าไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อนำมาหาค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) พบว่าค่าแรงดันภายในที่ได้มีค่าลดลงจากที่ไม่ได้ฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 0.56 V ภายหลังจากฉายรังสีอิเล็กตรอนพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.24, 0.19, และ 0.16 V ที่ปริมาณการฉายรังสี 50, 100, และ 150 kGy ตามลำดับ สุดท้ายผลของอนุมูลที่มีต่อคุณลักษณะกระแสและแรงดันไปข้างหน้า และแรงดันย้อนกลับนั้น พบว่าซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนนั้นมีความเสถียรต่ออนุมูล เห็นได้ว่าการลดค่าอายุพหุของไดโอดเพื่อให้ไดโอดมีประสิทธิภาพในการสวิตช์ที่ดี กินกำลังงานที่น้อย ด้วยวิธีการฉายรังสีอิเล็กตรอนนั้น สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ได้เป็นอย่างดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] C.Codreanu, "FREE CARRIER LIFETIME REDUCTION IN SILICON BY ELECTRON-BEAM IRRADIATION", International Semiconductor Conference, 2000. CAS 2000, Proceedings. vol.1, p. 255-258
- [3] C.Codreanu, "Silicon diode electrical characteristics under electron-beam irradiation conditions - experiments and theoretical interpretation" International Semiconductor Conference, 2001. CAS 200 Proceedings. vol.2, p.481-484
- [4] D.K.Schroder, "Carrier lifetimes in silicon", **IEEE Trans. Electron Devices**, ED-44, p.160, 1997.
- [5] 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.
- [6] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd ed. New York: Wiley, 1981.
- [7] B. Jayant Baliga, "Fundamentals of Power Semiconductor Devices", Power Semiconductor Research Center North Carolina State University: New York, 2008.
- [8] สมเกียรติ ศุภเดช. **ซีมิกคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [9] J. W. Corbett, G. D. Watkins, "Production of divacancies and vacancies by electron irradiation of silicon," Phys. Rev., vol. 138, page. A555-A560, Apr. 19, 1965
- [10] R. O. Carlson, Y. S. Sun, and H. B. Assalit, "Lifetime control in silicon power devices by electron or gamma irradiation," **IEEE Trans. Electron Devices**, vol. ED-24, page. 1103-1108, 1977
- [11] สรณ ผ่องอำไพ, จิรวัดน์ ปราบเขต, วิวัฒน์ อธิธิกุลสมาลย์, ภาสภณ มโนสุกฤตกุล, อัมพร โพธิ์ไย และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, "ผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนต่อคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN" **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON 35)**, หน้า 759-762
- [12] S.K. Ghandi, Semiconductor Power Devices, Wiley, New York, 1977
- [13] B. J. Baliga and H. Sun, "Comparison of gold, platinum, and electron irradiation for controlling lifetime in power rectifiers," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-24, pp. 685-688, 1977.
- [14] R. O. Carlson, Y. S. Sun, and H. B. Assalit, "Lifetime control in silicon power devices by electron or gamma irradiation," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-24, pp. 1103-1108, 1977.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] A. O. Ewwaraye and B. J. Baliga, "Identification of the dominant recombination centers in electron-irradiated semiconductor devices," presented at the Fall Meeting of the Electrochemical Society, Las Vegas, NV, Oct. 1976 (submitted to J. Electrochem. SOC.)
- [16] C. Claeys, E. Simoen, Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices, Springer, Berlin, 2002.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35
The 35th Electrical Engineering Conference

BANGKOK UNIVERSITY
THE CHULALONGKORN UNIVERSITY

50th
CREATIVITY

NECTEC
a member of NSTDA

สถาบันส่งเสริม
และพัฒนาระดับสูง
ด้านวิศวกรรม
และเทคโนโลยี
พระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

สนับสนุนโดย

EGCO ABB genetron IRICT NATIONAL INSTRUMENTS TECHSOURCE
true online ETOA COGNEX ELVE ROLAND & SCHWARZ YOGAMA PTS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กตรอนต่อคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN

Effect of Electron Irradiation on DC Characteristics of Silicon PiN Power Diode

ศรณ พ่องอำไพ¹, จิรวัดน์ ปราบเขต¹, วิวัฒน์ อธิธิกุลสุมาลัย¹, ภาสภณ มโนสุกฤตกุล³, อัมพร โพธิ์ไชย² และ วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10520

²ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สวทช.

51/4 หมู่ที่ 1 ถ. สุวินทวงศ์ ต. วังตะเคียน อ. เมือง จังหัดฉะเชิงเทรา 24000 โทรศัพท์: 038-857-100-9 E-mail: amporn.poyai@nectec.or.th

³สาขาวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

17/1 ต.ชุมโค อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160

บทคัดย่อ

การฉายรังสีอิเล็กตรอนเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของไดโอดกำลัง ให้คุณสมบัติการสวิตช์เร็วขึ้นและกินกำลังที่น้อยลง ซึ่งอาศัยหลักการสร้างจุดบกพร่องในเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติไฟตรงของไดโอด การศึกษานี้จึงทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ผ่านการฉายรังสีกับซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี พบว่าแรงดันตกคร่อมเพิ่มขึ้น จากที่ไม่ฉายรังสี 0.81 V และที่ฉายรังสีปริมาณ 50, 100 และ 150 kGy เป็น 0.94, 1 และ 1.1 V (ที่กระแสทดสอบ 10A/cm²) ตามลำดับ และกระแสรั่วไหลย้อนกลับเพิ่มขึ้นถึงเกือบ 1000 เท่าของไดโอดที่ไม่ได้ฉายรังสี ถือเป็น การลดอายุของไดโอดที่มีความสำคัญต่อการพิจารณาการฉายรังสีอิเล็กตรอนเพื่อควบคุมอายุพาทะ

คำสำคัญ: การฉายรังสีอิเล็กตรอน, ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PiN, การควบคุมอายุพาทะ

Abstract

Electron irradiation is a technology which can improve power diodes performance; fast switching and low power consumption. Irradiation will create defects in silicon bulk which effect to DC characteristics of power diodes. This paper reports the experiment results of electron irradiation on silicon PiN power diodes characteristics and compares these results with reference silicon PiN power diode. It shows that forward bias voltage is increased from 0.81 V become 0.94, 1 and 1.1 V (testing current=10A/cm²) at radiation dose 50, 100 and 150 kGy, respectively. And leakage current is increased about 1000 times of untreated diodes. So these regressions are important to consider about electron irradiation.

Keywords: Electron irradiation, silicon PiN diodes, carrier lifetime controlling

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกอิเล็กทรอนิกส์ทุกวันนี้ มีความทันสมัยและพัฒนาก้าวหน้าไปมาก อาทิ เทคโนโลยีในการขนส่งมวลชนหรือรถไฟฟ้าความเร็วสูง ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สามารถรองรับเทคโนโลยีเหล่านี้ได้ โดยพื้นฐานหลักอุปกรณ์เหล่านี้ต้องมีความเร็วในการทำงานหรือมีความเร็วในการสวิตช์ที่สูง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีวิธีการควบคุมอายุพาทะส่วนน้อย (Minority carrier lifetime) ที่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง (Power semiconductor device) รวมไปถึงซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN อีกด้วย เนื่องจากสามารถช่วยลดช่วงเวลาที่ฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse recovery time) และการสูญเสียพลังงาน (Energy loss) ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง ระหว่างอยู่ในสภาวะนำกระแส (On-state) และสภาวะหยุดนำกระแส (off-state) ได้ [1-2] ซึ่งการฉายรังสีอิเล็กตรอนก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับนิยมนำมาใช้ควบคุมอายุพาทะส่วนน้อย โดยผลของการฉายรังสีจะทำให้เกิดจุดบกพร่องภายในอุปกรณ์ ซึ่งเป็นศูนย์กลางการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาทะส่วนน้อย โดยจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของกระแสทำให้แรงดันตกคร่อมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN มีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน และมีความต้องการของตลาดมากขึ้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีต่อคุณสมบัติไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN ที่มีผลต่อ แรงดันตกคร่อมไปข้างหน้า (V_F) ค่าความต้านทานอนุกรม (R_S) ค่าอุดมคติ (Ideality factor) กระแสอิ่มตัว (I_0) และกระแสรั่วไหล (I_{leak}) รวมถึงการเปรียบเทียบผลจากค่าต่างๆ ที่ได้กับซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN ที่ไม่ได้รับการฉายรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

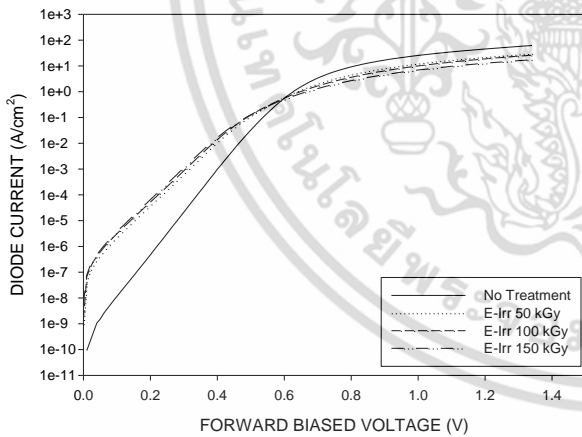
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35) 12-14 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

2. การทดลอง

การสร้างซิลิคอนไดโอด เพื่อการศึกษาคุณลักษณะไฟตรง เริ่มจากแผ่นผลึกเริ่มต้นชนิด NTD (Neutron Transmutation Doping) N-Epi (111), มีสภาพความต้านทาน 60 Ω.cm หนา 300 μm ,ชั้น N+ มีความหนาแน่นอะตอม $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ยิ่งประจุโบรอน พลังงาน 60 keV, ความหนาแน่น $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ สำหรับสร้างรอยต่อ p+n เสร็จแล้วสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมให้กับไดโอด จากนั้นไดโอดจะถูกนำไปฉายรังสีอิเล็กตรอนด้วยเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง (E-beam) ของศูนย์ฉายรังสีอัญมณีแห่งใหม่ (อาคาร E-beam) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า หลังจากการเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างไดโอดทุกตัวได้รับการทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติไดโอดเบื้องต้น จากนั้นนำไดโอดที่เสร็จสิ้นกระบวนการสร้างไปฉายรังสีอิเล็กตรอน ที่พลังงาน 12 MeV ปริมาณรังสี 3 เอนไซได้แก่ 50, 100 และ 150 kGy จากนั้นจึงนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับไดโอดชุดเดียวกันที่ไม่ได้ถูกฉายรังสีต่อไป

3. ผลการทดลองและอภิปราย

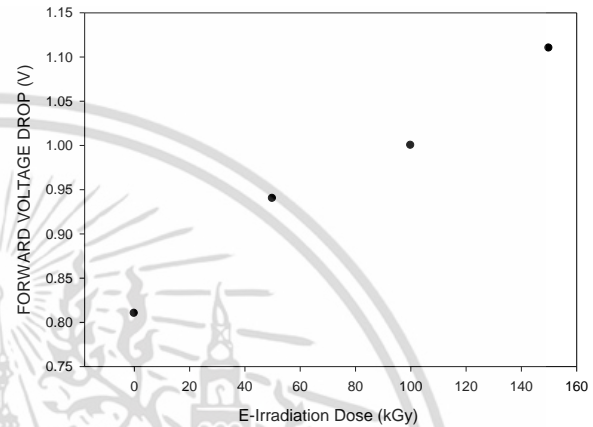
ผลการทดสอบไดโอดกำลังชนิด PiN ที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนเป็นไปตามรูปที่ 1 ถึง 6 ไดโอดทุกตัวหลังผ่านการฉายรังสีสามารถนำกระแสและต้านทานแรงดันย้อนกลับใกล้เคียงไดโอดกำลังชนิดซิลิคอนทั่วไป



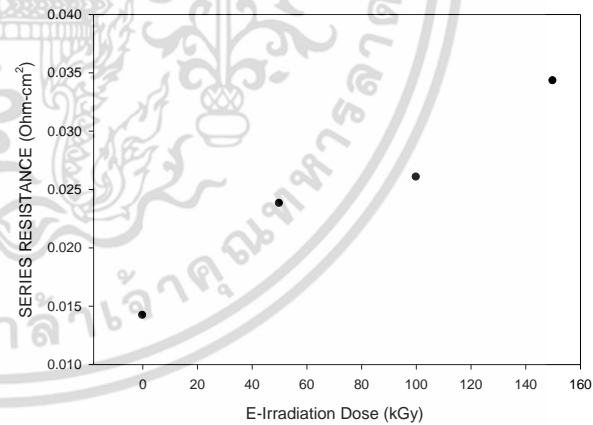
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไปข้างหน้าของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน

การนำกระแสในย่านไบอัสไปข้างหน้า ไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีจะมีการนำกระแสในช่วงแรงดันต่ำได้ดี แต่จะลดลงตามปริมาณของการฉายรังสีที่แรงดันสูง การเพิ่มขึ้นของแรงดันไปข้างหน้าคคร่อมเป็นผลมาจากค่าความต้านทานของฐานรองเพิ่มขึ้น [3] ในรูปที่ 3 เนื่องจาก

ผลของการฉายรังสีที่สร้างจุดบกพร่องในเนื้อซิลิคอนก่อให้เกิดศูนย์กลางรวมตัว ซึ่งศูนย์กลางนี้เป็นสาเหตุให้อายุพาหะลดและทำให้ประสิทธิภาพการสวิตชิ่งดีขึ้น [4-5] แรงดันคคร่อมจึงเพิ่มขึ้นถึงที่บริเวณนอกเขตปลอดพาหะเมื่อมีการไหลของกระแสสูง เห็นได้จากรูปที่ 2 ที่เมื่อมีการฉายที่ปริมาณรังสีมากขึ้น แรงดันคคร่อมก็เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีเกิดจุดบกพร่องมากขึ้น



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคคร่อมไปข้างหน้าและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรมและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 4 พบว่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกระแสในช่วงที่มีการฉีดพาหะที่ระดับต่ำ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสมการกระแสอิ่มตัวของรอยต่อที่อื่น [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

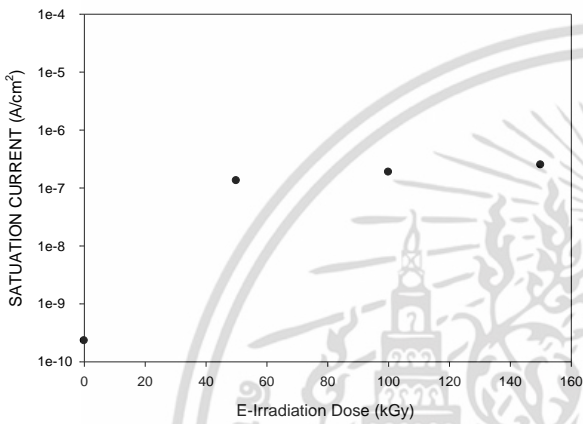
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (ECON-35) 12 - 14 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยกรุงเทพและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

$$J_0 = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} \quad (1)$$

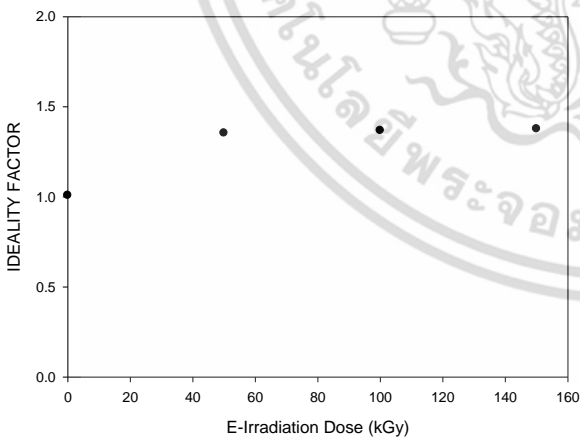
L_p คือ ระยะการแพร่ของโฮลซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอายุพาหะ

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2)$$

เมื่อเทอมหลังของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก ดังนั้นกระแสอิ่มตัวจึงมีค่าลดลงเมื่อมีการฉายรังสีเพื่อลดอายุพาหะ



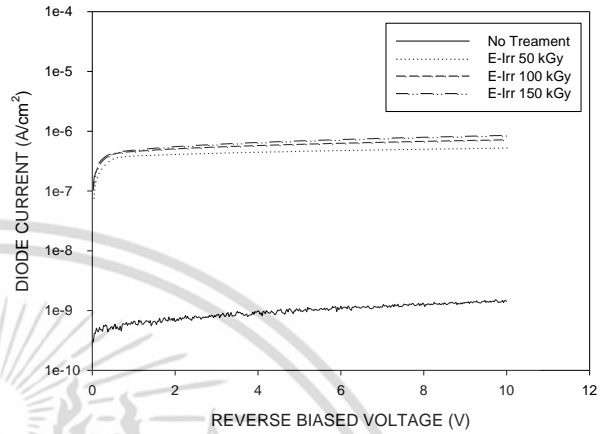
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิ่มตัวย้อนกลับและปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ideality factor และปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน

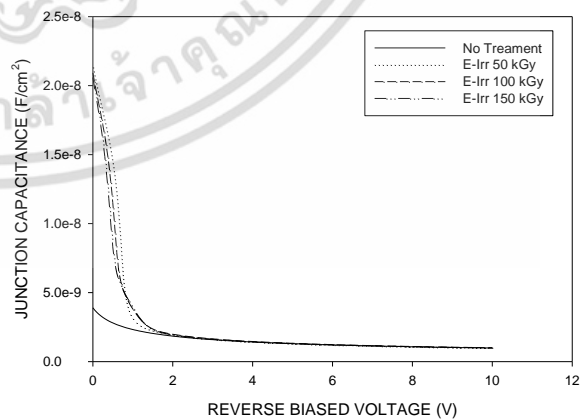
ค่าอุดมคติ (Ideality factor) เป็นค่าที่บอกความใกล้เคียงการนำกระแสของไดโอดอุดมคติ จากรูปที่ 5 ไดโอดที่ไม่ผ่านการฉายรังสีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

คำนวณหาค่าอุดมคติได้ประมาณ 1 หมายถึงมีลักษณะใกล้เคียงกับไดโอดอุดมคติมาก และค่าอุดมคติมีการเพิ่มขึ้นในไดโอดที่ผ่านการฉายรังสี นั้นหมายถึงมีกระแสที่เกิดจากกระแสการรวมตัวผ่านจุดบกพร่องมากขึ้นจนทำให้ค่าอุดมคติเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน

สำหรับการทดสอบย่านไบอัสแรงดันย้อนกลับ พบว่าไดโอดที่ผ่านฉายรังสีอิเล็กตรอนมีการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลย้อนกลับอย่างชัดเจน โดยเพิ่มขึ้นจากไดโอดที่ไม่ฉายรังสีถึงเกือบ 1000 เท่า ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดลองย่านไบอัสแรงดันไปข้างหน้า ที่ได้กระแสอิ่มตัวเพิ่มขึ้น และสุดท้ายคุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้าต่อแรงดันย้อนกลับนั้นให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอุปกรณ์ ดังจะเห็นได้จากกราฟไดโอดที่ฉายรังสีผิดเพี้ยนไปจากไดโอดที่ไม่ได้ฉายรังสี



รูปที่ 7 คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อและแรงดันย้อนกลับของไดโอดที่แต่ละปริมาณการฉายรังสีอิเล็กตรอน

4. สรุป

ซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีต่อคุณสมบัติไฟตรง จากการทดลองพบว่าหลังการฉายรังสีแรงดันไฟข้างหน้าตกคร่อม ค่าความต้านทานอนุกรมกระแสในตัว และกระแสรั่วไหลย้อนกลับค่าทั้งหมดเหล่านี้ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากการสร้างจุดบกพร่องในเนื้อของซิลิคอนเพื่อควบคุมอายุพายุ และจากค่าอุณหภูมิต่ำที่เพิ่มขึ้น แสดงว่ากระแสการรวมตัวเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อและแรงดันย้อนกลับแสดงให้เห็นมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของไดโอดเกิดขึ้นหลังจากการฉายรังสี จึงทำให้สรุปได้ว่าการฉายรังสีส่งผลทำให้อายุของพายุหลอดตามปริมาณการฉายรังสีที่ได้ทำการทดลองไว้ แต่ส่งผลทำให้เกิดการถดถอยของบางส่วนของคุณลักษณะไฟตรง ดังนั้นการฉายรังสีจึงต้องให้ความสำคัญกับคุณภาพที่ถดถอยของไดโอดดังกล่าว และในกรณีใช้พลังงานของอิเล็กตรอนที่ 12 MeV ปริมาณการฉายรังสีควรอยู่ในช่วง 50-100 kGy

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการสนับสนุนด้านเทคโนโลยีการสร้างและทดสอบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ศูนย์ฉายรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือสำหรับการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ และขอขอบคุณ คุณอารีรัตน์ คอนดวงแก้ว ผู้จัดการศูนย์ฉายรังสีอัญมณี รักษาการในตำแหน่ง รองผู้อำนวยการ (บริหาร) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) รวมถึงพนักงาน และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง สำหรับการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.K.Schroder, "Carrier lifetimes in silicon", IEEE Trans. Electron Devices, ED-44, p.160, 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 art and applications", Progress in Quantum Electronics 29 p 59-163, 2005.
- [3] 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
- [4] 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.

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

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายสรน พ่องอำไพ เกิดที่จังหวัดสงขลา จบปริญญาตรีสาขาอิเล็กทรอนิกส์ (2554) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโทสาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ



นายวิวัฒน์ อธิกสุมาลย์ เกิดที่จังหวัดชลบุรี จบปริญญาตรีสาขาอิเล็กทรอนิกส์ (2547) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีประสบการณ์การทำงานสองปีกับบริษัท SONY Device Technology (Thailand) Co., Ltd. สำเร็จศึกษาระดับปริญญาโทสาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ



ดร.วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง จบการศึกษา DOCTOR OF ENGINEERING จาก TOKAI UNIVERSITY ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ระดับ 9 ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย สธน ผ่องอำไพ
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 5 กันยายน 2531 ที่จังหวัดสงขลา
ที่อยู่	211/115 หมู่บ้านนนทรีแกลลอรี ถ.นครินทร์ ต.บางไผ่ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
ประวัติการศึกษา	2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การนำเทคนิคฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์มาปรับปรุงประสิทธิภาพ การทำงานของไดโอด

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] สธน ผ่องอำไพ, จิรวัดน์ ปราบเขต, วิวัฒน์ อธิธิสุขุมาลัย, ภาสภณ มโนสุกฤตกุล, อัมพร โพธิ์ไย และ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง “ผลกระทบของการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ต่อคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35 (EECON 35), หน้า 759-762, ณ รอยัลฮิลล์ กอล์ฟรีสอร์ต แอนด์สปา, นครนายก, 12-14 ธันวาคม, 2555

[2] สธน ผ่องอำไพ, จิรวัดน์ ปราบเขต, วิวัฒน์ อธิธิสุขุมาลัย, ชบา สุริยอัมรานนท์, ภาสภณ มโนสุกฤตกุล, อัมพร โพธิ์ไย และ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง “ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะไฟตรงของซิลิคอนไดโอดกำลังชนิด PIN ที่ได้รับการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5 (EENET 2013), โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า, ประจวบคีรีขันธ์, 27-29 มีนาคม, 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้