



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและรังสีของหัววัดชนิด

ซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง PIN

Electrical and Radiation Characterization Study
of Silicon PIN Diode for Radiation Detector

นายปิยวัฒน์ ยศธนาชน

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561



รายงานสหกิจฉบับสมบูรณ์

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและรังสีของหัววัดชนิด

ซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง PIN

Electrical and Radiation Characterization Study of Silicon PIN Diode for Radiation Detector

นายปิยวัฒน์ ยศธนายอน

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการสหกิจศึกษา การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและรังสีของหัววัดชนิดซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง PIN

ชื่อ-สกุล นักศึกษา ปิยวัฒน์ ยศธนายน

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ผ.ศ.เกรียงไกร สุขสุด และ อ.ชินภัทร นันทจิวารักษ์

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน จีรวัดน์ ปราบเขต

สถานประกอบการ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอผลการศึกษา คุณสมบัติทางไฟฟ้าและรังสีของหัววัดชนิดซิลิคอนไดโอด โครงสร้าง PIN โดยเลือกใช้รูปแบบ p^+-n-n^+ เป็นหลัก ด้านบนชั้น p มีชั้น SiO_2 และ ชั้นสัมผัสซึ่งเป็น อลูมิเนียม เช่นเดียวกับด้านล่าง โดยโครงสร้างที่ใช้นี้ได้นำไปวัดค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ลักษณะหน้าตัด ต่างๆ เพื่อนำข้อมูลไปคำนวณหาค่าประจอบของกระแสและองค์ประกอบของความจุไฟฟ้า ผลที่ได้นั้นพบว่า ความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่นั้น มีปริมาณที่มากกว่าความหนาแน่นกระแสต่อขอบถึง 1,000 เท่า และ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่นั้น มีปริมาณที่มากกว่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อขอบถึง 300 เท่า ซึ่งจาก ผลเช่นนี้เป็นเหตุให้การคำนวณความหนาแน่นของไดโอดโครงสร้างที่จะใช้ในการทดลองนี้ สามารถละส่วน ของความหนาแน่นต่อขอบออกไปได้ สร้างความสะดวกอย่างมากในคำนวณ จากนั้นนำไดโอดที่มีลักษณะ แตกต่างกันสี่ชนิด ได้แก่ ไดโอดสำหรับอ้างอิง , ไดโอดที่มีการให้รังสีอิเล็กตรอนขนาด 50 kGy , ไดโอดที่มี การเจือทองคำขาวที่บริเวณด้าน n และ ไดโอดที่มีการเจือทองคำขาวและได้รับรังสีอิเล็กตรอนขนาด 50 kGy ไปวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า และนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน ซึ่งพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปนั้น คือ ช่วงเวลาการรวมตัว , ช่วงเวลาการก่อเกิด และ ระยะการแพร่ โดยมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงตามการ ได้รับรังสี และ การเจือทองคำขาวจะส่งผลให้ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความไว ต่ออุณหภูมิที่น้อยลง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการออกแบบได้ต่อไป

คำสำคัญ : อุปกรณ์ตรวจวัดรังสี , ไดโอดพิน

Cooperative Title: Electrical and Radiation Characterization Study of Silicon PIN Diode for Radiation Detector

Student intern name: Piyawat Yosthanayon

Faculty: Engineering

Department: Electronic

Advisor name: Asst. Prof. Kriangkrai Sooksood and Chinnapat Nantajiwakornchai

Mentor name: Jirawat Prabket

Company: Thai Microelectronics Center (TMEC)

ABSTRACT

This report presents the results of electrical and radiation characterization study of silicon PIN diode for radiation detector. Choose a p^+n-n^+ type. It is primarily a top layer (p) have SiO_2 layer and the contact layer is aluminum same as straight below. The structure is used. Measure value Electrical characteristics of the cross-section. The data to calculate the components of the current and the components of the capacity. The result is that. The area current density is greater than the perimeter current density 1,000 times. The area capacitance density is greater than the perimeter capacitance density. This result in the calculation of the densities of the structure diodes used in this experiment. The density of the perimeter can be removed. Very convenient to calculate. Then, there are four different types of diodes: Diodes for reference , Diodes with electron beam 50 kGy volume , Diodes with platinum doping on the n side And platinum doping diodes and electron beam 50 kGy volume. To measure electrical characteristics and to find out the basic parameters. It was found that the parameters have changed that. Recombination lifetime , Generation lifetime and Diffusion length , with increasing and decreasing radiation exposure and platinum infiltration , will result in a change in the characteristics of the parameters that are less sensitive to temperature. This can be applied to the radiation detector design further.

Keyword : Radiation detector , PIN diode

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำรายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับโอกาสพร้อมทั้งได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาเป็นอย่างดี จากนายจิรวุฒิน์ ปราบเขต ซึ่งเป็นผู้นิเทศงานของโครงการสหกิจนี้ โดยได้ให้ความรู้และประสบการณ์ รวมไปถึงคุณธรรมและจริยธรรมที่เป็นตัวอย่างที่ดีแก่ทางผู้จัดทำเสมอมา ซึ่งเป็นแนวทางทำให้โครงการเรื่องนี้ สำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์

ทางผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณ อาจารย์เกรียงไกร สุขสุด อาจารย์ชินภัทร นันทจิรากรชัย และขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันมีประโยชน์แก่ศิษย์ ขอขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยให้กำลังใจพร้อมกับสนับสนุนทุนทรัพย์ ขอขอบคุณพี่ๆ พนักงานทุกท่าน ในศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยสร้างบรรยากาศที่ดีในการทำงาน ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคน รวมทั้งบุคคลอื่นที่มีได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านด้วยดีมาโดยตลอดจนสำเร็จเป็นรายงานฉบับนี้ได้

ปิยวัฒน์ ยศนายน

สารบัญ

บทคัดย่อ.....	i
Abstract.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญรูป.....	viii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กัมมันตภาพรังสี.....	4
2.1.1 รังสีเอกซ์.....	4
2.1.2 รังสีแกมมา.....	5
2.1.3 อันตรายจากผลของรังสี.....	6
2.2 หน่วยวัดปริมาณการรับรังสี.....	6
2.2.1 ปริมาณรังสีดูดกลืน.....	7
2.2.2 ปริมาณรังสีสมมูล.....	7
2.2.3 ปริมาณรังสียั่งผล.....	8
2.3 อิเล็กตรอนและโฮล.....	10
2.4 สภาพนำและสภาพต้านทาน.....	10
2.5 รอยต่อพี-เอ็น.....	12
2.5.1 ภาวะสมดุล.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ศักย์สัมผัส.....	14
2.5.3 บริเวณพ่วงพาหะ.....	17
2.5.4 ความจुरอยต่อ.....	18
2.5.5 ภายใต้การไบแอสไปข้างหน้า.....	20
2.5.6 กระแสอิมิตัวย้อนกลับในอุดมคติ.....	23
2.6 พินไดโอด (PIN diode).....	25
2.7 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับความผิดปกตินี้เนื่องจากรังสี.....	26
2.7 องค์ประกอบของกระแส (Current Origin).....	30
2.7.1 ความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่.....	31
2.7.2 ช่วงเวลาการผสมกลับ (Recombination lifetime).....	33
2.7.3 แฟกเตอร์ความถูกต้อง (Correction factor).....	34
2.8 องค์ประกอบทางเรขาคณิตของความจุไฟฟ้า (Geometrical capacitance components).....	36
2.9 การผลิตรอยต่อพีเอ็น.....	36
บทที่ 3 วิธีการทำการทดลอง.....	38
3.1 การทดลองแยกองค์ประกอบของกระแสและความจุไฟฟ้า.....	38
3.1.1 กระบวนการวัดค่า.....	38
3.1.2 ข้อมูลของไดโอดที่ใช้.....	39
3.1.3 วิธีการแยกองค์ประกอบของกระแสและความจุไฟฟ้า.....	41
3.2 การทดลองหาผลกระทบของรังสีที่มีต่อไดโอด.....	42
3.2.1 การทดลอง.....	42
3.2.2 การประมาณความหนาแน่นกระแสและความจุไฟฟ้า.....	43
3.2.3 วิธีการหาพารามิเตอร์ของความหนาแน่นกระแสแพร่ ในกรณีที่ไม่มีทราบค่าของแฟกเตอร์ความถูกต้อง.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	46
4.1 ผลการทดลองแยกองค์ประกอบของกระแสและความจุไฟฟ้า.....	46
4.1.1 องค์ประกอบของกระแสรั่ว.....	46
4.1.2 องค์ประกอบของความจุไฟฟ้า.....	47
4.2 ผลการทดลองหาผลกระทบของรังสีที่มีต่อไดโอด.....	48

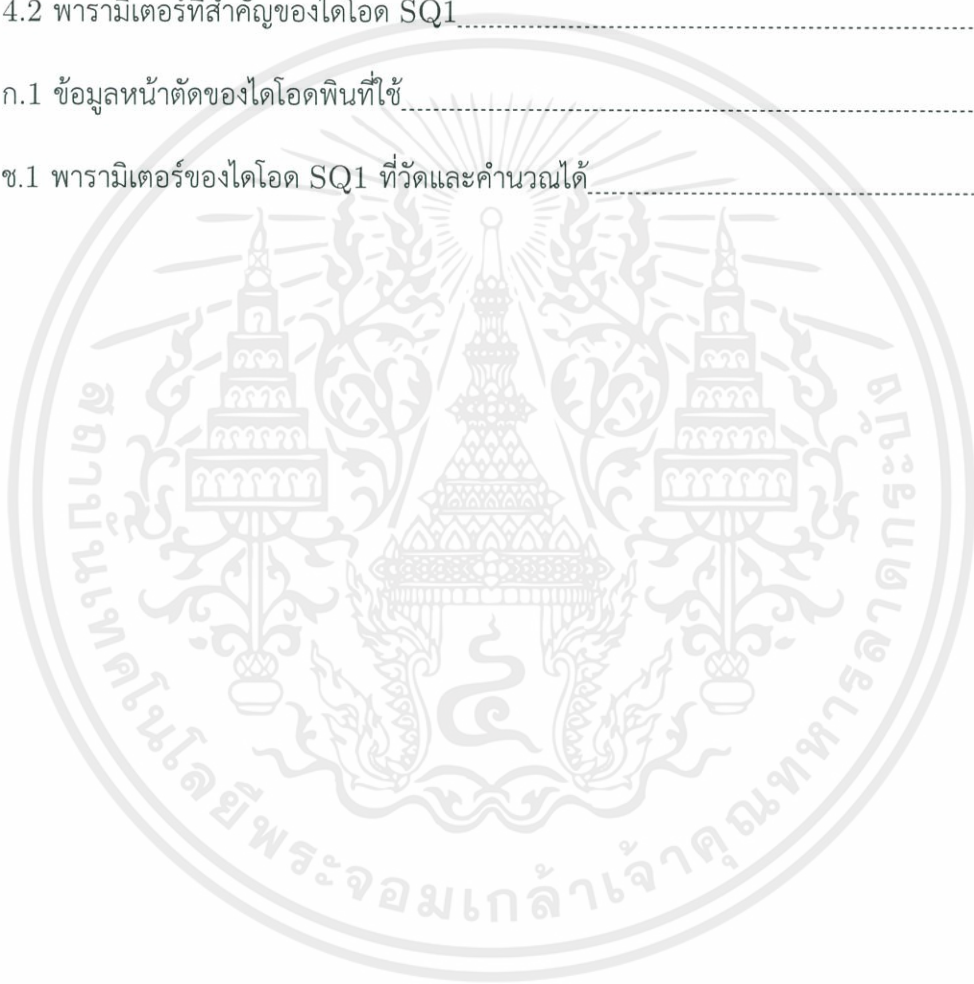
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลหน้าตัดของไดโอด.....	54
ภาคผนวก ข กราฟข้อมูลกระแสและข้อมูลความจุไฟฟ้าของแต่ละหน้าตัด.....	55
ข.1 กระแสขณะไบอัสตรง.....	55
ข.2 กระแสรั่วขณะไบอัสย้อน.....	55
ข.3 ความจุไฟฟ้าขณะไบอัสย้อน.....	56
ภาคผนวก ค ข้อมูลความจุไฟฟ้าของไดโอด SQ1.....	57
ภาคผนวก ง ข้อมูลความกว้างบริเวณพร่องพาหะของไดโอด SQ1.....	59
ภาคผนวก จ ข้อมูลความหนาแน่นกระแสรั่วกับแรงดัน.....	61
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณ พร่องพาหะของไดโอด SQ1.....	63
ภาคผนวก ช ข้อมูลพารามิเตอร์ทั้งหมดของไดโอด SQ1 ที่วัดและคำนวณได้.....	65
ประวัติผู้เขียน.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี.....	8
ตารางที่ 2.2 ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ.....	9
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลกระแสร่วมของไดโอด SQ1.....	48
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญของไดโอด SQ1.....	49
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลหน้าตัดของไดโอดพินที่ใช้.....	54
ตารางที่ ข.1 พารามิเตอร์ของไดโอด SQ1 ที่วัดและคำนวณได้.....	65



สารบัญรูป

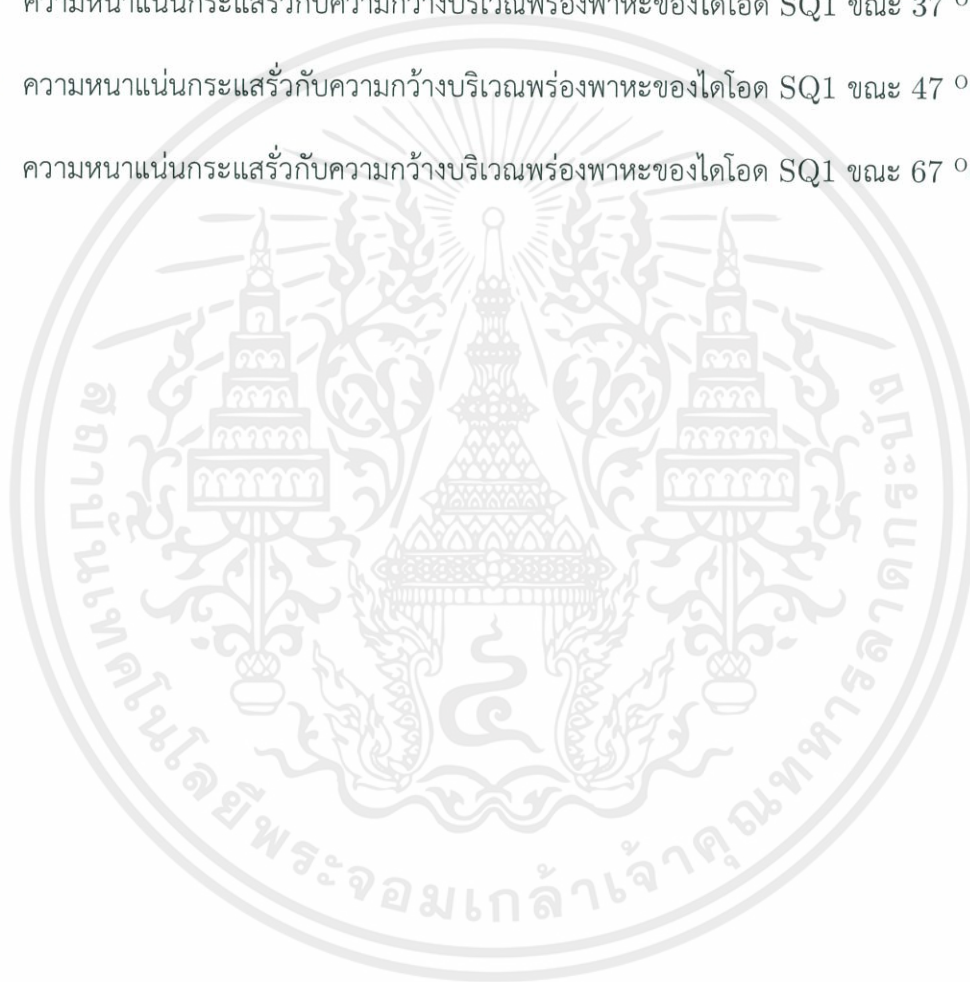
รูปที่ 1.1	ส่วนหนึ่งของอาการที่เกิดขึ้นกับผู้ที่ได้รับรังสีสูงแบบเฉียบพลัน.....	1
รูปที่ 1.2	ไดอะแกรมระบบของเครื่องวัดรังสี.....	2
รูปที่ 2.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานกับความเข้มข้นของสารเจือ ใน Si และ GaAs แบบชนิด p และ n ที่อุณหภูมิห้อง.....	11
รูปที่ 2.2	โครงสร้างง่ายๆของรอยต่อพี-เอ็น และสัญลักษณ์ของไดโอด.....	12
รูปที่ 2.3	ภาพแสดงโครงสร้างและแผนภาพแถบพลังงาน ของสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n.....	13
รูปที่ 2.4	แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับรอยสัมผัสพี-เอ็น.....	14
รูปที่ 2.5	แผนภาพแสดงพลังงานของรอยต่อ p-n ในภาวะสมดุล แสดงศักย์สัมผัส V_o และศักย์ไฟฟ้าสถิตในด้านเอ็น ϕ_n และพี ϕ_p	15
รูปที่ 2.6	ลักษณะเฉพาะ C-V ของไดโอด.....	19
รูปที่ 2.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/C^2)$ และ V	20
รูปที่ 2.8	ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันในอุดมคติขณะไบอัสย้อน.....	24
รูปที่ 2.9	เปรียบเทียบกราฟกระแสและแรงดัน ในอุดมคติกับในความจริง.....	25
รูปที่ 2.10	โครงสร้างพื้นฐานของพินไดโอด.....	25
รูปที่ 2.11	การเกิดคู่ V-I เมื่อมีอนุภาคพลังงานสูงมากระทำ.....	27
รูปที่ 2.12	พลังงานที่สูญเสียชนิดในซิลิคอนเมื่อเทียบกับพลังงานของโฟตอน.....	28
รูปที่ 2.13	พลังงานที่สูญเสียในซิลิคอนที่ไม่ไอออนไนซ์ ของอนุภาคต่างๆ.....	28
รูปที่ 2.14	5 ปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกิดขึ้นจากระดับพลังงานบกพร่องที่เกิดจากการกระทำรังสี.....	29
รูปที่ 2.15	แผนภาพแสดงองค์ประกอบของกระแสรั่ว.....	30
รูปที่ 2.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะ.....	32
รูปที่ 2.17	การผสมกลับ และ การก่อเกิด.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.18	โครงสร้างของไดโอดพินสำหรับประกอบการคำนวณ	34
รูปที่ 2.19	การผลิตรอยต่อ p-n	37
รูปที่ 3.1	ตัววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบ 4 โพรบ บนฐานวาง	38
รูปที่ 3.2	B1500A และ คอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อ	39
รูปที่ 3.3	ระบบการวัดที่ใช้ในการวัดไดโอด	39
รูปที่ 3.4	โครงสร้างของไดโอดที่ใช้	40
รูปที่ 3.5	ตำแหน่งและชื่อของไดโอดแต่ละตัว	40
รูปที่ 3.6	หน้าตัดของไดโอด SQ1	42
รูปที่ 3.7	แสดงการหา L_p ในกรณีที่ไมทราบแฟกเตอร์ความถูกต้อง	45
รูปที่ 4.1	กราฟความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่กับความหนาแน่นกระแสต่อขอบของไดโอดพินที่ใช้	46
รูปที่ 4.2	กราฟความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่กับความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อขอบของไดโอดพินที่ใช้	47
รูปที่ ข1	กระแสขณะไบอัสตรงของแต่ละหน้าตัด	55
รูปที่ ข2	กระแสรีเวอร์สไบอัสย้อนของแต่ละหน้าตัด	55
รูปที่ ข3	ความจุไฟฟ้าขณะไบอัสย้อนของแต่ละหน้าตัด	56
รูปที่ ค1	ความจุไฟฟ้าของ SQ1 ที่ 27°C	57
รูปที่ ค2	ความจุไฟฟ้าของ SQ1 ที่ 37°C	57
รูปที่ ค3	ความจุไฟฟ้าของ SQ1 ที่ 47°C	58
รูปที่ ค4	ความจุไฟฟ้าของ SQ1 ที่ 67°C	58
รูปที่ ง1	ความกว้างบริเวณพร่องพาหะ ที่ 27 °C	59
รูปที่ ง2	ความกว้างบริเวณพร่องพาหะ ที่ 37 °C	59
รูปที่ ง3	ความกว้างบริเวณพร่องพาหะ ที่ 47 °C	60
รูปที่ ง4	ความกว้างบริเวณพร่องพาหะ ที่ 67 °C	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ จ1	ความหนาแน่นกระแสรั่วขณะไบอัสย้อน ที่ 27 °C.....	61
รูปที่ จ2	ความหนาแน่นกระแสรั่วขณะไบอัสย้อน ที่ 37 °C.....	61
รูปที่ จ3	ความหนาแน่นกระแสรั่วขณะไบอัสย้อน ที่ 47 °C.....	62
รูปที่ จ4	ความหนาแน่นกระแสรั่วขณะไบอัสย้อน ที่ 67 °C.....	62
รูปที่ ฉ1	ความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะของไดโอด SQ1 ขณะ 27 °C.....	63
รูปที่ ฉ2	ความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะของไดโอด SQ1 ขณะ 37 °C.....	63
รูปที่ ฉ3	ความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะของไดโอด SQ1 ขณะ 47 °C.....	64
รูปที่ ฉ4	ความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะของไดโอด SQ1 ขณะ 67 °C.....	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

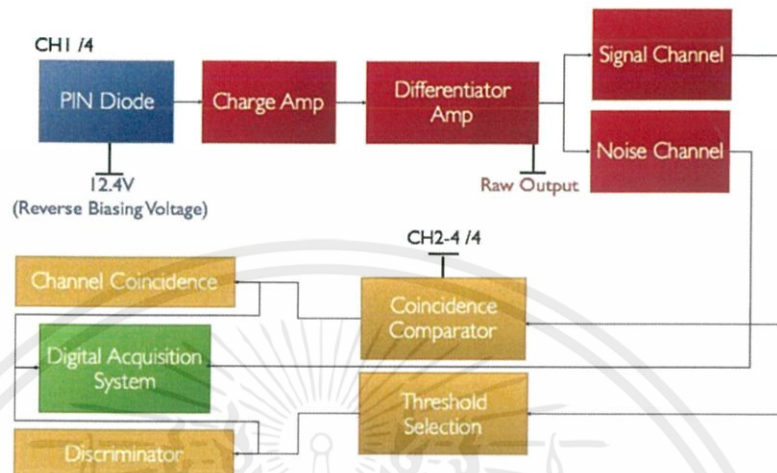
ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีการนำวัสดุที่ประกอบด้วยนิโคตดกัมมันตรังสีมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ ด้านการศึกษา เป็นต้น วัสดุเหล่านี้ทำให้เกิดอันตรายทางรังสีจากนิโคตดกัมมันตรังสีที่เป็นองค์ประกอบ การได้รับรังสีปริมาณสูงเป็นอันตรายแก่ชีวิต รังสีไม่สามารถทำให้ร่างกายเสียชีวิตทันที แต่อาจทำให้เกิดพองไหม้และบาดแผลได้ทันที ดังรูปที่ 1.1 และ การได้รับรังสีเพียงอย่างเดียวไม่เป็นกรณีฉุกเฉินทางการแพทย์ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นร่างกายจะเป็นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของรังสีที่ได้รับส่วนของร่างกายที่ได้ และอายุของผู้ได้รับรังสี ดังนั้นผู้ได้รับรังสีมีอายุน้อยแล้วอันตรายเนื่องจากรังสีจะมีมากกว่าผู้ ที่มีอายุมาก ในทารกแรกเกิดแล้วอาจได้รับอันตรายถึงพิการหรือเสียชีวิตได้ จึงจำเป็นต้องมีมาตรการเพื่อความปลอดภัย ได้แก่ ใช้เวลาปฏิบัติงานให้สั้นที่สุด , รักษาระยะทางให้ห่างจากต้นกำเนิดรังสีให้มากที่สุด , จัดให้มีเครื่องกำบังรังสีให้เหมาะสม , การจำกัดขอบเขตของลำรังสี , สภาพเครื่องมือต้องได้รับการดูแลอย่างสม่ำเสมอ , ระมัดระวังตัว และ ควรติดเครื่องมือวัดรังสีไว้ติดตัวตลอดเวลาขณะปฏิบัติงาน



รูปที่ 1.1 ส่วนหนึ่งของอาการที่เกิดขึ้นกับผู้ที่ได้รับรังสีสูงแบบเฉียบพลัน [1]

ซึ่งเครื่องวัดรังสีระบบอิเล็กทรอนิกส์นั้น ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆ คือ หัววัดรังสี , ส่วนขยาย , ส่วนส่งผ่านสัญญาณ และ ส่วนเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 1.2 โดยในโครงการนี้จะเป็นการศึกษาในส่วนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัววัดรังสี ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมาก เพราะเป็นจุดเริ่มต้นของเครื่องมือวัด ถ้าขาดส่วนนี้ไปก็จะไม่สามารถตรวจวัดรังสีได้เลย



รูปที่ 1.2 ไตอะแกรมระบบของเครื่องวัดรังสี [2]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในหัวอ่านที่ใช้ในเครื่องวัดรังสี มีหลายประเภท ได้แก่ แบบแผ่นฟิล์ม , แบบหลอดสูญญากาศ , แบบหลอดบรรจุแก๊ส และ แบบสารกึ่งตัวนำ โดยในการวิจัยนี้จะเลือกศึกษาหัวอ่านแบบสารกึ่งตัวนำ ที่เป็นไดโอดชนิดพิน (PIN) ซึ่งในการนำไดโอดมาใช้ในการเป็นหัววัด เพื่อเป็นประโยชน์กับการนำไปออกแบบ เราจำเป็นต้องทราบว่ารังสีนั้นส่งผลกระทบต่อไดโอดในลักษณะอะไร เช่น กระแสรั่วที่เกิดขึ้นนั้นแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเกิดจากการที่พารามิเตอร์พื้นฐานของไดโอดบางตัวมีค่าที่เปลี่ยนไป ดังนั้น ในการวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาว่าเมื่อไดโอดได้รับรังสี พารามิเตอร์ตัวไหนที่มีการเปลี่ยนแปลง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะกับไดโอดพิน ชนิด p^+-n-n^+ เท่านั้น ใช้พื้นที่หน้าตัดในรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยรังสีที่จะนำมาใช้ประกอบการวิจัยนั้นจะเป็นรังสีอิเล็กตรอน (electron beam) ที่มีปริมาณ 50 kGy ซึ่งในการวัดนั้น จะพิจารณาที่อุณหภูมิต่างกัน 4 ค่า นั่นคือ 27 , 37 , 47 และ 67 °C

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

เริ่มจากการตรวจสอบก่อนว่า ความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่ (area current density) , ความหนาแน่นกระแสต่อขอบ (perimeter current density) , ความหนาแน่นของจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ (area capacitance density) และ ความหนาแน่นของจุไฟฟ้าต่อขอบ (perimeter capacitance density) ของเนื้อสารนั้นมีอยู่ปริมาณเท่าใด และ แตกต่างกันเท่าไร เพื่อความสะดวกในการคำนวณต่อไป เพราะในวัสดุที่มีขนาดเล็กบางชนิดนั้นกระแสขอบนั้นมีค่าที่มาก ทำให้ละเอียดไม่ได้จึงต้องนำมาพิจารณาด้วยเมื่อยืนยันถึงปริมาณความหนาแน่นกระแสแล้ว จึงเริ่มทำการทดลองต่อไป โดยนำไดโอดที่ไม่ได้รับรังสี กับ ไดโอดที่ได้รับรังสี รวมไปถึงไดโอดที่มีการเจือสารบางชนิดเพิ่มเติม มาหาคุณลักษณะทางไฟฟ้า ในแต่ละอุณหภูมิ จากนั้นนำไปคำนวณเพื่อหาพารามิเตอร์ของแต่ละไดโอดแต่ละตัว จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบถึงผลกระทบของรังสีที่มีต่อตัวไดโอดว่าจะมีพารามิเตอร์ของไดโอดค่าใดบ้างที่จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด รวมไปถึงการเจือสารบางชนิดเพิ่มไปก่อนได้รับรังสี จะส่งผลแตกต่างกันหรือไม่ โดยจะสามารถนำผลที่ได้ไปประกอบการออกแบบหัววัดรังสีต่อไปในอนาคตได้

บทที่ 2

เนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กัมมันตภาพรังสี [3]

กัมมันตภาพรังสี (radioactivity) เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งของธาตุบางชนิดที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น ยูเรเนียม (uranium) เรเดียม (radium) มีสมบัติในการแผ่รังสีออกมาเอง ธาตุที่สามารถแผ่รังสีออกมาได้เองนั้นเรียกว่า ธาตุกัมมันตรังสี (radioactive elements) เบกเคอเรล (Henri Becquerel) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสเป็นผู้ค้นพบกัมมันตรังสีเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2439 (หรือ ค.ศ. 1896) โดยการสังเกตพบว่า มีกัมมันตภาพรังสีในสารประกอบยูเรเนียม ในการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสี ทำให้ทราบว่า มีรังสีอยู่ 3 ชนิดด้วยกันได้แก่ รังสีอัลฟา (α - rays) รังสีเบตา (β - rays) และรังสีแกมมา (γ - rays) สำหรับรังสีอัลฟานั้น คือ นิวเคลียสของฮีเลียม (${}^4_2\text{He}$) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกเท่ากับ $2e$ จึงเรียกกันในอีกชื่อว่าอนุภาคอัลฟา (α - particle) สำหรับรังสีเบตานั้น คือ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ และเรียกรังสีนี้ว่า อนุภาคเบตา (β - particle) ส่วนรังสีแกมมานั้นเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงคลื่นสั้นมาก จึงเป็นรังสีที่ไม่มีประจุไฟฟ้า

2.1.1 รังสีเอกซ์ [3]

รังสีเอกซ์ ค้นพบโดยเรินท์เกน (Wilhelm Roentgen) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี พ.ศ. 2438 ในขณะที่กำลังศึกษาเกี่ยวกับรังสีคาโทดในห้องมืด เรินท์เกนได้สังเกตว่า สารเรืองแสงที่วางไว้ใกล้ๆ เรืองแสงได้ และเมื่อได้ตรวจสอบดูจึงทราบว่าสิ่งที่ทำให้สารเรืองแสงได้ คือ รังสีชนิดใหม่ มีอำนาจทะลุทะลวงสูงเกิดจากรังสีคาโทดชนกับผนังของหลอดรังสีคาโทด เนื่องจากในตอนนั้นยังไม่ทราบว่ารังสีนี้คืออะไร จึงตั้งชื่อว่า รังสีเอกซ์ (X-ray)

การค้นคว้าต่อมาทราบว่า รังสีเอกซ์เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนพลังงานสูงชนกับสิ่งกีดขวาง ซึ่งทุกๆ ไปใช้อิเล็กตรอนชนเป้าโลหะ ได้มีการศึกษาธรรมชาติของรังสีเอกซ์ในแง่ต่างๆ กันอย่างกว้างขวางและพบว่า รังสีเอกซ์เดินทางเป็นเส้นตรง ไม่เบนในสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า ไม่ทะลุผ่านวัตถุที่มีเลขอะตอมสูงๆ เช่น กระดุก ตะกั่ว ซึ่งจะกั้นรังสีเอกซ์ได้และทำให้เกิดภาพบนแผ่นฟิล์มถ่ายรูปได้ ซึ่งในวงการแพทย์ใช้การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์สำหรับช่วยในการวินิจฉัยโรค รังสีเอกซ์ทำให้สารบางชนิดเรืองแสงได้ในที่มืด ทำให้แก๊สที่บรรจุในหลอดแก้วกลายเป็นสื่อไฟฟ้าได้ นักวิทยาศาสตร์ใช้สมบัติข้อนี้ในการสร้างเครื่องมือวัดรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังพบว่า ถ้าพลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนเป้าโลหะสูงขึ้น รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะมีอำนาจทะลุทะลวงมากขึ้นตามไปด้วย

หลังจากการค้นพบรังสีเอกซ์ได้ไม่นาน ก็เชื่อกันว่า รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่การทดลองเพื่อพิสูจน์ว่า รังสีเอกซ์เป็นคลื่นในระยะแรกๆ ไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากรังสีเอกซ์ไม่แสดงการหักเหหรือเลี้ยวเบนเมื่อผ่านเกรตติงชนิดธรรมดาที่ใช้ในการศึกษาธรรมชาติของแสง ใน พ.ศ. 2449 บาร์คลา (Barkla) สามารถพิสูจน์ได้ว่า รังสีเอกซ์เป็นคลื่นตามขวาง จากการทดลองโพลาไรเซชัน และใน พ.ศ. 2455 เลอวี (Max Von Laue) ได้เสนอให้ฉายรังสีเอกซ์ไปยังผลึกของสารโดยให้อะตอมของผลึกของสารโดยให้อะตอมของผลึกในสารทำหน้าที่เป็นเกรตติง จากผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) แสดงว่า รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก อยู่ระหว่าง 0.1 \AA ถึง 100 \AA ถ้าดูในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะพบว่าความยาวคลื่นรังสีเอกซ์สั้นกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ต แต่ยาวกว่ารังสีแกมมา

รังสีเอกซ์เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของพลังงานของอิเล็กตรอน จากชั้นนอกไปชั้นในของอะตอมหรือเกิดได้จากการที่อนุภาคที่มีประจุเร่งหรือหน่วง รังสีเอกซ์มีผลต่ออะตอมที่ได้รับรังสีมาก เช่น การแตกออก หรือ ไอออนไนเซชัน ในทางการแพทย์ใช้สำหรับตรวจสิ่งทึบแสง ที่อยู่ภายในร่างกายและชิ้นส่วนของเครื่องจักร นอกจากนี้รังสีเอกซ์ยังสามารถทำลายเนื้อร้ายได้ดีด้วย จึงมีประโยชน์สำหรับการรักษามะเร็ง (แต่ก็สามารถทำลายเนื้อดีได้ด้วย)

2.1.2 รังสีแกมมา [3]

รังสีแกมมา (gamma rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 10^{-10} เมตรไปจนถึง 10^{-14} เมตร และมีความถี่ตั้งแต่ 3×10^{18} Hz ขึ้นไปจนมากกว่า 3×10^{22} Hz

พลังงานของแกมมาแต่ละตัวคิดได้จากผลคูณของค่าคงตัวพลังค์และความถี่ที่มีขนาดพอๆ กับพลังงานที่เกิดขึ้นในขบวนการนิวเคลียร์ ดังนั้นรังสีแกมมาจึงสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ จะพบว่ามีรังสีแกมมาถูกปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสีและมีในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู รังสีแกมมามีสมบัติที่สามารถทะลุทะลวงวัตถุได้ดี แต่ถ้าถูกดูดกลืน จะเกิดผลที่รุนแรงมาก ดังนั้นผู้ที่เกี่ยวข้องจึงควรต้องระมัดระวังอย่างดีที่สุด

2.1.3 อันตรายจากผลของรังสี [4]

ผลของรังสีที่มีต่อร่างกายของมนุษย์ นอกจากก่อให้เกิดอันตรายต่อเซลล์ที่ได้รับรังสีโดยตรงแล้ว ยังมีผลถ่ายทอดไปยังลูกหลานได้หากเซลล์เหล่านั้นเป็นเซลล์ในระบบอวัยวะสืบพันธุ์ เมื่อเซลล์ได้รับรังสีจะทำให้เกิด mitotic delay หรือ division delay การแบ่งตัวของเซลล์จะช้าลง ขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ได้รับ และระยะในวงจรชีวิตของเซลล์ เซลล์บางเซลล์อาจจะตายเพราะเกิด chromosome aberration

กลุ่มอาการจากรังสีสามารถแบ่งออกได้หลายลักษณะดังนี้คือ

1) ผลเฉียบพลันจากรังสี (acute radiation effect) เป็นกลุ่มอาการซึ่งเกิดขึ้นเฉียบพลันอาจจะปรากฏขึ้นทันทีหลังได้รับรังสี หรือเกิดขึ้นภายใน 1-2 เดือน หลังได้รับรังสี

2) ผลเรื้อรังจากรังสี (late radiation effect) เป็นกลุ่มอาการที่เกิดขึ้นหลังได้รับรังสีไปนานแล้ว อาจจะใช้เวลาเป็นปีหรือหลาย ๆ ปีขึ้นไป

3) รังสีขนาดที่ทำให้ตายได้ (early lethal effect) เป็นผลเฉียบพลันจากรังสีขนาดที่ทำให้ตายได้ การตายอย่างเฉียบพลัน เนื่องจากได้รับรังสีอวัยวะทั้งตัวจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ได้รับ อัตรารังสี อายุ เพศ สปีชีส์ ฯลฯ โดยทั่วไปปริมาณรังสีน้อยที่สุดที่สามารถทำให้สัตว์ตาย เรียกว่า minimal lethal dose ปริมาณรังสีที่ทำให้สัตว์กลุ่มนั้นๆ ตาย 50% เป็นปริมาณรังสีเปรียบเทียบ เรียกว่า lethal dose 50 หรือ LD₅₀ หลังได้รับรังสีสัตว์ยังไม่ตายในทันที แต่จะเกิดกลุ่มอาการเนื่องจากรังสีเข้ามาก่อน

อาการเหล่านี้เกิดจากการล้มเหลวของอวัยวะ 3 ระบบ คือ ระบบไขกระดูก ระบบกระเพาะลำไส้ ระบบประสาทและหลอดเลือด ส่วนใหญ่แล้วสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะตายภายใน 30 วัน จึงเขียนย่อเป็น LD₅₀ (30) สัตว์แต่ละชนิดจะมีค่า LD₅₀ (30) แตกต่างกันไป

2.2 หน่วยวัดปริมาณการรับรังสี [5]

สิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับการป้องกันรังสี (radiation protection) ได้แก่ การวัดปริมาณรังสีที่ร่างกายดูดกลืน และการประเมินความเสี่ยงของการได้รับรังสีในปริมาณนั้น ดังนั้น จึงต้องมีหน่วย 2 อย่าง สำหรับการวัดและการประเมินในเชิงปริมาณ คือ เกรย์ (gray ย่อว่า Gy) และ ซีเวิร์ต (sievert ย่อว่า Sv)

นอกจากนี้การที่ร่างกายได้รับรังสีเป็นปริมาณเท่าใด คิดเฉพาะปริมาณรังสีที่ร่างกายดูดกลืนเอาไว้ หากรังสีแกมมาผ่านทะลุร่างกายของเราไป โดยพลังงานของมันไม่ถูกร่างกายของเราดูดกลืน (absorb) ไปด้วย ปริมาณรังสีที่ร่างกายของเราได้รับก็เท่ากับ “ศูนย์” ดังนั้น “ปริมาณรับรังสี” (radiation dose) จึงหมายถึง ปริมาณรังสีที่ร่างกายของเราดูดกลืนเอาไว้จริงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ปริมาณรังสีดูดกลืน

เกรย์ (gray) เป็นหน่วยวัด ปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) เมื่อ รังสีชนิดก่อไอออน (ionizing radiation) เช่น รังสีแอลฟา รังสีเบตา รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ หรือ อนุภาคนิวตรอน สัมผัสกับ สสารหรือวัตถุใด มันจะชนเข้าไปที่อะตอมที่ประกอบขึ้นเป็นวัตถุนั้น และสิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ รังสีจะถ่ายโอน พลังงานของมันบางส่วนหรือทั้งหมดให้อะตอมเหล่านั้น เมื่อมองในด้านอะตอมของวัตถุ พลังงานปริมาณที่รับ ถ่ายโอนมานี้ก็คือ ปริมาณรังสีดูดกลืน และวัดเป็นเกรย์ ตั้งขึ้นตามชื่อของนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อว่า หลุยส์ แฮ โรลด์ เกรย์ (Louis Harold Gray) ซึ่งมีนิยามว่า เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ถ่ายโอนต่อมวลของวัตถุ โดย กำหนดให้ 1 เกรย์ เท่ากับ พลังงาน 1 จูล (joule) ต่อมวล 1 กิโลกรัมของวัตถุ ดังนั้น เมื่อเราได้รับรังสี สมมติ ว่าร่างกายของเราดูดกลืนพลังงานของรังสีนั้นเอาไว้ 2 จูล (พลังงานปริมาณนี้เทียบได้กับพลังงานที่ใช้ในการ “เตะส่งบอลเบา ๆ”) สมมติต่อไปว่าถ้าเรามีน้ำหนักตัว 50 กิโลกรัม ในกรณีนี้เราจะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน เท่ากับ 2 จูลหารด้วย 50 กิโลกรัม ผลลัพธ์คือ 0.04 จูลต่อกิโลกรัม หรือเท่ากับ 0.04 เกรย์ นั่นเอง

2.2.2 ปริมาณรังสีสมมูล

ปริมาณรังสีสมมูล (equivalent dose) มีหน่วยเป็นซีเวิร์ต (sievert) รังสีที่ร่างกายดูดกลืนไม่ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของรังสี จากตัวอย่างเดิม ไม่ว่าจะเป็นรังสีแอลฟา เบตา หรือแกมมา รังสีดูดกลืนก็คือ 0.04 เกรย์ เท่ากัน แต่รังสีแอลฟา 0.04 เกรย์ ทำอันตรายต่อร่างกายมากกว่ารังสีแกมมา 0.04 เกรย์ โดยจากผลการ ค้นคว้าของเหล่านักวิทยาศาสตร์ ต่างเห็นพ้องต้องกันว่า ปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากัน รังสีแอลฟาทำอันตรายต่อ ร่างกายเราได้มากกว่ารังสีแกมมาถึง 20 เท่า ดังนั้น รังสีดูดกลืนที่ร่างกายได้รับ 0.04 เกรย์ หากมาจากการ ดูดกลืนรังสีแอลฟา ก็ต้องคูณ 0.04 ด้วย 20 ซึ่งเท่ากับ 0.8 นี้เรียกว่า “ปริมาณรังสีสมมูล” มีหน่วยคือ “ซีเวิร์ต” (sievert) ซึ่งตั้งขึ้นตามชื่อของ รอล์ฟ ซีเวิร์ต (Rolf Sievert) นักฟิสิกส์ชาวสวีเดนผู้บุกเบิกด้านการ ป้องกันรังสีชนิดก่อไอออน ซึ่งสูตรในการคำนวณปริมาณรังสีสมมูลมีดังนี้

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (2.1)$$

โดย H_T คือ ปริมาณรังสีสมมูลของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะใด ๆ (หน่วย Sv)

$D_{T,R}$ คือ ปริมาณรังสีดูดกลืนของรังสีแต่ละชนิดในเนื้อเยื่อหรืออวัยวะใด ๆ (หน่วย Gy)

W_R คือ ตัวประกอบเชิงคุณภาพ หรือ ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี (ไม่มีหน่วย)

ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี

ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี (radiation weighting factor)	
โฟตอน (รังสีแกมมา รังสีเอกซ์)	1
อิเล็กตรอน (รังสีเบตา)	1
นิวตรอน	5 ถึง 20
โปรตอน	5
อนุภาคจากดวงอาทิตย์ ไอออนหนัก	20

สรุปว่า ปริมาณรังสีสมมูลมีหน่วยเป็นซีเวิร์ต และมีค่าเท่ากับปริมาณรังสีดูดกลืนมีหน่วยเป็นเกรย์ คูณด้วยตัวเลขตัวหนึ่ง ซึ่งตัวเลขนี้ที่มีค่ามากกว่าก็จะทำอันตรายเราได้มากกว่า ตามปกติตัวเลขนี้เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ 'Q' มาจาก 'ตัวประกอบคุณภาพ' (quality factor) ทั้งนี้ รังสีแต่ละชนิดจะมีค่า 'Q' แตกต่างกันไป แต่ในปัจจุบันจะพบเรียกว่า “แฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี” หรือ “ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี” (radiation weighting factor)

เมื่อมีการกล่าวถึงว่า คนนั้นคนนี้ได้รับปริมาณรังสีเท่าใด ตามปกติคำตอบก็จะเป็นเท่านี้เท่านี้ซีเวิร์ต ซึ่งแสดงว่าไม่ต้องสงสัยต่อไปว่าปริมาณรังสีนี้เกิดจากรังสีชนิดใด เพราะปริมาณรังสีตามหน่วยนี้คำนวณจากค่าของ ตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) หรือเรียกอีกอย่างว่า ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดรังสี ซึ่งได้คิดรวมชนิดของรังสีเอาไว้แล้ว

ถึงตรงนี้ เราสามารถประเมินผลของการรับรังสีได้ในระดับหนึ่ง คือ ทราบว่าร่างกายของเราได้รับรังสีมากน้อยเท่าใดจากพลังงานจากรังสีที่ร่างกายของเราดูดกลืนไว้ ที่เรียกว่า ปริมาณรังสีดูดกลืน และยังพอทราบอีกด้วยว่า ปริมาณรังสีที่ร่างกายเราดูดกลืนไว้นั้น จะทำอันตรายต่อเราในระดับใด ซึ่งก็ขึ้นกับชนิดของรังสี แต่ร่างกายของเราไม่ได้แข็งแรงเท่ากันตลอดร่างกาย เช่น โคนขกที่ตาเจ็บกว่าโคนขกที่แขน นั้นแสดงว่า นอกจากชนิดของรังสีแล้ว ยังมีอีกแฟกเตอร์หรือตัวประกอบหนึ่ง ที่เราต้องคำนึงถึงเมื่อร่างกายของเราได้รับรังสี

2.2.3 ปริมาณรังสียังผล

ปริมาณรังสียังผล (effective dose) ก็มีหน่วยเป็น “ซีเวิร์ต” เช่นกัน นักฟิสิกส์ได้พัฒนา “ตัวชี้บอก” ที่ยอดเยี่ยมมากขึ้นมาตัวหนึ่ง เรียกว่า “ปริมาณรังสียังผล” (effective dose) ซึ่งก็มีหน่วยเป็น “ซีเวิร์ต” เช่นเดียวกับปริมาณรังสีสมมูล ทั้งนี้ก็เพราะมันเป็นผลรวมของปริมาณรังสีสมมูลของแต่ละอวัยวะของร่างกายเรา แต่เป็นปริมาณรังสีสมมูลที่ต้องปรับเทียบด้วยตัวประกอบตาม “สภาพไว” (sensitivity) ของอวัยวะหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อเยื่อต่าง ๆ เสียก่อน ปริมาณรังสียังผล คำนวณได้จาก “ปริมาณรังสีดูดกลืน” (absorbed dose) มีหน่วยเป็น “เกรย์” (Gy) ที่เนื้อเยื่อและอวัยวะต่าง ๆ ที่ได้รับรังสีและดูดกลืนพลังงานจากรังสีนั้น (บางส่วนหรือทั้งหมด) เอาไว้ คุณกับ “แพกเตอร์หรือตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก 2 ตัว” ซึ่ง ตัวประกอบตัวแรก คำนึงถึง ชนิดของรังสี (รังสีแอลฟา เบตา แกมมา และอนุภาคนิวตรอน) กับช่องทางรับรังสี (การรับรังสีภายนอกหรือภายในร่างกาย) ซึ่งผลคูณแรกนี้ก็คือ “ปริมาณรังสีสมมูล” และ ตัวประกอบตัวที่ 2 ซึ่งคำนึงถึง “สภาพไว” ของอวัยวะหรือเนื้อเยื่อ ซึ่งจะเกิดความเสียหายไม่เท่ากัน แม้จะดูดกลืนรังสีไว้ในปริมาณเท่ากัน เรียกว่า “แพกเตอร์หรือตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ” ได้ผลคูณสุดท้ายที่เรียกว่า “ปริมาณรังสียังผล” นั่นเอง ซึ่งสูตรในการคำนวณปริมาณรังสียังผลมีดังนี้

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (2.2)$$

โดย E คือ ปริมาณรังสีสมมูล (หน่วย Sv)

H_T คือ ปริมาณรังสีสมมูลของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะใด ๆ (หน่วย Gy)

W_T คือ ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ (ไม่มีหน่วย) ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ

ตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามชนิดเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ (Weighting factors for organs and tissues)	
อวัยวะสืบพันธุ์	0.20
ไขกระดูก ลำไส้ใหญ่ ปอด กระเพาะอาหาร	0.12
กระเพาะปัสสาวะ เต้านม ตับ หลอดอาหาร ไทรอยด์	0.05
ผิวหนัง ไขกระดูก	0.01
อวัยวะหรือเนื้อเยื่ออื่น ๆ	0.05

สรุปว่า ซีเวิร์ต เป็นหน่วยที่ ประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพจากการได้รับรังสี โดยเป็น “หน่วยเดียว” ที่บอกถึงความเสี่ยงของ “ผลชัดเจน” (stochastic effects) ที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากสถานการณ์รับรังสีที่เป็นไปได้ทุกอย่างแล้ว

2.3 อิเล็กตรอนและโฮล [6]

สารกึ่งตัวนำสมมูลที่อุณหภูมิ 0 K จะมีแถบเวเลนซ์ที่ถูกอิเล็กตรอนครองจนเต็มและแถบการนำที่ว่างเปล่า จึงไม่มีพาหะนำประจุ แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 K พันธะโคเวเลนซ์บางพันธะในผลึกสารกึ่งตัวนำจะถูกทำลาย อิเล็กตรอนเวเลนซ์บางตัวจะถูกปลดปล่อยให้เป็นอิสระ กลายสภาพจากอิเล็กตรอนในพันธะไปเป็นอิเล็กตรอนนำ คือ ถูกถ่ายโอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำ แต่ละพันธะที่ถูกทำลายจะก่อกำเนิด (generate) อิเล็กตรอนนำ 1 ตัวในแถบการนำและสถานะพลังงานว่างเปล่า 1 สถานะในแถบวาเลนซ์ สถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ที่ว่างเปล่าหรือไม่ถูกครอบครองเรียกว่าโฮล (hole) แปลตรงตามตัวอักษรว่า “ช่องว่าง” อิเล็กตรอนนำคือพาหะนำประจุลบ โฮลคือพาหะนำประจุบวก อิเล็กตรอนนำที่เคลื่อนที่เข้าใกล้โฮลอาจถูกจับยึด (capture) ได้ กลายสภาพจากอิเล็กตรอนนำกลับเป็นอิเล็กตรอนเวเลนซ์คืน การจับยึดอิเล็กตรอนนำโดยโฮลเทียบเท่ากับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากแถบการนำกลับไปยัง แถบเวเลนซ์เรียกว่า การผสมกลับ (recombination)

อิเล็กตรอนและโฮลมักจะก่อกำเนิดเป็นคู่ๆ จึงเรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) การก่อเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำเกิดจาก 2 กลไกหลัก ได้แก่ การก่อกำเนิดโดยความร้อน (thermal generation) และโดยแสง (optical generation) กลไกแรกเป็นการทำลายพันธะโคเวเลนซ์โดยพลังงานความร้อน เนื่องจากอิเล็กตรอนเวเลนซ์สะสมพลังงานความร้อนโดยการกระเจิงกับโฟนอนจนกระทั่งมีพลังงานสูงกว่า E_G จึงถ่ายโอนไปยังแถบการนำได้ กลไกหลังเป็นการทำลายพันธะโคเวเลนซ์ โดยพลังแสง โฟตอนที่ มีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับ E_G สามารถทำลายพันธะโคเวเลนซ์ได้

2.4 สภาพนำและสภาพต้านทาน [6]

เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกไบแอสด้วยแรงดัน V หรือสนามไฟฟ้า ξ อิเล็กตรอนจะถูกลำเลียงจากขั้วลบไปยังขั้วบวกด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_n โฮลจะถูกลำเลียงจากขั้วบวกไปยังขั้วลบด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_p โดย v_n และ v_p แปรตามความเข้มของสนามไฟฟ้า ξ ด้วยสัดส่วนการแปรผกผัน μ_n และ μ_p ตามลำดับ ความหนาแน่นกระแสลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน (electron drift current density , $J_{n-drift}$) และของโฮล (hole drift current density , $J_{p-drift}$) จึงมีค่าตามลำดับ คือ

$$J_{n-drift} = -nqv_n = nq\mu_n\xi = \frac{nq^2\tau_n}{m_n^*}\xi \quad (2.3)$$

$$J_{p-drift} = +pqv_p = pq\mu_p\xi = \frac{pq^2\tau_p}{m_p^*}\xi \quad (2.4)$$

ผลรวมของความหนาแน่นกระแสลอยเลื่อนทั้งสองจึงมีค่าสุทธิ

$$J_{drift} = J_{n-drift} + J_{p-drift} = \sigma \xi \quad (2.5)$$

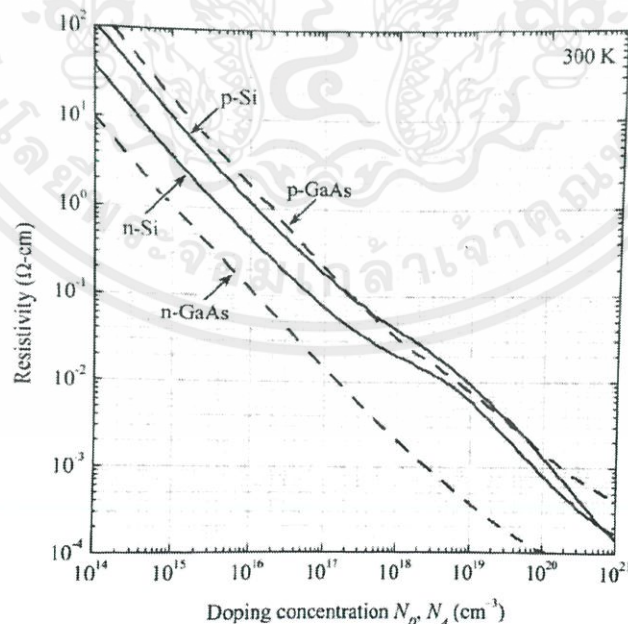
เมื่อ σ คือ สภาพนำของสารกึ่งตัวนำอันเนื่องมาจากการลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน σ_n และโฮล σ_p ดังคำจำกัดความ

$$\sigma \equiv \sigma_n + \sigma_p \quad \text{เมื่อ} \quad \begin{cases} \sigma_n = nq\mu_n = \frac{nq^2\tau_n}{m_n^*} \\ \sigma_p = pq\mu_p = \frac{pq^2\tau_p}{m_p^*} \end{cases} \quad (2.6)$$

ส่วนกลับของสภาพนำ คือ สภาพต้านทาน

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} = \frac{1}{q^2} \left(\frac{m_n^*}{n\tau_n} + \frac{m_p^*}{p\tau_p} \right) \quad (2.7)$$

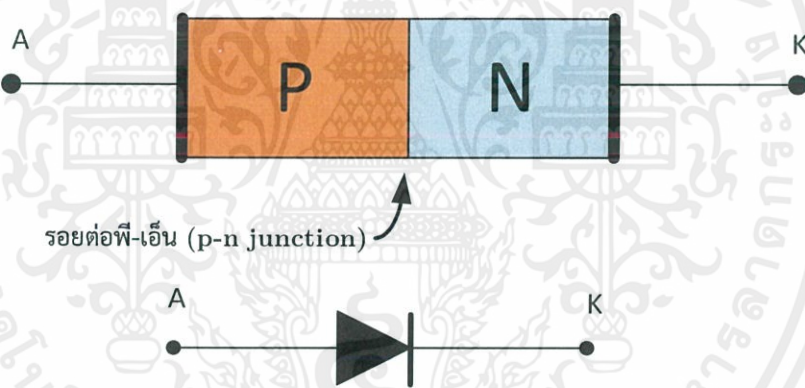
ซึ่งแปรผกผันกับความเข้มข้นพาหะ ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์สภาพต้านทาน-ความเข้มข้นของสารเจือใน Si และ GaAs ในรูปที่ 2.1 โดยเฉพาะในย่านความเข้มข้นต่ำ-ปานกลาง (ด้านซ้ายและช่วงกลางของกราฟ) ในขณะที่ความไม่เป็นเชิงเส้นในย่านความเข้มข้นสูง (ด้านขวา) เกิดจากการกระเจิงแถบสารเจือที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานกับความเข้มข้นของสารเจือใน Si และ GaAs แบบชนิด p และ n ที่อุณหภูมิห้อง

2.5 รอยต่อพี-เอ็น

วิธีการที่จะนำสารกึ่งตัวนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และมีประโยชน์อย่างยิ่งก็คือ การเติมอะตอมสารเจือ (impurity atoms) ลงไปในสารกึ่งตัวนำ เพื่อทำให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ชนิดพี (p-type) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) จากนั้นจึงนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็น นี้ไปใช้สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และนิยมเรียกว่า “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ” (semiconductor devices) ซึ่งอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างซึ่งง่ายที่สุด คือ โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) ซึ่งได้แก่ ไดโอดชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเรียกว่า “แอโนด” (Anode) หรือขั้วบวก และขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เรียกว่า “แคโทด” (Cathode) หรือขั้วลบ ที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็น ถูกเรียกว่า “รอยต่อพี-เอ็น” หรือ “p-n junction” ที่รอยต่อพี-เอ็นนี้จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี [7]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างง่ายๆของรอยต่อพี-เอ็น และสัญลักษณ์ของไดโอด

ยิ่งไปกว่านั้น รอยต่อพี-เอ็น ยังเป็นโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ที่มีรอยต่อรอยต่อพี-เอ็นมากกว่าหนึ่งรอยต่อ เช่น ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor) , ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Effect Transistor) , ไทริสเตอร์ (Thyristor) และ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติและทฤษฎีของรอยต่อพี-เอ็น จึงมีความสำคัญมาก เพราะความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้ง่ายต่อการศึกษาและเข้าใจการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ แม้ว่าสิ่งประดิษฐ์นั้นๆ จะมีโครงสร้างซับซ้อนและยุ่งยากเพียงใดก็ตาม [7]

2.5.1 ภาวะสมดุล [6]

ก่อนการสร้างรอยต่อ ด้าน p และ n ของสารกึ่งตัวนำไม่สัมผัสกัน แผนภาพแถบพลังงานของด้านทั้งสองจึงเป็นอิสระจากกันดังรูปที่ 2.3 (ก) ด้าน p มีโฮลในแถบเวเลนซ์มาก แต่มีอิเล็กตรอนในแถบการนำน้อย ระดับ E_F จึงอยู่ใกล้กับ E_V ในทางตรงกันข้าม ด้าน n มีอิเล็กตรอนในแถบการนำมาก แต่มีโฮลในแถบเวเลนซ์น้อย ระดับ E_F จึงอยู่ใกล้กับ E_C เมื่อด้าน p และ n สัมผัสกัน เกรเดียนต์ความเข้มข้นของพาหะจะทำให้

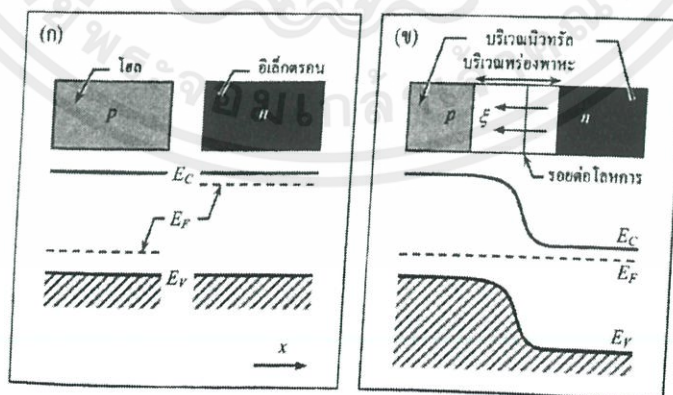
ก) อิเล็กตรอนแพร่จากด้าน n ไป p ส่งผลให้ประจุค้าง (space charge) ในด้าน n เนื่องจากอิเล็กตรอนได้แพร่ออกจากด้าน n ไปยังด้าน p แต่ไอออนบวกของตัวให้ยังคงค้างอยู่ในด้าน n

ข) โฮลแพร่จากด้าน p ไป n ส่งผลให้เกิดประจุค้างในด้าน p เนื่องจากโฮลได้แพร่ออกจากด้าน p ไปยังด้าน n แต่ไอออนลบของตัวรับยังคงค้างอยู่ในด้าน p ระบายที่สารกึ่งตัวนำแบบชนิด p และ n สัมผัสกันเรียกว่ารอยต่อโลหการ (metallurgical junction) ล้อมรอบโดยบริเวณประจุค้าง (space charge region) ที่แทบไม่มีพาหะอิสระหลงเหลืออยู่ จึงเรียกอีกอย่างว่า บริเวณพร่องพาหะ (depletion region) ซึ่งถูกล้อมรอบโดยบริเวณนิวทรัล (neutral region) ซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้าอีกต่อหนึ่ง ประจุค้างด้าน n และ p สามารถผลักหรือดึงดูดพาหะอิสระได้ บริเวณประจุค้างจึงมีสนามไฟฟ้าด้วยตัวของมันเอง เรียกว่าสนามไฟฟ้าในตัว (built-in field, ξ) มีทิศจากไอออนบวกไปลบ คือ จากด้าน n ไปยังด้าน p (ทิศ $-x$) ดังรูปที่ 2.3 (ข)

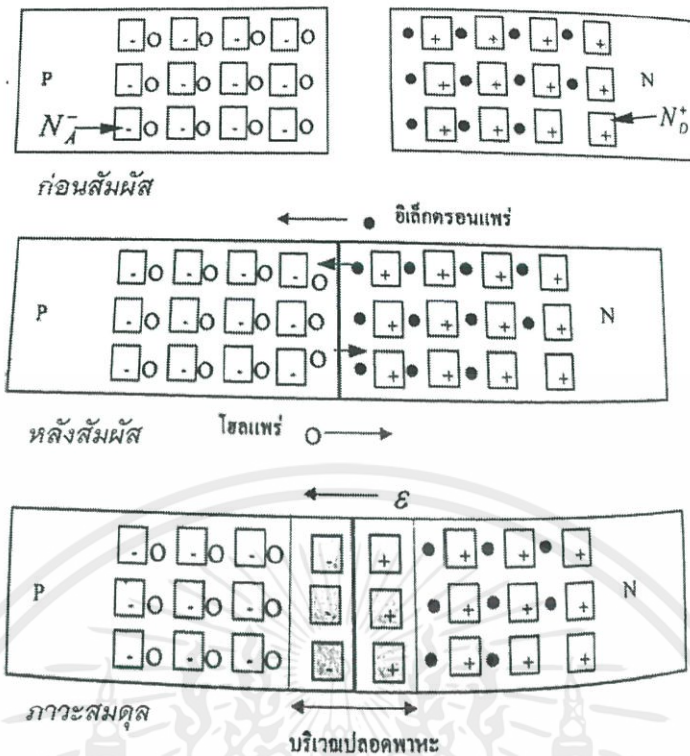
ค) สนามไฟฟ้างกล่าวสามารถทำให้ อิเล็กตรอนลอยเลื่อนจากด้าน p ไป n

ง) สนามไฟฟ้างกล่าวสามารถทำให้ โฮลลอยเลื่อนจากด้าน n ไป p สวนทางกับการแพร่ดัง ก) และ

ข) ข้างต้นตามลำดับ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงโครงสร้างและแผนภาพแถบพลังงาน ของสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ในสถานะ (ก) แยกจากกัน และ (ข) เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 2.4 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับรอยสัมผัสพี-เอ็น [7]

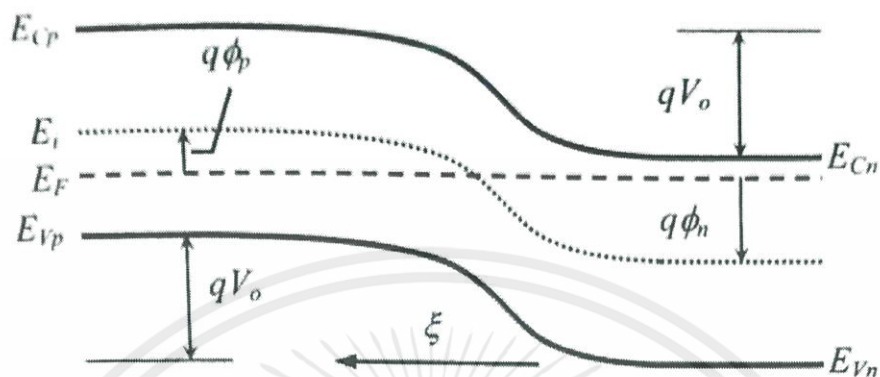
ในภาวะสมดุล การแพร่และการลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนและโฮลจะถ่วงดุลกัน หักล้างกันโดยบริบูรณ์ ส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน J_n ความหนาแน่นกระแสโฮล J_p และความหนาแน่นกระแสรวม J_{total} ต่างมีค่าเป็นศูนย์ คือ

$$\begin{aligned}
 J_n &= J_{n-drift} + J_{n-diff} = 0 \\
 J_p &= J_{p-drift} + J_{p-diff} = 0 \\
 J_{total} &= J_n + J_p = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

2.5.2 ศักย์สัมผัส [6]

ศักย์สัมผัส (contact potential) หรือศักย์ในตัว (built-in potential) V_o , V_{bi} เป็นศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมรอยต่อ ซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้นภายใน มิได้ถูกป้อนจากภายนอก แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อ p-n ในภาวะสมดุล ดังรูปที่ 2.5 แสดงกำแพงพลังงาน qV_o ที่อิเล็กตรอนในบริเวณนิวทรัลทางด้าน n จะต้องปีนข้าม หากต้องการแพร่ไปยังด้าน p ซึ่งมีขนาดเท่ากับกำแพงพลังงานที่โฮลในบริเวณนิวทรัลทางด้าน p จะต้องปีนข้าม หากต้องการแพร่ไปยังด้าน n กำแพงพลังงานหรือกำแพงศักย์มีหน่วยเป็น eV อิเล็กตรอนในด้าน n จะต้องมีพลังงานจลน์ $|E - E_{Cn}|$ สูงกว่ากำแพงศักย์ qV_o จึงจะสามารถแพร่ไปยังด้าน p ได้ มิเช่นนั้น จะถูก

ถ้าจัดบริเวณอยู่แต่เพียงด้าน n เช่นเดียวกัน โวลในด้าน p จะต้องมืพลังงานจลน์ $|E - E_{Vp}|$ สูงกว่า qV_o จึงจะแพร่ไปด้าน n ได้



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงพลังงานของรอยต่อ p-n ในภาวะสมดุล แสดงศักย์สัมผัส V_o และศักย์ไฟฟ้าสถิตในด้านเอ็น ϕ_n และพี ϕ_p

ระดับแฟร์มี E_F ในแผนภาพแถบพลังงานดังรูปที่ 2.5 ถูกแสดงเป็นเส้นประที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับระยะทาง คือ $dE_F/dx = 0$ เนื่องจากรอยต่อพยายามที่จะรักษาสสมดุล พิสูจน์ได้ดังนี้ จากสมการที่ 2.8 พิจารณาเงื่อนไขความหนาแน่นกระแสโฮลเป็นศูนย์ กล่าวคือ

$$J_p(x) = q \left[\mu_p p(x) \xi(x) - D_p \frac{dp(x)}{dx} \right] = 0 \quad (2.9)$$

ดังนั้น

$$\frac{\mu_p}{D_p} \xi(x) = \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx} \quad (2.10)$$

แต่จาก

$$p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT} \quad (2.11)$$

จะได้

$$\frac{dp}{dx} = \frac{p}{kT} \left(\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right) \quad (2.12)$$

และจาก

$$\xi(x) \equiv -\frac{dV(x)}{dx} = -\frac{d}{dx} \left[\frac{E_i(x)}{-q} \right] = \frac{1}{q} \frac{dE_i(x)}{dx} \quad (2.13)$$

จะสามารถเขียนสมการที่ 2.10 ได้ใหม่ในรูป

$$\frac{\mu_p}{D_p} \left(\frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \right) = \frac{1}{kT} \left(\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right) \quad (2.14)$$

แต่จากความสัมพันธ์โวนส์ไตน์ ($D/\mu = kT/q$) สมการที่ 2.14 จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ

$$\frac{dE_F}{dx} = 0 \quad (2.15)$$

กล่าวคือ รอยต่อสมดุลงจะมี E_F ที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับระยะทางตลอดรอยต่อ เงื่อนไข $dE_F/dx = 0$ ข้างต้นพิจารณาจากเงื่อนไข $J_p = 0$ และหากพิจารณาจากเงื่อนไข $J_p = 0$ ก็จะได้ผลเช่นเดียวกัน

อิเล็กตรอนในบริเวณนิวทรัลของด้าน n และ p มีพลังงานศักย์ต่างกัน qV_o (หน่วย : eV) หรือกล่าวได้ว่า รอยต่อมีศักย์สัมผัส V_o (หน่วย : V) ซึ่งคำนวณได้จากผลต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าสถิตในด้านที่ ϕ_p กับด้านอื่น ϕ_n ดังรูปที่ 2.5 คือ

$$V_o \equiv \phi_p - \phi_n \begin{cases} q\phi_p = E_i - E_F \\ q\phi_n = E_i - E_F \end{cases} \quad (2.16)$$

จากรูปจะเห็นได้ว่า ϕ_p เป็นบวกเนื่องจาก $E_i > E_F$ ในขณะที่ ϕ_n เป็นลบเนื่องจาก $E_i < E_F$ เมื่อแทน ϕ_p จากสมการที่ 2.16 ลงใน 2.11 จะได้

$$N_A = n_i \exp(q\phi_p/kT) \quad (2.17)$$

เมื่อ N_A คือความเข้มข้นของตัวรับในด้าน p ภายใต้สมมุติฐานการแตกตัวเป็นไอออนสมบูรณ์ ϕ_p จึงแปรผันกับ N_A ดังความสัมพันธ์

$$\phi_p = + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (2.18)$$

นอกจากนี้จะพิสูจน์ได้เช่นกันว่า ϕ_n แปรผันกับความเข้มข้นของตัวให้ N_D ในด้าน n ดังความสัมพันธ์

$$\phi_n = - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) \quad (2.19)$$

ดังนั้น

$$V_o \equiv \phi_p - \phi_n = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \quad (2.20)$$

ศักย์สัมผัสของรอยต่อจึงถูกกำหนดโดยอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารเจือในด้านทั้งสอง และช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ศักย์สัมผัส V_o เป็นผลมาจากการรักษาสมดุลภาพหรือความเป็นกลางทางไฟฟ้าของทั้งรอยต่อ เป็นแรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นภายในโครงสร้างไม่อาจใช้โวลต์มิเตอร์มาวัดค่าได้ หากนำโพรบของโวลต์มิเตอร์มาสัมผัสกับรอยต่อ p-n จะเกิดศักย์สัมผัสระหว่างโลหะ (โพรบ)-สารกึ่งตัวนำที่หักล้างกับ V_o โดยปริบูรณ์ ทำให้ความต่างศักย์คร่อมโพรบ (+)-สารกึ่งตัวนำด้าน p-สารกึ่งตัวนำด้าน n-โพรบ (-) เป็นศูนย์ การวัดค่า V_o โดยตรงด้วยโวลต์มิเตอร์จึงสามารถกระทำได้ แต่อาจทำได้โดยอ้อมด้วยมัลติมิเตอร์ที่วัดแรงดันที่กระแสต่ำๆ (จะให้ผล $\sim V_o$)

2.5.3 บริเวณพร่องพาหะ [6]

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ (depletion width, W) กำหนดได้จากผลรวมของความกว้างของบริเวณประจุค้างในด้าน x_n และ x_p คือ

$$W = x_n + x_p \quad (2.21)$$

ขนาดของ W สำคัญยิ่งต่อการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์และตัวตรวจวัดพลังแสง W จะขึ้นกับพารามิเตอร์หลักคือ V_o , N_A และ N_D ซึ่งพิสูจน์ได้ดังนี้

จากค่ากำลังความของสนามไฟฟ้า $\xi(x) \equiv -dV(x)/dx$ จะสามารถกำหนดศักย์สัมผัสของรอยต่อ p-n ได้จาก

$$V_o = \int_{-x_p}^{x_n} \xi(x) dx \quad (2.22)$$

หรือจากพื้นที่ใต้กราฟ $\xi - x$ ซึ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีฐานกว้าง W และสูง ξ_o ดังนั้น

$$V_o = -\frac{1}{2}\xi_o W = \frac{q}{2\epsilon} N_D x_n W = \frac{q}{2\epsilon} N_A x_p W \quad (2.23)$$

นอกจากนี้ $N_D x_n = N_A x_p$ และ สมการที่ 2.21 ดังนั้น

$$x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} W \quad \text{และ} \quad x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} W \quad (2.24)$$

เมื่อนำ x_n และ x_p ข้างต้นกลับไปแทนในสมการที่ 2.23 จะได้

$$V_o = \frac{q}{2\epsilon} \left(\frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \right) W^2 \quad (2.25)$$

หรือ

$$W = \left[\frac{2\epsilon V_o}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{1/2} = \left[\frac{2\epsilon V_o}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

โดยทั่วไปรอยต่อ p-n ที่ถูกไบแอสด้วยแรงดัน V จะมีความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ W ที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเดียวกับสมการ 2.26 ได้ดัง

$$W = \left[\frac{2\epsilon(V_o - V)}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (2.27)$$

2.5.4 ความจุรอยต่อ [6]

ความจุรอยต่อ (junction capacitance, C_j) หรือความจุชั้นพร่องพาหะ (depletion layer capacitance) เกิดจากประจุค้างในรอยต่อที่เปลี่ยนแปลงตามไบแอสโดยเฉพาะเมื่อยรอยต่อถูกไบแอสย้อนกลับ เมื่อแรงดันย้อนกลับเปลี่ยนแปลงไป ΔV_R ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ (depletion width) ก็จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นระยะที่กำหนดได้จากสมการที่ 2.27 ขอบของบริเวณพร่องพาหะจะร่นเข้าสู่รอยต่อโลหะการหาก ΔV_R ลดลง หรือผลออกหาก ΔV_R เพิ่มขึ้น และ จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้า ประจุค้างในด้านเอ็น Q_n และ ด้านพี Q_p จะเท่ากันเสมอคือ

$$|Q| = |Q_p| = |Q_n| = qAx_n N_D = qAx_p N_A = qA \left(\frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \right) W \quad (2.28)$$

เมื่อแทนค่า W จากสมการที่ 2.27 ลงไป และเขียนแรงดันคร่อมรอยต่อในรูป $V_j = V_o - V$ จะได้

$$|Q| = A \left[2q\epsilon V_j \left(\frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \right) \right]^{1/2} \quad (2.29)$$

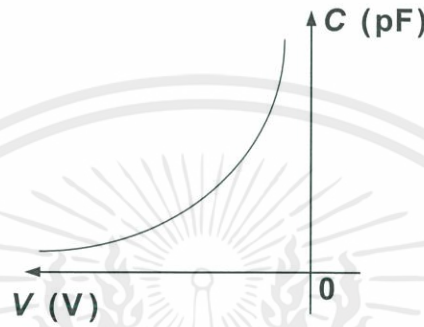
ความจุรอยต่อสามารถกำหนดได้จากอนุพันธ์ของ Q เทียบกับ V_j ดัง

$$C_j \equiv \frac{d|Q|}{dV_j} = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon}{V_j} \left(\frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \right) \right]^{1/2} = A \left[\frac{q\epsilon}{2V_j} \left(\frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \right) \right]^{1/2} = \frac{\epsilon A}{W} \quad (2.30)$$

ซึ่งอยู่ในรูปเดียวกับความจุของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (parallel plate capacitor) ที่มีพื้นที่ A มีระยะห่างระหว่างแผ่น W และมีฉนวนคั่นแผ่นที่มีสภาพยอม ϵ

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

$$C_j \approx A \left[\frac{q\epsilon}{2(V_o - V)} N_D \right]^{1/2} \quad (2.31)$$



รูปที่ 2.6 ลักษณะเฉพาะ $C - V$ ของไดโอด

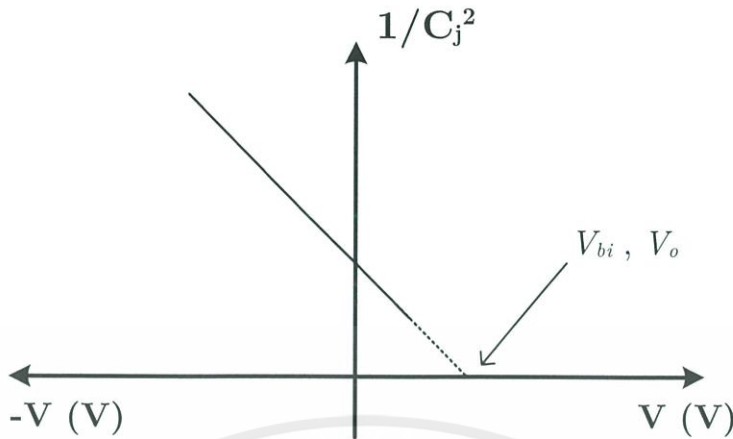
หาก $V_R \gg V_o$ จะได้ $V_j = V_o + V_R \approx V_R$ ส่งผลให้ $C_j \propto 1/\sqrt{V_R}$ ดังแนวโน้มที่ปรากฏในรูปที่ 2.6 ผลจากการวัดลักษณะเฉพาะ $C - V$ ของไดโอดมักถูกนำมาประมวลผลเพื่อแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟ $(1/C^2) - V$ จากสมการที่ 2.31 จะพิสูจน์ได้ว่า

$$\left(\frac{1}{C_j} \right)^2 = \frac{2V_j}{q\epsilon A^2 N_D} = \frac{2(V_o - V)}{q\epsilon A^2 N_D} \quad (2.32)$$

ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง $1/C^2$ กับ V กราฟ $(1/C^2) - V$ จะเป็นเส้นตรง มีความชัน $2/q\epsilon A^2 N_D$ และตัดแกน V ที่ V_o การวัดลักษณะเฉพาะ $(1/C^2) - V$ ของรอยต่อจึงสามารถกำหนดค่า N_D และ V_o ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 อย่างไรก็ตามวิธีนี้ใช้ได้กับรอยต่อข้างเดียวเท่านั้น เช่น $p^+ - n$ ที่ด้าน n ถูกเจืออย่างสม่ำเสมอ หากความเข้มข้นของสารเจือเปลี่ยนแปลงกับระยะทาง เช่นในรอยต่อแบบแพร่ (diffused junction) ความเข้มข้นของสารเจือ ณ ตำแหน่ง W จะสามารถกำหนดได้จากความชันของกราฟ $(1/C^2) - V$ ดัง

$$N_D(W) = \frac{2}{q\epsilon A^2 \left[\frac{d(1/C_j^2)}{dV} \right]} \quad (2.33)$$

โดยอาศัยสมการที่ 2.30 ในการหาตำแหน่งของ W ไปพร้อมๆกัน



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(1/C^2)$ และ V [7]

2.5.5 ภายใต้การไบแอสไปข้างหน้า

ภาวะไม่อุดมคติของไดโอดจริงภายใต้การไบแอสไปข้างหน้าสามารถจำแนกออกเป็น 3 ช่วงตามขนาดของไบแอสและกลไกที่เกิดขึ้น ได้แก่ ก) ช่วงไบแอสระดับต่ำ เกิดกระแสสมกลับในบริเวณพร่องพาหะ ข) ช่วงไบแอสระดับปานกลาง เกิดแรงดันตกคร่อมบริเวณกึ่งนิวทรัล และ ค) ช่วงไบแอสระดับสูง เกิดการฉีดพาหะระดับสูง ดังนี้ [6]

2.5.5.1 กระแสสมกลับบริเวณพร่องพาหะ [6]

สมมุติฐานของไดโอดในอุดมคติคือ “บริเวณประจุค้างไม่มีการก่อกำเนิดหรือผสมกลับพาหะกระแสอิเล็กตรอนและโฮลคงตัวตลอดบริเวณ” ในความเป็นจริง การไบแอสไปข้างหน้าส่งผลให้พาหะจำนวนมากถูกขนถ่ายผ่านบริเวณพร่องพาหะ เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลจำนวนมากเคลื่อนที่สวนทางกัน ในบริเวณพร่องพาหะก็ย่อมมีโอกาสที่จะผสมกลับ สมมุติฐานว่าเขียนเป็นสมการได้คือ $J_r = 0$ แต่ในความเป็นจริง $J_r \neq 0$ หากระดับผสมกลับ E_r อยู่ที่กึ่งกลางของช่องว่างพลังงานพอดี้ ($E_r = E_i$) จะพิสูจน์ได้ว่า J_r แปรผันกับ $\exp(qV/2kT)$ ความหนาแน่นกระแสไปข้างหน้าสุทธิ J_F จึงเป็นผลรวมของความหนาแน่นกระแสแพร่ในอุดมคติ J_{diff} ซึ่งแปรผันกับ $\exp(qV/kT)$ กับความหนาแน่นผสมกลับ J_r ดัง

$$J_F = J_o \exp(qV/kT) + J_{ro} \exp(qV/2kT) \quad (2.34)$$

เมื่อ $J_o \propto n_i^2$ และ $J_{ro} \propto W n_i$ เมื่อ $W \propto \sqrt{V_o - V}$

ผลกระทบของ J_r ที่มีต่อไดโอดที่ถูกสร้างจากสารกึ่งตัวนำ เช่น Ge, Si และ (Al)GaAs จะแตกต่างกันตามขนาดช่องว่างพลังงาน E_G เนื่องจากความเข้มข้นพาหะอินทรินซิก n_i เป็นฟังก์ชันที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของ E_G และ Ge มีช่องว่างพลังงาน 0.67 eV ซึ่งต่ำที่สุดในบรรดาสารกึ่งตัวนำทั้งสาม จึงมี n_i ที่สูงที่สุด การที่ $J_o \propto n_i^2$ แต่ $J_{ro} \propto n_i$ ทำให้สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแคบหรือมี n_i สูงจะมี $J_o \gg J_{ro}$ หรือ $J_{diff} \gg J_r$ ดังนั้น $J_F \cong J_{diff}$ สมการไดโอดอุดมคติจึงอธิบายเส้นโค้ง I-V ของไดโอด Ge ได้เป็นอย่างดี ส่วน Si และ (Al)GaAs ต่างมีช่องว่างพลังงานสูง มี n_i ต่ำ และ J_o อาจต่ำกว่า J_{ro} ก็เป็นไปได้ โดยเฉพาะในช่วงไบแอสต่ำๆ ที่พาหะแพร่ยังมีความเข้มข้นไม่สูงนัก ค่าสัมพัทธ์ระหว่าง J_{diff} กับ J_r จึงขึ้นอยู่กับขนาดของการไบแอส ที่ไบแอสต่ำ $J_r > J_{diff}$ เนื่องจาก $J_{ro} > J_o$ ผลกระทบของ V ที่มีต่อ $\exp(qV/kT)$ และ $\exp(qV/2kT)$ ยังไม่มาก แต่เมื่อไบแอสถูกปรับสูงขึ้น $J_o \exp(qV/kT)$ จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่รวดเร็วกว่า $J_{ro} \exp(qV/2kT)$ ส่งผลให้ $J_{diff} > J_r$

การที่กลไกการผสมกลับในบริเวณพร่องพาหะซึ่งให้ความหนาแน่นกระแส J_r ที่แปรผันกับ $\exp(qV/2kT)$ เป็นพจน์เด่นที่ไบแอสต่ำ และกลไกการแพร่ซึ่งให้ความหนาแน่นกระแส J_{diff} ที่แปรผันกับ $\exp(qV/kT)$ เป็นพจน์เด่นที่ไบแอสสูง จึงทำให้สมการไดโอดอุดมคติไม่สามารถอธิบายเส้นโค้ง I-V ของไดโอด Si และ (Al)GaAs ได้ตลอดช่วงการไบแอส เพื่อให้สมการไดโอดอุดมคติสามารถนำไปใช้ได้กับไดโอดสารกึ่งตัวนำหลายชนิด จึงมักเขียนอยู่ในรูปทั่วไป คือ

$$J = J_S (e^{qV/\eta kT} - 1) \quad (2.35)$$

เมื่อ η คือแฟกเตอร์อุดมคติ (ideality Factor) และ J_S คือความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งต่างจาก J_o เนื่องจาก J_o คือความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับในอุดมคติที่ได้ละเลยการผสมกลับในบริเวณพร่องพาหะโดยสิ้นเชิง แต่ J_S ได้รวมเอาไว้ด้วย

ไดโอด Ge จะมีค่า $\eta = 1$ (ค่าอุดมคติ) ตลอดช่วงการไบแอสไปข้างหน้า ในขณะที่ไดโอด AlGaAs และ Si จะมี $\eta = 2$ ที่ไบแอสต่ำๆ ซึ่งจะลดลงเหลือ 1 ที่ไบแอสปานกลาง และ ที่ไบแอสสูงๆ η จะเพิ่มขึ้น (เบี่ยงเบนจากอุดมคติมากขึ้น)

2.5.5.2 แรงดันตกคร่อมบริเวณนิวทรัล

สมมุติฐานของไดโอดอุดมคติคือ “บริเวณกึ่งนิวทรัลเป็นบริเวณสมคักย์ ไม่มีความต่างศักย์ตกคร่อม หรือไม่มีสนามไฟฟ้าพาดผ่าน ไบแอสที่ป้อนให้แก่รอยต่อจะตกคร่อมบริเวณประจุค้างทั้งหมด” แต่ความจริงบริเวณกึ่งนิวทรัลมีกระแสลอยเลื่อน จึงอนุมานได้ว่าบริเวณดังกล่าวจะต้องมีสนามไฟฟ้าพาดผ่าน คือมีแรงดันตกคร่อม เมื่อกระแส I สูงขึ้น แรงดันตกคร่อม (IR) จึงต้องมีค่าสูงขึ้นตาม ผลคือ แรงดันตกคร่อมบริเวณพร่องพาหะจะไม่ได้เพิ่มขึ้นเท่ากับแรงดันจากภายนอกที่เพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นด้วยสัดส่วนที่ลดลงกับกระแส หาก

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณกึ่งนิวทรัล (IR) มีได้ต่ำกว่าแรงดันที่ตกคร่อมบริเวณพร่องพาหะมากๆ สมการกระแสของไดโอดจะต้องหักลบผลของแรงดันที่สูญเสียไปด้วยดัง [6]

$$J = J_o [e^{q(V-IR)/kT} - 1] \quad (2.36)$$

เมื่อ $I = JA$ และ R คือผลรวมของความต้านทานบริเวณกึ่งนิวทรัลในทั้งสองด้านของรอยต่อ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อ I เพิ่มขึ้น ความชันของกราฟ $J-V$ หรือ $I-V$ จึงลดลง เบี่ยงเบนจากอุดมคติมากขึ้น

ในภาวะกระแสสูงนี้สามารถประมาณได้ดังสมการที่ 2.37

$$I \cong I_o e^{qV/kT} \approx I_o e^{q(V-IR)/kT} \quad (2.37)$$

ในทางปฏิบัติจะได้

$$I \propto e^{q(V-IR)/2kT}$$

กรณีของรอยต่อ p⁺-n อาจประมาณได้ว่า [7]

$$I_{high} = \frac{2AqD_p n_i}{L_p} e^{qV_j/2kT} \quad (2.38)$$

2.5.5.3 การฉีดระดับสูง [6]

สมมุติฐานของไดโอดอุดมคติคือ “พาหะข้างมากไม่ถูกกระทบจากไบแอส พาหะข้างน้อยที่ถูกฉีด (แพร่) ข้ามรอยต่อมีความเข้มข้นต่ำมากเมื่อเทียบกับพาหะข้างมาก” ซึ่งจะเป็นจริงเฉพาะกรณีที่ไดโอดถูกไบแอสต่ำๆ หากไดโอดถูกไบแอสไปข้างหน้า V ที่สูงกว่าแรงดันในตัว V_o มาก ความเข้มข้นของพาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดข้ามรอยต่ออาจอยู่ในระดับเดียวกับพาหะข้างมากของฝั่งที่ถูกฉีดเข้าไป โดยทั่วไปด้านที่รับพาหะส่วนเกินจะพยายามรักษาสภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้า ด้วยการเพิ่มพาหะข้างมากเพื่อถ่วงดุลหรือหักล้างประจุของพาหะส่วนเกินเสมอ เช่น ในการไบแอสไปข้างหน้า โหลจากด้าน p ที่ถูกฉีดมายัง x_n ด้วยความเข้มข้น Δp_n ทำให้ด้าน n ต้องหากทางเพิ่มความเข้มข้นของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งเดียวกันให้เป็นไปตามเงื่อนไข $\Delta n_n = \Delta p_n$ แต่สมมุติฐานที่ 5 กำหนดว่า $\Delta n_n \ll n_n$ (และ $\Delta p_p \ll p_p$) ทำให้ Δn_n และ Δp_p ถูกละเลยในการพิสูจน์สมการไดโอด ในการฉีดระดับสูง (high-level injection) พาหะส่วนเกินอาจมีความเข้มข้นสูงกว่าพาหะข้างมาก คือ $\Delta n_n > n_n$ และ $\Delta p_p > p_p$ ทำให้ผลคูณของความเข้มข้นพาหะทั้งสอง ณ ขอบของบริเวณพร่องพาหะมีค่าเป็น

$$pn = p(-x_p)n(-x_p) = p(x_n)n(x_n) = n_i^2 e^{(F_n - F_p)/kT} = n_i^2 e^{qV/kT}$$

เช่น ที่ขอบของบริเวณพร่องพาหะที่ติดด้าน p ($x = -x_p$) จะมีค่าเป็น

$$(p_p + \Delta p_p)(n_p + \Delta n_p) = n_i^2 e^{qV/kT} \quad (2.39)$$

ในการฉีกระดับสูง $\Delta p_p > p_p$ และ $\Delta n_p > n_p$ ด้านซ้ายมือของสมการที่ 2.39 จึงมีค่าประมาณ $\Delta p_p \cdot \Delta n_p$ แต่ภายใต้เงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของวัสดุคือ $\Delta p_p = \Delta n_p$ ทำให้สมการที่ 2.39 ลดความทับซ้อนลงเหลือ

$$\Delta n_p^2 \approx n_i^2 e^{qV/kT} \rightarrow \Delta n_p \approx n_i e^{qV/2kT}$$

อิเล็กตรอนส่วนเกินในด้าน p ของรอยต่อข้างต้นจะแพร่และผสมกลับกับโฮลเช่นเดียวกับการไบแอสในระดับต่ำตามปกติ ลักษณะการแจกแจงความเข้มข้น-ระยะทางจึงอยู่ในรูปแบบ

$$\delta n(x'_p) = \Delta n_p e^{-x'_p/L_n} = n_p (e^{qV/2kT} - 1) \cdot e^{-x'_p/L_n}$$

ดังนั้น ความหนาแน่นกระแสแพร่ของอิเล็กตรอนในด้าน p คือ

$$J_n(x'_p) = q \frac{D_n}{L_n} \delta n(x'_p) = q \frac{D_n}{L_n} n_p (e^{qV/2kT} - 1) \cdot e^{-x'_p/L_n} \quad (2.40)$$

ซึ่งแปรผัน $\exp(qV/2kT)$ ส่วนความหนาแน่นกระแสแพร่ของโฮลในด้าน n จะสามารถพิสูจน์ได้เช่นกันว่าแปรผันกับ $\exp(qV/2kT)$ ความหนาแน่นกระแสแพร่สุทธิของไดโอดทุกชนิดภายใต้การฉีกระดับสูงจึงแปรผันกับ $\exp(qV/2kT)$ ต่างจากค่าภายใต้การฉีกระดับปานกลางซึ่งแปรผันกับ $\exp(qV/kT)$ แต่จะคล้ายกับผลที่เกิดจากการผสมกลับในบริเวณพร่องพาหะ

2.5.6 กระแสอิมิตัวย้อนกลับในอูตมคติ [7]

ในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ $-V_A$ สมการกระแสที่ไหลผ่านไดโอดอาจพิจารณาได้จากสมการที่ 2.41

$$I_R = I_o (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.41)$$

โดยการแทนค่า V_A ด้วย $-V_A$ จะได้

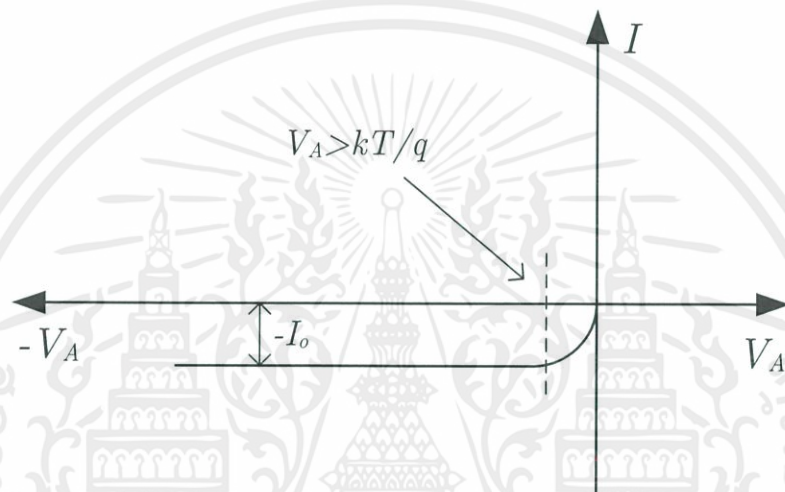
$$I_R = I_o (e^{-qV_A/kT} - 1)$$

ที่แรงดัน $-V_A$ ค่าสูงๆ เทอม จะมีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_R \approx -I_o = -qn_i^2 A \left(\frac{D_n}{L_n p_p} + \frac{D_p}{L_p n_n} \right) \quad (2.42)$$

เครื่องหมายลบในสมการที่ 2.42 แสดงทิศทางของกระแสซึ่งตรงข้าม หรือย้อนกลับกับกรณีของไบอัสตรง จะเห็นว่าในภาวะนี้ที่อุณหภูมิต่ำ จะมีกระแสในตัวค่าน้อยจำนวนหนึ่งไหลผ่านวงจร คุณสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อ ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ ดังสมการที่ 2.42 เขียนแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันในอุดมคติขณะไบอัสย้อน

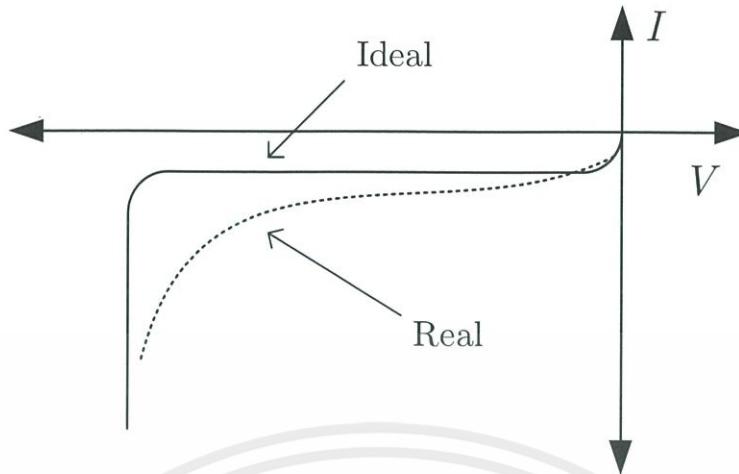
ในกรณีของรอยต่อแบบ $p^+ - n$ ซึ่ง $p_p \gg n_n$ เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.42 จะได้

$$I_R = -qn_i^2 A \left(\frac{D_p}{L_p n_n} \right) \quad (2.43)$$

และกรณีของรอยต่อแบบ $p - n^+$ ซึ่ง $p_p \ll n_n$ จะได้

$$I_R = -qn_i^2 A \left(\frac{D_n}{L_n p_p} \right) \quad (2.43)$$

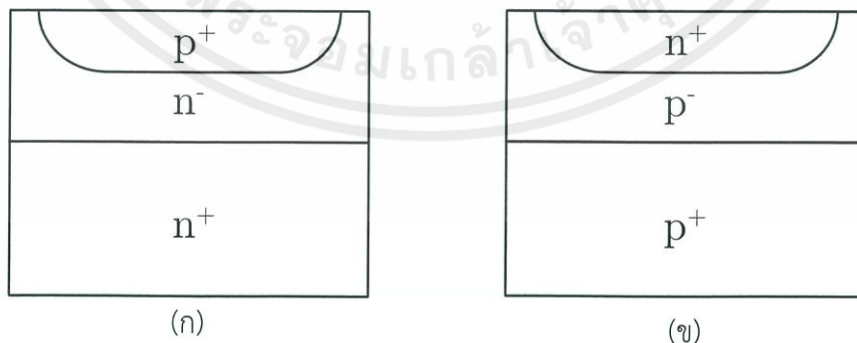
สมการไดโอดในอุดมคติ ตามสมการที่ 2.42 เมื่อถูกนำมาเขียนกราฟเทียบกับข้อมูลกระแสและแรงดันจริง จะได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบกราฟกระแสและแรงดัน ในอุดมคติกับในความจริง

2.6 พินไดโอด (PIN diode) [7]

การสร้างไดโอดแบบรอยต่อ $p^+ - n^-$ หรือ รอยต่อ $n^+ - p^-$ มักมีปัญหาในการสร้างขั้วสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact) เนื่องจากเป็นรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ที่ซึ่งบางครั้งอาจมีคุณสมบัติเป็นเรกติไฟร์ (rectifier) ได้ เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว จึงนิยมให้เฉพาะส่วนปลายของด้านที่มีความเข้มข้นของสารเจือต่ำ ถูกเติมอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้น ดังนั้น ในกรณีขอไดโอดแบบรอยต่อ $p^+ - n^-$ กับแบบรอยต่อ $n^+ - p^-$ จึงมีลักษณะโครงสร้างจริงเป็น $p^+ - n^- - n^+$ และ $n^+ - p^- - p^+$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งคุณสมบัติของไดโอดจะยังคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.10 โครงสร้างพื้นฐานของพินไดโอด (ก) แบบ $p^+ - n^- - n^+$ และ (ข) แบบ $n^+ - p^- - p^+$

และถ้าส่วนที่อยู่ตรงกลางของไดโอดซึ่งเป็นส่วนที่มีอะตอมสารเจือปนน้อย มีขนาดสั้นๆ กล่าวคือสั้นกว่าระยะการแพร่ของพาหะส่วนน้อยแล้ว ในขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง ปริมาณของพาหะส่วนเกินที่ถูกฉีดเข้ามาในส่วนนี้จะส่งผลให้ความต้านทานของเนื้อสารลดลงหรือก็คือมีความนำไฟฟ้าสูงขึ้น ไดโอดจึงนำกระแสได้ดีกว่าปกติปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “conductivity modulation” และเป็นประโยชน์มากสำหรับไดโอดซึ่งทำงานที่กระแสสูงๆ อย่างไรก็ตาม ชั้นของไดโอดที่มีขนาดสั้นๆ อาจทำให้เกิดการ “พังก์ชรู” (punch through) ได้ง่ายขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

2.7 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับความผิดปกติเนื่องจากรังสี [8]

อนุภาคพลังงานสูงสามารถทำให้เกิดผลกระทบได้สองอย่างกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ นั่นคือ ความเสียหายจากการไอออนไนซ์ (ionization damage) และ ความเสียหายจากการหลุดออก (displacement damage) โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ ความเสียหายจากการไอออนไนซ์ เกิดจากการรบกวนพันธะทางไฟฟ้าในชั้น SiO₂ จนเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ซึ่งมีทั้งแบบที่ส่งผลในระยะสั้นและระยะยาว ความเสียหายในการไอออนไนซ์นั้น ขึ้นอยู่กับการถ่ายโอนพลังงานของโฟตอน (γ และ X-rays) ขณะที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสาร ซึ่งการถ่ายโอนพลังงานนั้นถูกกำหนดโดยฟังก์ชันการโอนพลังงานเชิงเส้น (Linear Energy Transfer หรือ LET) มีหน่วยเป็น MeV-cm²/g [9] ในสมการที่ 2.44

$$LET = \frac{1}{\rho_m} \frac{dE}{dx} \quad (2.44)$$

โดยที่

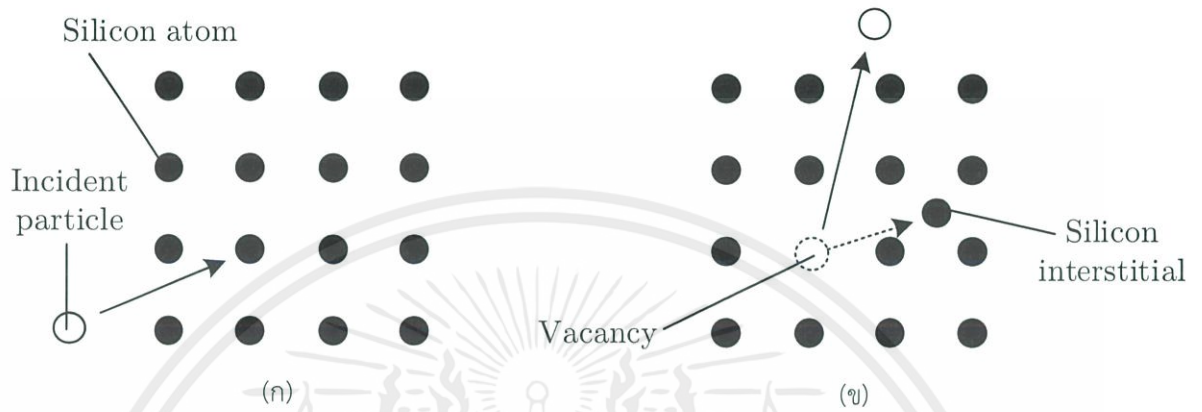
$$-\frac{dE}{dx} = 2Pq^4Z_1^2Z_2N_{at}\frac{M_2}{M_1}\frac{1}{E}\ln\left(\frac{4E}{E_{eh}}\right) \quad (2.45)$$

เมื่อ ρ_m คือ ค่าความหนาแน่นของวัสดุ , P คือ ค่า stopping number of the material , q คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน , Z_1 และ Z_2 คือ ค่า atomic charges ของอนุภาคที่ตกกระทบและของวัสดุเป้าหมาย , N_{at} คือ ค่าความหนาแน่นอะตอมของเป้าหมาย , M_2 คือ ค่า corresponding atomic mass ของเป้าหมาย , M_1 และ E คือ ค่ามวลและพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบ และ E_{eh} คือ พลังงานการไอออนไนซ์เฉลี่ย นอกจากนี้ยังสามารถแสดงค่ากำลังหยุดยั้งเฉลี่ย (dE/dx) ของซิลิคอน ได้ดังนี้

$$\left|\frac{dE}{dx}\right| = \frac{80}{(v/c)^2} \quad (2.46)$$

เมื่อ c คือ ค่าความเร็วของแสง (3×10^8 m/s) และ v คือ ความเร็วของอนุภาค
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเสียหายจากการหลุดออก เกิดขึ้นจากการที่อะตอมหลุดออกจากแลตทิซที่เคยอยู่ ดังรูปที่ 2.11 จนทำให้เกิดช่องว่าง (vacancy) และการแทรกตัว (self-interstitial) ขึ้น เรียกว่าคู่ V-I บริเวณเหล่านี้ ถูกจัดว่าเป็นจุดบกพร่อง (defect) ของโครงสร้าง ซึ่งการจะเกิดขึ้นได้ต้องใช้พลังงานเฉลี่ย 15 ถึง 40 eV



รูปที่ 2.11 การเกิดคู่ V-I เมื่อมีอนุภาคพลังงานสูงมากระทำ (ก) ก่อน (ข) หลัง

ส่วนหนึ่งของพลังงานที่จะถูกเปลี่ยนเป็นความเสียหายต่อผลึกแลตทิซถูกเรียกว่า พลังงานไม่ไอออนไนซ์ที่สูญเสียไป (Non Ionizing Energy Loss หรือ NIEL) ในหน่วย MeV-cm²/g ดังสมการที่ 2.47

$$NIEL = \left(\frac{N}{M_2} \right) \sum_i \sigma_{di}(E) E_{ri}(E) \quad (2.47)$$

เมื่อ N คือ เลขอาโวกาโดร (6.02257×10^{23}) , M_2 คือ ค่า gram atomic mass ของเป้าหมาย , $\sigma_{di}(E)$ และ $E_{ri}(E)$ คือ cross section และ average recoil energy และ i คือ nuclear interaction

การวิเคราะห์ค่า displacement cross section (σ_d) ของ relativistic electrons ได้ดัง

$$\sigma_d = \pi \left[\frac{Z_2 q^2 \gamma_c}{m_e c^2 (\gamma_c^2 - 1)} \right]^2 \left[\frac{E_m}{E_d} - 1 \right] \quad (2.48)$$

และ

$$\gamma_c = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2} \quad (2.49)$$

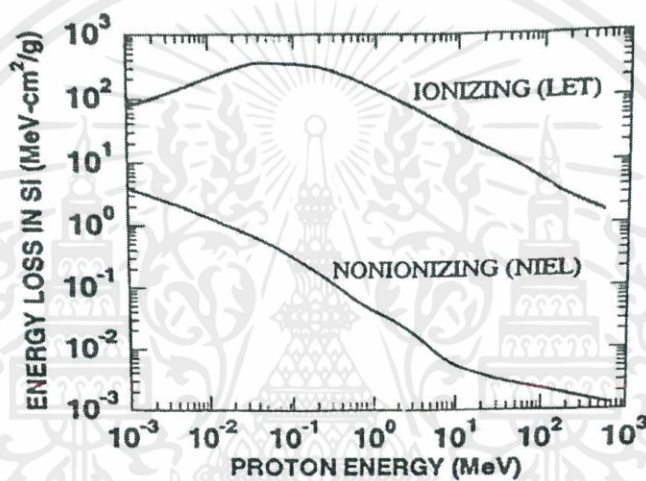
เมื่อ m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน ($9.10938188 \times 10^{-31}$ kg) , E_m คือ maximum energy transmitted to the nuclei และ E_d คือ พลังงานขีดเริ่มของการกระจัด (threshold energy for displacement)

ภายใต้พลังงานคงที่ของการแผ่รังสี (Constant energy of irradiation) $\sigma_d(E)$ นั้นมีค่าคงที่ และ ความเข้มข้นของสิ่งแปลกปลอม (V , I) แสดงผ่าน N_{Td} ได้ดังนี้

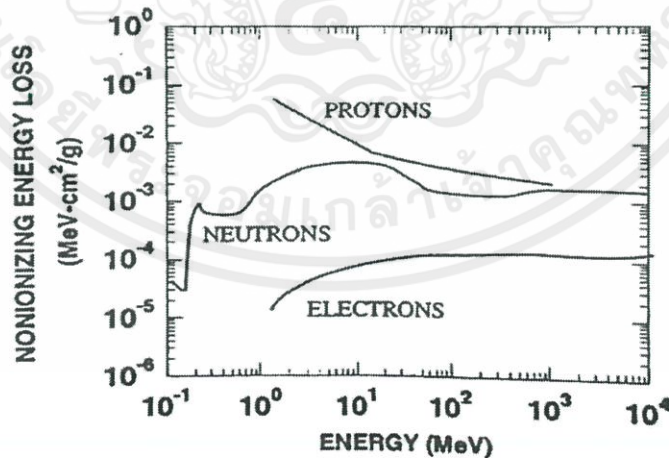
$$N_{Td} = \sigma_d N_{at} \Phi \quad (2.50)$$

เมื่อ N_{at} คือ ความเข้มข้นอะตอม และ Φ คือ ความเข้มข้นฟลักซ์ของอนุภาค (fluence)

การสูญเสียพลังงานในซิลิคอนจากรังสีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13

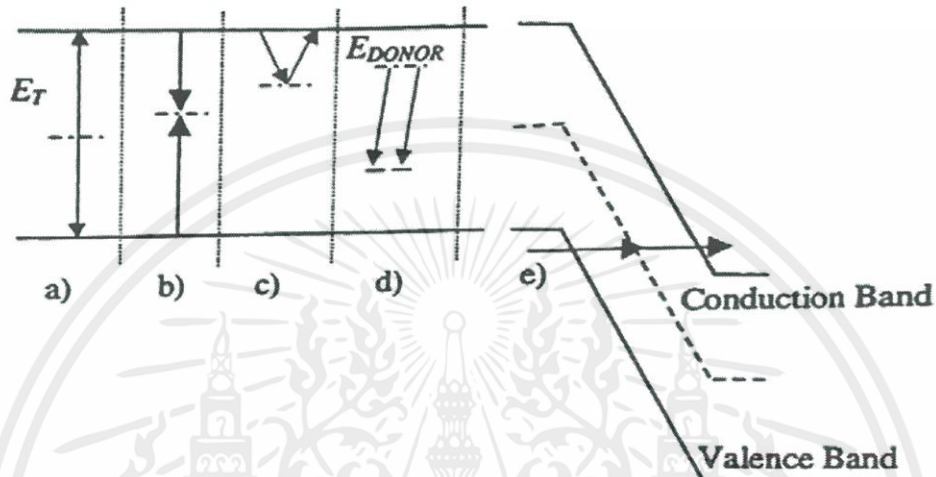


รูปที่ 2.12 พลังงานที่สูญเสียชนิดในซิลิคอนเมื่อเทียบกับพลังงานของฟลักซ์



รูปที่ 2.13 พลังงานที่สูญเสียในซิลิคอนที่ไม่ไอออนไนซ์ ของอนุภาคต่างๆ

ความเสียหายจากการหลุดออก ในวัสดุสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นสาเหตุที่มีผลอย่างมากในการที่ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง มันทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นอีกหนึ่งระดับ หรือหลายระดับในช่องว่างพลังงาน (bandgap) ของวัสดุ เรียกว่าระดับพลังงานบกพร่อง (defect level , E_T) ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์หลายอย่างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 5 ปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกิดขึ้นจากระดับพลังงานบกพร่องที่เกิดจากการกระทำรังสี (a) การก่อเกิด (generation) คู่อิเล็กตรอน-โฮล , (b) การผสมกลับ (recombination) ,(c) กับดัก (trapping) ของพาหะที่ระดับใกล้ขอบ (shallow), (d) การจ่ายของผู้ให้ (donor) และ (e) ปรากฏการณ์อุโมงค์ (tunneling) ของพาหะ

ซึ่งพารามิเตอร์สำคัญของวัสดุที่ต้องสนใจนั้นมี ความคล่องตัวของพาหะอิสระ (mobility) , ความหนาแน่นของพาหะอิสระ , สภาพต้านทาน (resistivity , ρ) , ช่วงชีวิตการก่อกำเนิด (generation lifetime , τ_g) และ ช่วงชีวิตการผสมกลับ (recombination lifetime , τ_r) ซึ่งจะเกิดความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเสียหายจากการหลุดออก โดยเฉพาะกับค่าช่วงชีวิต (lifetime) ที่มีผลอย่างมาก โดยแสดงค่าช่วงชีวิตก่อน (τ_o) และช่วงชีวิตหลังได้รับรังสี (τ_{Φ}) ได้ดังสมการที่ 2.51

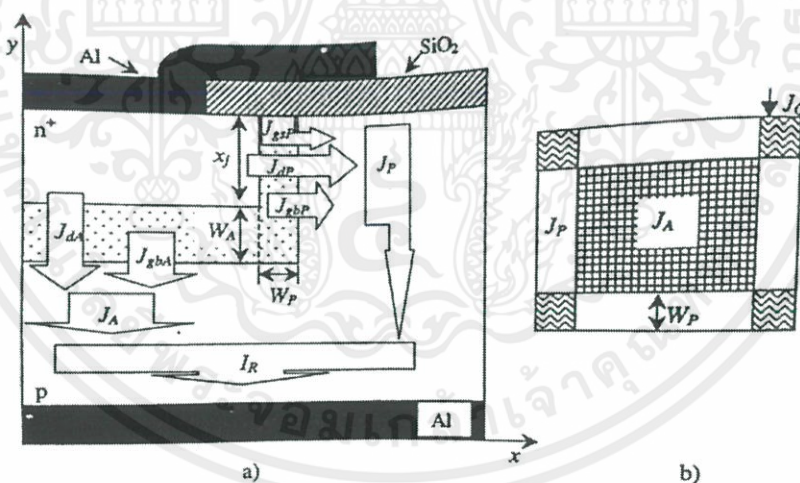
$$\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \frac{1}{\tau_o} + K_{\tau} \Phi \quad (2.52)$$

เมื่อ K_{τ} คือ สัมประสิทธิ์ความเสียหายของช่วงชีวิต (lifetime damage coefficient)

จากทั้งหมดนี้ทำให้เราทราบได้ว่าผลจากความเสียหายจากการไอออนไนซ์ (ionization damage) และความเสียหายจากการหลุดออก (displacement damage) มีผลอย่างมากกับกระแสรั่วในรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) โดยความเสียหายจากการไอออนไนซ์ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของพื้นผิวและหน้าสัมผัส (Si-SiO₂) และความเสียหายจากการหลุดออก ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของบริเวณภายใน (bulk) เป็นหลัก ดังนั้นจะสามารถกล่าวได้ว่ากระแสรั่วไหลสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการถ่ายเทพลังงานของอนุภาค

2.7 องค์ประกอบของกระแส (Current Origin) [8]

ขณะไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสขนาดเล็กไหลผ่านรอยต่อ p-n กระแสนั้นถูกเรียกว่ากระแสรั่ว (Leakage current, I_R) แสดงองค์ประกอบได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งสามารถหาได้ตามลักษณะทางเรขาคณิตในรูปแบบต่างๆ นอกจากนี้ได้มีการเพิ่มเติมพจน์ของกระแสรั่วปรสิต (parasitic leakage) เข้าไปด้วย ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดการไบอัสและเกี่ยวข้องกับระบบการวัดกระแสรั่ว (measurement system leakage)



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของกระแสรั่ว (a) ภาพตัดขวาง (b) ภาพจากด้านบน

พิจารณารูปที่ 2.15 จะสามารถเขียนผลรวมกระแสรั่วสุทธิ (total reverse current, I_R) ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$I_R = AJ_A + PJ_P + N_C J_C + I_{par} \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$J_A = J_{dA} + J_{gbA} \quad (2.54)$$

และ

$$J_P = J_{dP} + J_{gbP} + J_{gsP} \quad (2.55)$$

และ

$$J_C = J_{gbC} + J_{gsC} \quad (2.56)$$

เมื่อ J_A คือ ความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่ของไดโอด (A/cm^2) , A คือ พื้นที่หน้าตัด (cm^2) , J_P คือ ความหนาแน่นกระแสต่อความยาวเส้นขอบของไดโอด (A/cm) , P คือ ความยาวเส้นขอบ (cm) , J_C คือ ความหนาแน่นกระแสต่อมุมของไดโอด ($A/corner$ หรือ $A/มุม$) , N_C คือ จำนวนมุมของไดโอด (มุม , corner) , I_{par} คือ กระแสรั่วปรสิต ที่ไม่ขึ้นกับระบบกระแสรั่ว , J_{dA} คือ ความหนาแน่นกระแสแพร่ (diffusion current) ต่อพื้นที่ , J_{gbA} คือ ความหนาแน่นกระแสก่อเกิด (bulk generation current) ต่อพื้นที่ , J_{dP} คือ ความหนาแน่นกระแสแพร่ต่อความยาวขอบ , J_{gbP} คือ ความหนาแน่นกระแสก่อเกิดต่อความยาวขอบ , J_{gsP} คือ ความหนาแน่นกระแสก่อเกิดที่ผิววงนอก (surface) , J_{gbC} คือ ความหนาแน่นกระแสก่อเกิดต่อมุม และ J_{gsC} คือ ความหนาแน่นกระแสก่อเกิดที่ผิววงนอกต่อมุม

นอกจากนี้ ค่าต่างๆเหล่านี้สามารถนำไปใช้ได้กับกรณีไบอัสตรง เพียงเปลี่ยนอักษรห้อยจาก g เป็น r ซึ่งหมายถึง องค์ประกอบการผสมกลับ (recombination component)

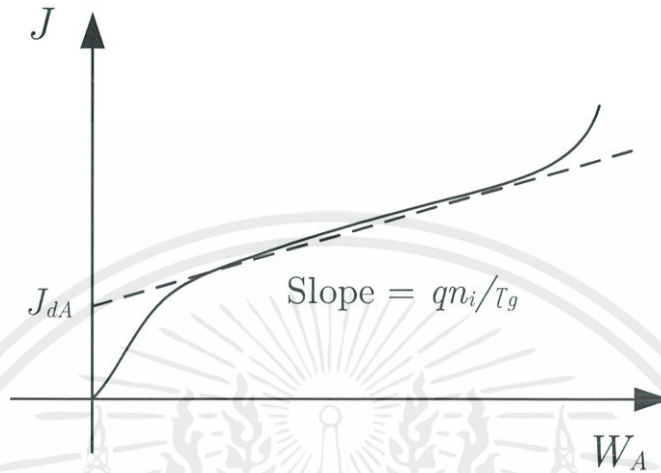
2.7.1 ความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่

เมื่อนำสมการที่ 2.54 มาพิจารณา โดยที่พจน์ของความหนาแน่นกระแสก่อเกิดมีค่าแปรผันตามความกว้างบริเวณพร่องพาหะ หรือก็คือ $J_{gbA} = (qn_i W_A)/\tau_g$ เมื่อนำไปแทนในสมการจะได้ว่า

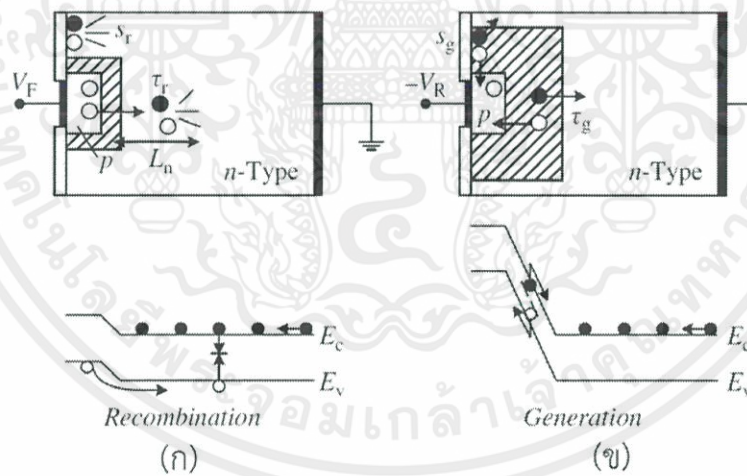
$$J_A = J_{dA} + \frac{qn_i W_A}{\tau_g} \quad (2.57)$$

สมการที่ 2.57 แสดงถึงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของระหว่าง J_A กับ W_A ที่มีจุดตัดแกนเป็น J_{dA} และความชันเป็น $(qn_i)/\tau_g$ โดยที่ τ_g นั้นคือช่วงเวลาการก่อเกิด (generation lifetime) เป็นเวลาที่คู่วาหะที่เกิดในบริเวณพร่องพาหะเดินทางไปจนออกนอกบริเวณ ดังรูปที่ 2.17(ข) ซึ่งจะเห็นว่า τ_g นั้นเป็นพารามิเตอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีความสำคัญต่อ J_A ในแง่ของความหนาแน่นกระแสที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะ



รูปที่ 2.17 (ก) การผสมกลับ (ข) การก่อเกิด [10]

2.7.2 ช่วงเวลาการผสมกลับ (Recombination lifetime)

ช่วงเวลาการผสมกลับเป็นเวลาที่พาหะใช้ตั้งแต่การเริ่มเคลื่อนที่จนถึงตอนผสมกลับกับพาหะคู่ตรงข้าม ดังรูปที่ 2.17(ข) ในกรณีปกติ τ_r นั้นสามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นกระแสแพร่ (area diffusion current density , J_{dA}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ พิจารณสมการที่ 2.58

$$J_{dA} = qn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (2.58)$$

เมื่อรอยต่อนั้นเป็นรอยต่อชนิด $n^+ - p^-$ ซึ่ง $N_D \gg N_A$ และ $L_n = \sqrt{D_n \tau_r}$ จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\tau_r = \left(\frac{qn_i^2}{J_{dA} N_A} \sqrt{D_n} \right)^2 \quad (2.59)$$

โดยสามารถคำนวณค่า D_n ได้จากความสัมพันธ์ไอน์สไตน์ (Einstein relationship) ดังนี้

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q} \quad (2.60)$$

เมื่อ

$$\mu_n(N_A, T) = \mu_{mn} + \frac{\mu_{on}}{1 + \left(\frac{N_A}{N_{cn}} \right)^v} \quad (2.61)$$

และ

$$\mu_{mn} = 88 \left(\frac{T}{300} \right)^{-0.57} \quad (2.62)$$

และ

$$\mu_{on} = 1.25 \times 10^3 \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.33} \quad (2.63)$$

และ

$$v = 0.88 \left(\frac{T}{300} \right)^{-0.146} \quad (2.64)$$

และ

$$N_{cn} = 1.26 \times 10^{17} \left(\frac{T}{300} \right)^{2.4} \quad (2.65)$$

เมื่อรอยต่อนั้นเป็นรอยต่อชนิด p^+-n^- ซึ่ง $N_A \gg N_D$ และ $L_p = \sqrt{D_p \tau_r}$ จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\tau_r = \left(\frac{qn_i^2}{J_{dA} N_D} \sqrt{D_p} \right)^2 \quad (2.66)$$

โดยสามารถคำนวณค่า D_p ได้ดังนี้

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \quad (2.67)$$

เมื่อ

$$\mu_p(N_D, T) = \mu_{mp} + \frac{\mu_{op}}{1 + \left(\frac{N_D}{N_{cp}} \right)^v} \quad (2.68)$$

และ

$$\mu_{mp} = 54 \left(\frac{T}{300} \right)^{-0.57} \quad (2.69)$$

และ

$$\mu_{op} = 230 \left(\frac{T}{300} \right)^{-2.33} \quad (2.70)$$

และ

$$v = 0.88 \left(\frac{T}{300} \right)^{-0.146} \quad (2.71)$$

และ

$$N_{cp} = 2.35 \times 10^{17} \left(\frac{T}{300} \right)^{2.4} \quad (2.72)$$

ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในหน่วยเคลวิน (K)

2.7.3 แฟกเตอร์ความถูกต้อง (Correction factor)

เป็นค่าพารามิเตอร์ตัวหนึ่ง ที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นกระแสแพร่ ซึ่งมีค่าดังนี้

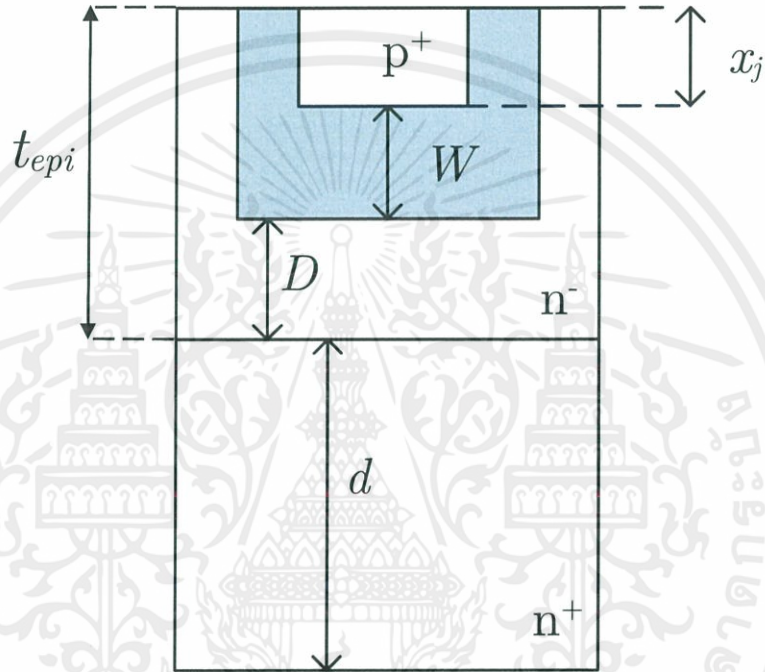
$$F_d(\alpha, \beta, \gamma, \xi, \zeta, v) = \frac{2(\gamma v - 1) + \left[1 + (\alpha + \zeta)v \frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right] e^\beta + \left[1 - (\alpha - \zeta)v \frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right] e^{-\beta}}{\left[1 + (\alpha + \zeta)v \frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right] e^\beta - \left[1 - (\alpha - \zeta)v \frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right] e^{-\beta}} \quad (2.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถประมาณได้ดังนี้

$$F_d \approx \tanh\left(\frac{D}{L_p}\right) \quad (2.74)$$

โดยที่ D คือ ความยาวดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของไดโอดพินสำหรับประกอบการคำนวณ

ซึ่งทำให้สามารถเขียนความหนาแน่นกระแสแพร่ได้ดังนี้

$$J_{dA} = qn_i^2 F_d \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right) \quad (2.75)$$

เมื่อเป็นรอยต่อแบบ p⁺-n⁻ จะประมาณได้ว่า

$$J_{dA} \approx qn_i^2 F_d \left(\frac{D_p}{N_D L_p} \right) \quad (2.76)$$

ดังนั้นจะได้สมการของความหนาแน่นกระแสรั่วต่อพื้นที่เป็น [10]

$$J_A = \frac{qn_i}{\tau_g} W + qn_i^2 F_d \left(\frac{D_p}{N_D L_p} \right) \quad (2.77)$$

2.8 องค์ประกอบทางเรขาคณิตของความจุไฟฟ้า (Geometrical capacitance components) [8]

เช่นเดียวกันกับกับองค์ประกอบของกระแส เราสามารถเขียนค่าของ C_j ในรูปแบบของผลรวมเชิงเส้นของความจุไฟฟ้าชนิดต่างๆได้ ดังนี้

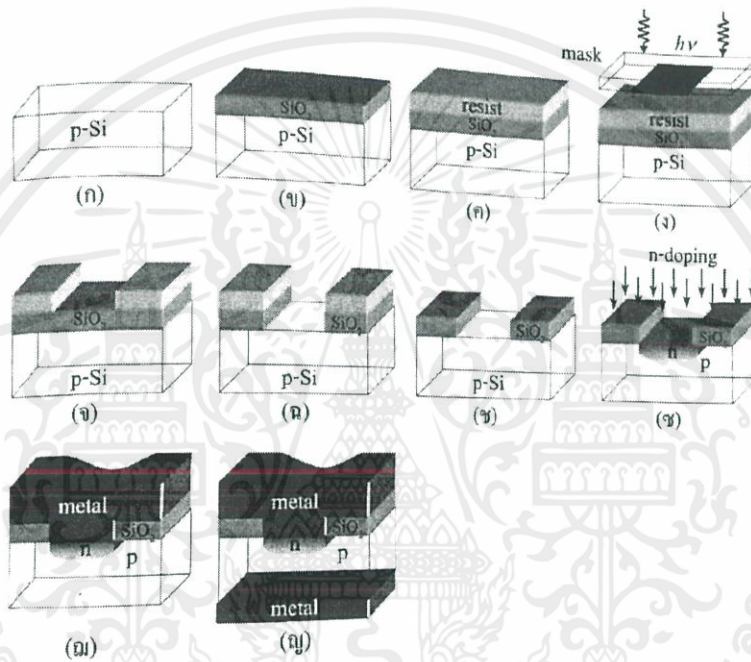
$$C_j = AC_A + PC_P + N_C C_C + C_{par} \quad (2.78)$$

- เมื่อ C_A (F/cm²) คือ ความหนาแน่นของความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ (area capacitance density)
 C_P (F/cm) คือ ความหนาแน่นของความจุไฟฟ้าต่อความยาวขอบ (perimeter capacitance density)
 C_C (F/corner) คือ ความจุไฟฟ้าขอบ (corner capacitance component)
 A, P, N_C คือ พื้นที่ (cm²), ความยาวรวมของขอบ (cm) และ จำนวนมุม ตามลำดับ
 และ C_{par} คือ ความจุไฟฟ้าปรสิต ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ขึ้นอยู่กับระบบของความจุไฟฟ้า

2.9 การผลิตรอยต่อพีเอ็น [6]

การผลิตรอยต่อพีเอ็น (p-n) เริ่มจากชั้นสเตรต Si ชนิด n หรือ p ก็ได้ ตัวอย่างในรูป 2.19 แสดงลำดับขั้นตอนการสร้างรอยต่อพีเอ็น ที่มีชั้น p อยู่ด้านล่างและชั้น n อยู่ด้านบนของชั้นสเตรต เริ่มจากนำแผ่นฐาน (ชั้นสเตรต) ดังรูปที่ 2.19(ก) ไปออกซิไดส์ด้วยความร้อน เพื่อสร้างชั้น SiO₂ ดังรูปที่ 2.19(ข) หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการลิโทกราฟี โดยเคลือบฟิล์มไวแสง (resist) ดังรูปที่ 2.19(ค) แล้วกำหนดบริเวณที่ต้องการเจือให้เป็นชนิด n โดยฉายแสงผ่านหน้ากาก (mask) หรือเรติเคิล (reticle) ดังรูปที่ 2.19(ง) พลังแสงจะทำให้สมบัติของฟิล์มไวแสงเปลี่ยนไป เมื่อนำไปล้างในน้ำยา developer บริเวณของฟิล์มไวแสงที่ไม่ได้รับแสงจะถูกชะล้างออก ได้ผลดังรูปที่ 2.19(จ) หลังจากนั้นนำไปกัด การกัดอาจเป็นแบบแห้งหรือเปียก หากเลือกสารกัดที่เหมาะสม ชั้น SiO₂ ที่ไม่ถูกบ่อนด้วยฟิล์มไวแสงจะถูกกำจัดออกดังรูปที่ 2.19(ฉ) หลังจากนั้นจึงเอกรสารนี้เป็นเอกรสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำจัดฟิล์มไวแสงออกไปดังรูปที่ 2.19(ข) ก่อนที่จะเจือผิว Si ที่เปลือยอยู่ด้วยการแพร่หรือยิงฝังไอออน ดังรูปที่ 2.19(ค) ชั้น SiO₂ ที่สร้างขึ้นตอนแรกทำหน้าที่เป็นหน้ากัก กันไม่ให้อะตอมหรือไอออนของตัวให้ทะลุผ่านเข้าไปถึงผิวของ Si ได้ ต่อจากนั้นเคลือบผิวหน้าทั้งหมดด้วยโลหะดังรูปที่ 2.19(ง) เรียกการเคลือบโลหะนี้ว่า metallization ตามด้วยลิโทกราฟีอีกครั้ง กำหนดบริเวณที่จะเป็นขั้วต่อ n แล้วกัดโลหะนอกบริเวณออกสุดท้าย เคลือบผิวหลังด้วยโลหะเพื่อเป็นขั้วต่อ p ได้เป็นโครงสร้างรอยต่อ p-n ที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 2.19(ญ) พร้อมนำไปเชื่อมต่อกับบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม



รูปที่ 2.19 การผลิตรอยต่อ p-n

บทที่ 3

วิธีการทำการทดลอง

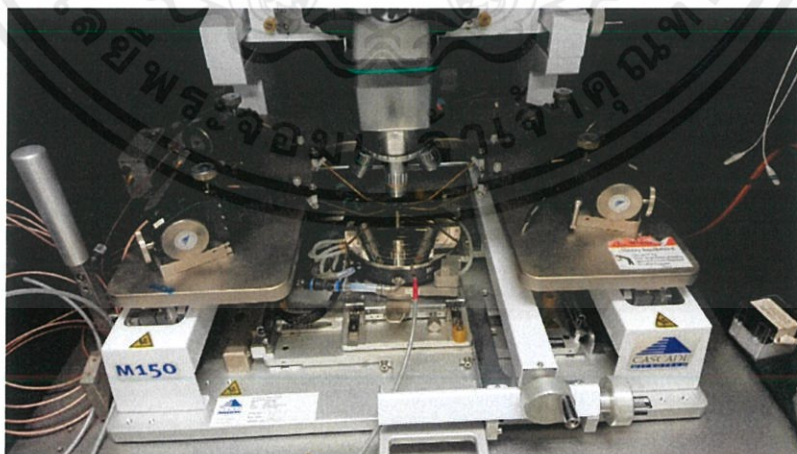
3.1 การทดลองแยกองค์ประกอบของกระแสและความจุไฟฟ้า

เพื่อความสะดวกในการคำนวณในการทดลองต่อจากนี้ การทดลองในส่วนนี้จึงเกิดขึ้นมา เพื่อจะหาว่าเราสามารถประมาณค่าความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่ได้ โดยละพจน์ของความหนาแน่นกระแสต่อขอบได้หรือไม่ รวมถึงความจุไฟฟ้าในกรณีเดียวกันด้วย

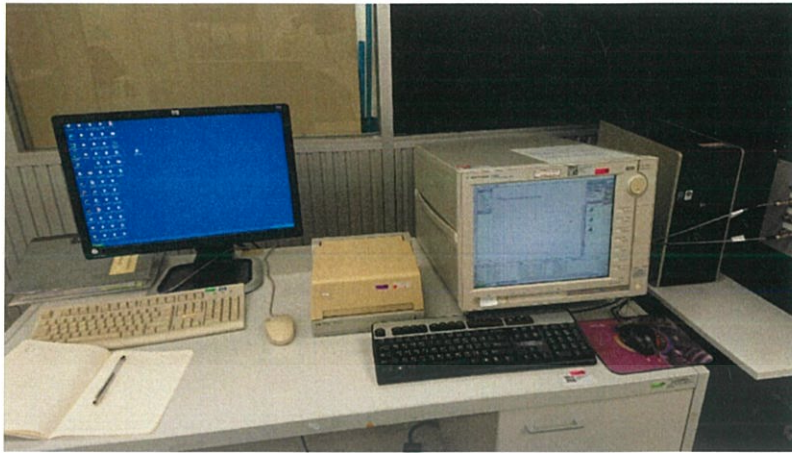
ในการทดลองนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนการวัดค่าเพื่อเก็บข้อมูล และการคำนวณ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 กระบวนการวัดค่า

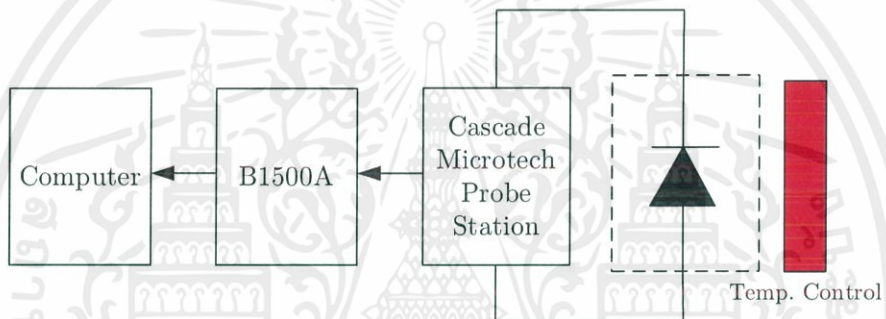
ข้อมูลที่เราต้องการจากขั้นตอนนี้ คือ ข้อมูลกระแสกับแรงดัน และ ข้อมูลความจุไฟฟ้ากับแรงดัน ซึ่งในการวัดค่านั้น เราจะใช้เครื่องวัดแบบโพรบสี่แขนในการวัด (รูปที่ 3.1) โดยควบคุมขั้นตอนการวัดโดยเครื่อง B1500A (รูปที่ 3.2) ซึ่งจะคอยๆปรับแรงดันทีละระดับๆแล้ววัดค่า จากนั้นจะทำการเก็บข้อมูลในรูปแบบไฟล์ที่เปิดอ่านได้ง่าย (เช่น .csv) แล้วส่งไปที่คอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่ออยู่กับ B1500A โดยแสดงระบบการวัดได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 ตัววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบ 4 โพรบ บนฐานวาง



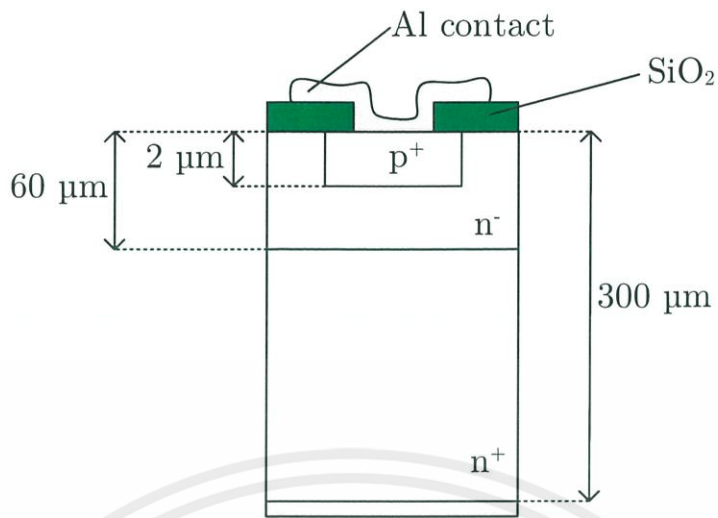
รูปที่ 3.2 B1500A และ คอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อ



รูปที่ 3.3 ระบบการวัดที่ใช้ในการวัดไดโอด

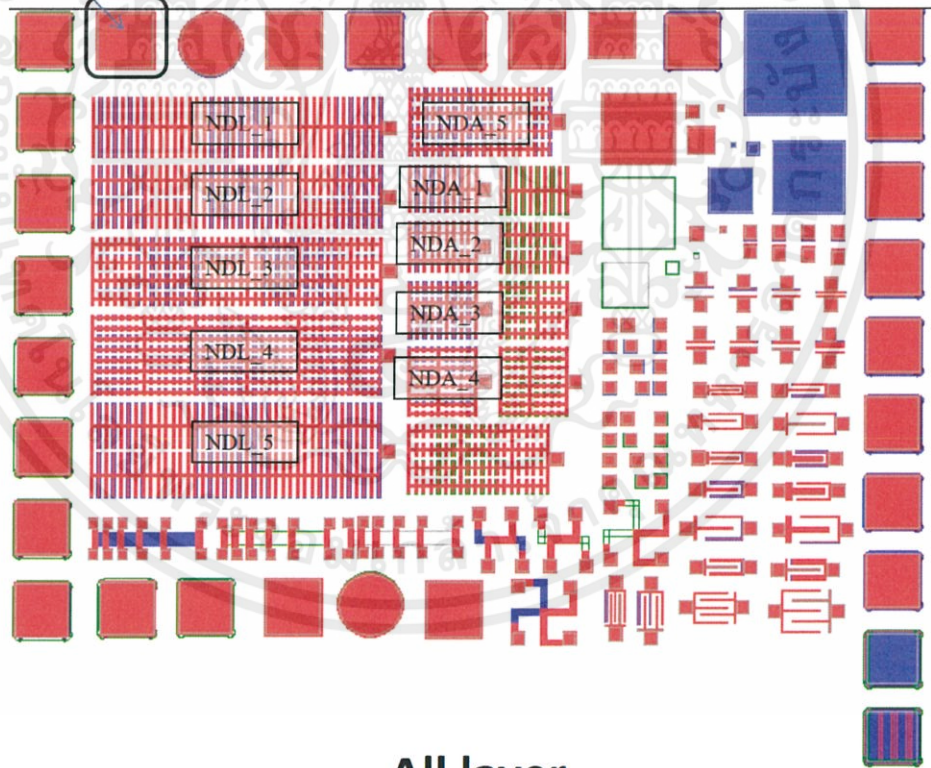
3.1.2 ข้อมูลของไดโอดที่ใช้

ไดโอดที่ใช้เป็นไดโอดพินชนิด p^+-n-n^+ หกตัวประกอบไปด้วย SQ1 , NDA2 , NDA3 , NDA4 , NDA5 และ NDL1 ที่ทุกตัวมีโครงสร้างในแต่ละชั้นดังรูปที่ 3.4 และ แต่ละตัวมีรูปแบบหน้าตัดที่แตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 3.5 โดยข้อมูลของแต่ละหน้าตัดสามารถดูได้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของไดโอดที่ใช้

SQ1 400x400 μm^2



All layer

รูปที่ 3.5 ตำแหน่งและชื่อของไดโอดแต่ละตัว

3.1.3 วิธีการแยกองค์ประกอบของกระแสและความจุไฟฟ้า

ในการหาค่าองค์ประกอบของกระแส จะพิจารณาสมการที่ 2.53 ซึ่งโดยปกติแล้ว J_C และ I_{par} นั้นมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่และความหนาแน่นกระแสต่อขอบ[8] ดังนั้นจึงสามารถประมาณได้ดังสมการที่ 3.1

$$I_R \approx AJ_A + PJ_P \quad (3.1)$$

ทำการหารด้วยพื้นที่ (A) ตลอดสมการและจัดรูปใหม่ จะได้

$$\frac{I_R}{A} = J_P \left(\frac{P}{A} \right) + J_A \quad (3.2)$$

จากสมการที่ 3.2 จะเห็นว่า สมการนี้อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรง ซึ่งหมายความว่า เราจะสามารถหาความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่ได้จากจุดตัดแกนตั้ง และสามารถหาความหนาแน่นกระแสต่อขอบได้จากความชัน จากคุณสมบัตินี้ทำให้เราสามารถนำข้อมูลกระแสรั่วในแต่ละไดโอดที่มีโครงสร้างเดียวกันแต่มีอัตราส่วนของความยาวขอบต่อพื้นที่ (P/A) แต่ต่างกันมาคำนวณหา J_A และ J_P ได้ โดยคำนวณหาในแต่ละแรงดันแล้วนำข้อมูลไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบ

เช่นเดียวกันกับองค์ประกอบของความจุไฟฟ้า จะพิจารณาสมการที่ 2.78 ซึ่งโดยปกติ C_C และ C_{par} นั้นมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่และความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อขอบ[6] ดังนั้นจึงสามารถประมาณได้ดังสมการที่ 3.3

$$C_j \approx AC_A + PC_P \quad (3.3)$$

ทำการหารด้วยพื้นที่ (A) ตลอดสมการและจัดรูปใหม่ จะได้

$$\frac{C_j}{A} = C_P \left(\frac{P}{A} \right) + C_A \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.4 จะเห็นว่า สมการนี้อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรง ซึ่งหมายความว่า เราจะสามารถหาความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ได้จากจุดตัดแกนตั้ง และสามารถหาความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อขอบได้จากความชัน จากคุณสมบัตินี้ทำให้เราสามารถนำข้อมูลความจุไฟฟ้าในแต่ละไดโอดที่มีโครงสร้างเดียวกันแต่มี อัตราส่วนของความยาวขอบต่อพื้นที่ (P/A) แต่ต่างกันมาคำนวณหา C_A และ C_P ได้ โดยคำนวณหาในแต่ละแรงดันแล้วนำข้อมูลไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบ

3.2 การทดลองหาผลกระทบของรังสีที่มีต่อไดโอด

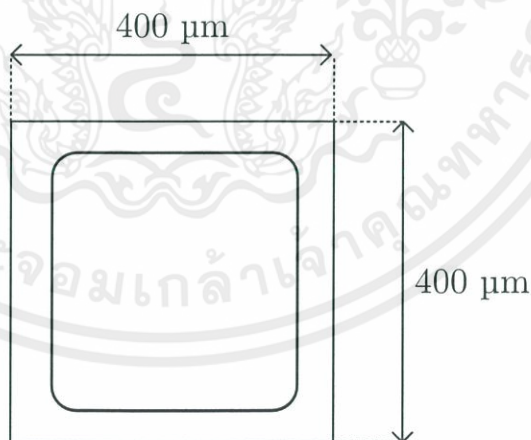
ในการทดลองนี้ จะเป็นหาว่าเมื่อไดโอดได้รับรังสี จะมีพารามิเตอร์ไหนบ้างที่มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การทดลอง

ในการทดลองนี้ จะใช้ไดโอด SQ1 จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.1 เป็นหลัก ซึ่งมีหน้าตัดดังรูปที่ 3.6 โดยจะใช้ตัวอย่าง 4 ตัว ซึ่งบอกประเภทของไดโอดที่ใช้ ดังนี้

- 1) REF หมายถึง ไดโอดอ้างอิง เป็นไดโอด SQ1 ปกติที่ไม่ได้รังสี หรือมีการเจือสารเพิ่มเติม
- 2) EB หมายถึง ไดโอด SQ1 ที่ได้รับรังสีอิเล็กตรอน (electron beam) ขนาด 50 kGy
- 3) PT หมายถึง ไดโอด SQ1 ที่มีการเจือทองคำขาว (Pt) ที่บริเวณด้านหลัง
- 4) PTEB หมายถึง ไดโอด SQ1 ที่มีการเจือทองคำขาว (Pt) ที่บริเวณด้านหลัง และ ได้รับรังสีอิเล็กตรอน (electron beam) ขนาด 50 kGy

ขั้นตอนการวัดเหมือนในหัวข้อที่ 3.1.1 ทุกประการ โดยวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ 27 °C , 37 °C , 47 °C และ 67 °C จากนั้นนำข้อมูลกระแสและความจุไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 3.6 หน้าตัดของไดโอด SQ1

3.2.2 การประมาณความหนาแน่นกระแสและความจุไฟฟ้า

เมื่อได้รับการยืนยันถึงความแตกต่างด้านขนาดระหว่าง J_A กับ J_P และ C_A กับ C_P ของโครงสร้างไดโอดชนิดนี้ จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.1 ไปแล้ว ประกอบกับลักษณะหน้าตัดของไดโอดที่จะใช้ในการทดลองนี้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส จึงทำให้สามารถประมาณสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.3 ได้ดัง

$$I_R \approx AJ_A \quad (3.5)$$

และ

$$C_j \approx AC_A \quad (3.6)$$

จากการที่สามารถคำนวณในลักษณะนี้ได้ ทำให้การคำนวณในการทดลองนี้ทำได้ง่ายขึ้น จากที่ต้องแยกองค์ประกอบของกระแสและความจุไฟฟ้า ในการทดลองนี้สามารถนำพื้นที่มาหารได้เลย

3.2.3 วิธีการหาพารามิเตอร์ของความหนาแน่นกระแสแพร่ในกรณีที่ไม่ทราบค่าของแพกเตอร์ความถูกต้อง

พิจารณาสมการที่ 2.76 จะเห็นว่ากรณีที่ทราบค่าของ F_d ทำให้การคำนวณหาพารามิเตอร์อื่นๆ มีความยุ่งยากมากขึ้น ซึ่งมีวิธีการดังนี้ [8] จากสมการที่ 2.76 ทำการจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{J_{dA}}{F_d} = \frac{qn_i^2 D_p}{N_D L_p} \quad (3.7)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.74 จะได้ว่า

$$\frac{J_{dA}}{\tanh\left(\frac{D}{L_p}\right)} = \frac{qn_i^2 D_p}{N_D L_p} \quad (3.8)$$

จากโครงสร้างในรูปที่ 2.18 จะได้ว่า

$$D = t_{epi} - (x_j + W) \quad (3.9)$$

เนื่องจากในการหา นั้นจะหาที่จุดตัดแกนตั้ง หรือก็คือ $W = 0$ ดังนั้น

$$D = t_{epi} - x_j \quad (3.10)$$

จากโครงสร้างในรูปที่ 3.4 จะได้ว่า

$$D = 60 - 2 \mu\text{m} = 58 \mu\text{m} = 58 \times 10^{-4} \text{cm} \quad (3.11)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.11 ลงในสมการที่ 3.8 จะได้ว่า

$$\frac{J_{dA}}{\tanh\left(\frac{58 \times 10^{-4}}{L_p}\right)} = \frac{qn_i^2 D_p}{N_D L_p} \quad (3.12)$$

พิจารณาสมการที่ 3.12 จะสังเกตเห็นว่าจะมีเพียงค่าของระยะทางการแพร่ (L_p) เท่านั้นที่เราไม่ทราบค่า ดังนั้น จึงควรต้องเริ่มต้นจากการหาค่าของ L_p ก่อน โดยกำหนดให้

$$f_1(L_p) = \frac{J_{dA}}{\tanh\left(\frac{58 \times 10^{-4}}{L_p}\right)} \quad (3.13)$$

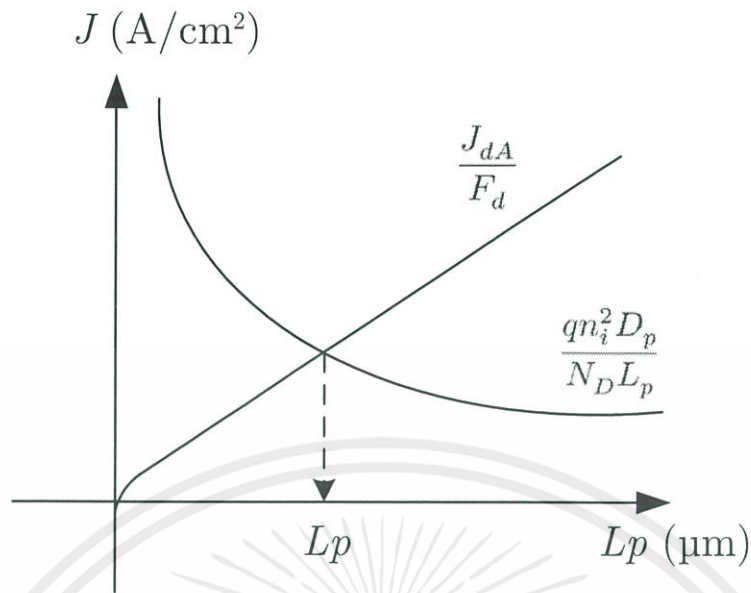
และ

$$f_2(L_p) = \frac{qn_i^2 D_p}{N_D L_p} \quad (3.14)$$

โดยที่

$$f_1(L_p)|_{L_p=x} = f_2(L_p)|_{L_p=x} \quad (3.15)$$

ใช้คุณสมบัติของสมการที่กล่าวว่าทั้งสองด้านของเครื่องหมายเท่ากับต้องมีค่าที่เท่ากัน ดังนั้น ต้องหา x ที่ทำให้สมการที่ 3.15 เป็นจริง โดยการสุ่มแทนค่าแล้วหาจุดตัด ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการหา L_p ในกรณีที่ไม่ทราบแฟกเตอร์ความถูกต้อง

ซึ่งหลังจากทราบค่าของ L_p แล้ว เราจะสามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหา F_d และ τ_r ได้ โดยใช้สมการที่ 2.74 และสมการ $L_p = \sqrt{D_p \tau_r}$

บทที่ 4

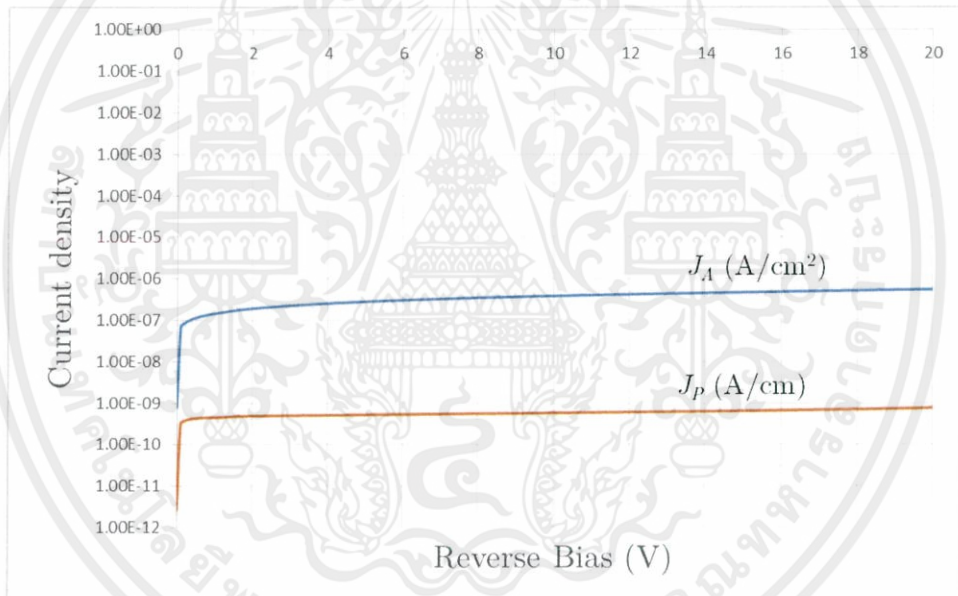
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดลองแยกองค์ประกอบของกระแสและความจุไฟฟ้า

จากการทำการทดลองตามหัวข้อที่ 3.1 เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณจะได้ผลลัพธ์ดังนี้

4.1.1 องค์ประกอบของกระแสรั่ว

เมื่อได้ข้อมูลกระแสกับแรงดันของไดโอดแต่ละหน้าตัด (ภาคผนวก ข) มาคำนวณเพื่อหาองค์ประกอบของกระแสรั่ว (leakage current) และนำมาเปรียบเทียบจะได้ดังรูปที่ 4.1

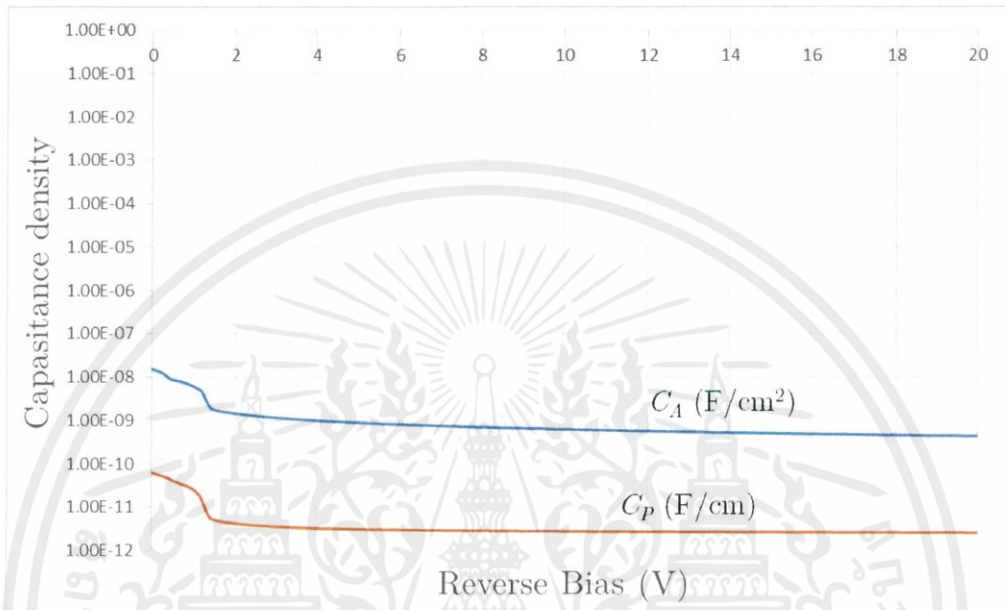


รูปที่ 4.1 กราฟความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่ กับ ความหนาแน่นกระแสต่อขอบของไดโอดพินที่ใช้

พิจารณารูปที่ 4.1 จะสังเกตได้ว่าความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่และความหนาแน่นกระแสต่อขอบ มีค่าที่ต่างกันประมาณ 1,000 เท่า ซึ่งส่งผลให้วิธีการคำนวณที่เขียนไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2 มีความสมเหตุสมผล

4.1.2 องค์ประกอบของความจุไฟฟ้า

เมื่อได้ข้อมูลของความจุไฟฟ้ากับแรงดันของไดโอดแต่ละหน้าตัด (ภาคผนวก ข) มาคำนวณเพื่อหาองค์ประกอบของความจุไฟฟ้า (capacitance) และนำมาเปรียบเทียบจะได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ กับความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อขอบ ของไดโอดพินที่ใช้

พิจารณารูปที่ 4.2 จะสังเกตได้ว่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่และความหนาแน่นความจุไฟฟ้าต่อขอบ มีค่าที่ต่างกันประมาณ 300 เท่า ซึ่งส่งผลให้วิธีการคำนวณที่เขียนไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2 มีความสมเหตุสมผล

4.2 ผลการทดลองหาผลกระทบของรังสีที่มีต่อไดโอด

เมื่อได้ข้อมูลความจุไฟฟ้า (ภาคผนวก ค) จะหา N_D และ ความกว้างบริเวณพร่องพาหะ (ภาคผนวก ง) ได้ จากนั้นข้อมูลไปรวมกับข้อมูลความหนาแน่นกระแสรั่ว (ตารางที่ 1 และ ภาคผนวก จ) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะ (ภาคผนวก ฉ) จากนั้นนำไปแยกหาพารามิเตอร์ (ภาคผนวก ช) ต่อ โดยจะได้ข้อมูลพารามิเตอร์ที่สำคัญดัง ตารางที่ 2

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลกระแสรั่วของไดโอด SQ1

Temp. (°C)	Type	J_r at 5V ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	J_{gbA} at 5V ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	J_{dA} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
27	REF	0.31	0.22	0.09
	EB	0.17	0.05	0.12
	PT	0.90	0.09	0.81
	PTEB	0.17	0.07	0.10
37	REF	0.76	0.56	0.20
	EB	0.35	0.13	0.23
	PT	1.42	0.19	1.23
	PTEB	0.37	0.17	0.20
47	REF	1.76	1.29	0.47
	EB	0.72	0.29	0.43
	PT	2.25	0.39	1.86
	PTEB	0.78	0.39	0.39
67	REF	9.07	6.19	2.88
	EB	3.25	1.41	1.84
	PT	6.39	1.72	4.67
	PTEB	3.58	1.82	1.76

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญของไดโอด SQ1

Temp. (°C)	Type	F_d	L_p (um)	τ_r (ps)	τ_g (us)
27	REF	1.00	0.11	16.70	8.14
	EB	1.00	0.08	8.31	45.16
	PT	1.00	0.01	0.27	15.85
	PTEB	1.00	0.09	12.11	30.18
37	REF	1.00	0.32	146.63	8.10
	EB	1.00	0.28	106.14	62.60
	PT	1.00	0.06	4.28	26.31
	PTEB	1.00	0.32	143.57	33.48
47	REF	1.00	0.62	547.31	7.44
	EB	1.00	0.66	618.89	61.56
	PT	1.00	0.16	38.75	25.63
	PTEB	1.00	0.73	759.27	31.12
67	REF	1.00	1.45	3267.07	6.09
	EB	1.00	2.21	7603.29	51.44
	PT	1.00	0.94	1384.68	26.73
	PTEB	1.00	2.35	8610.69	28.92

จากตารางที่ 2 จะสังเกตเห็นว่า ค่าแฟกเตอร์ความถูกต้องที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1 ทุกตัวไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะไม่นำแฟกเตอร์ความถูกต้องมารวมพิจารณาด้วย

เมื่อพิจารณาว่ารังสีมีผลอย่างไรกับพารามิเตอร์เหล่านี้ จะได้ข้อสังเกตดังนี้

- 1) ช่วงเวลาการก่อเกิด (τ_g) จะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับรังสี ไม่ว่าจะเจือ Pt หรือไม่เจือ และในทุกอุณหภูมิ
- 2) ช่วงเวลาการผสมกลับ (τ_r) หากมีการเจือ Pt จะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับรังสีในทุกอุณหภูมิ
- 3) ช่วงเวลาการผสมกลับ (τ_r) หากไม่ได้เจือ Pt อุณหภูมิจะมีผล โดยเมื่อได้รับรังสีที่อุณหภูมิต่ำ (27 °C และ 37 °C) τ_r จะมีค่าลดลง และที่อุณหภูมิสูง (47 °C และ 67 °C) τ_r จะมีค่าที่เพิ่มขึ้น
- 4) ระยะการแพร่ของพาหะ (L_p) ลักษณะเหมือนกรณีของ τ_r

และเมื่อพิจารณาว่าอุณหภูมิมีผลอย่างไรกับพารามิเตอร์เหล่านี้ จะมีข้อสังเกตดังนี้

- 1) ช่วงเวลาการผสมกลับ (τ_r) แปรผันตรงกับอุณหภูมิ เช่น ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น τ_r ก็สูงขึ้น
- 2) ระยะการแพร่ของพาหะ (L_p) แปรผันตรงกับอุณหภูมิ
- 3) ช่วงเวลาการก่อเกิด (τ_g) เฉพาะตัวต้นแบบ (REF) จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ เช่น ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น τ_g ก็จะลดลง
- 4) ช่วงเวลาการก่อเกิด (τ_g) เฉพาะเมื่อมีการเจือ Pt จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 27 °C ถึง 37 °C เท่านั้นและจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงอื่น



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลที่ได้จากการทดลองเราจะทราบว่า ผลกระทบที่รังสีกระทำต่อไดโอดนั้นทำให้ความหนาแน่นกระแสรั่วนั้นมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งความหนาแน่นกระแสรั่วประกอบขึ้นด้วยความหนาแน่นกระแสก่อเกิด (generation current) และ ความหนาแน่นกระแสแพร่ (diffusion current) ซึ่งการได้รับรังสี ทำให้ส่วนประกอบเหล่านี้ มีปริมาณที่เปลี่ยนไป ทั้งหมดนั้นเกิดขึ้นจากพารามิเตอร์เล็กๆที่เป็นส่วนประกอบของกระแสเหล่านี้ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับรังสี ดังนี้

ความหนาแน่นกระแสก่อเกิด เป็นส่วนประกอบของกระแสรั่วที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแรงดันไบอัสย้อนที่ตกคร่อมรอยต่อ โดยปริมาณที่จะเปลี่ยนแปลงนั้นแปรผกผันกับ ช่วงเวลาการก่อเกิด (τ_g) กล่าวได้ว่าช่วงเวลาการก่อเกิดนั้น เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะควบคุมการเปลี่ยนของกระแสเมื่อได้รับแรงดันค่าต่างๆ ซึ่งเมื่อไดโอดได้รับรังสี ค่าช่วงเวลาก่อเกิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเสมอ ในทุกอุณหภูมิและไม่ว่าจะมีการเจือทองคำขาว (Pt) หรือไม่ และอีกด้านหนึ่งมันก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโดยอุณหภูมิเช่นกัน โดยปกติแล้วค่าช่วงเวลาก่อเกิดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่การที่ได้รับรังสีทำให้ผลกระทบนี้เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป โดยช่วงเวลาการก่อเกิดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 27-37 °C แล้ว มีลักษณะการลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเช่นเดิมในช่วง 37-67 °C

ความหนาแน่นกระแสแพร่ เป็นส่วนประกอบของกระแสรั่วที่จะมีค่าที่คงที่ตลอดไม่ว่าจะมีแรงดันเท่าไร เป็นปริมาณที่จะตัดสินค่าเริ่มต้นของกระแสรั่ว ถ้าอยู่ในช่วงไบอัสย้อนน้อยๆ กระแสรั่วจะมากจะน้อยมักจะขึ้นอยู่กับค่านี้เป็นส่วนใหญ่ เพราะกระแสก่อเกิดยังเกิดขึ้นไม่มาก โดยความหนาแน่นกระแสแพร่นั้นจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่สองค่า นั่นคือ ระยะเวลาการแพร่ (L_p) และ ช่วงเวลาการรวมตัว (τ_r) ซึ่งทั้งสองค่าเองก็มีความสัมพันธ์กันอยู่ โดยจะแปรผกผันตรงกำลังสองกัน ดังนั้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงก็จะคล้ายคลึงกัน ค่าทั้งสองนี้นั้นจะมีลักษณะที่แปรผกผันกับความหนาแน่นกระแสแพร่ ซึ่งเมื่อไดโอดได้รับรังสี ถ้าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 27 - 37 °C ช่วงเวลาการรวมตัวจะลดลง แต่ถ้าหากอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 47 - 67 °C ช่วงเวลาการรวมตัวจะเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะไม่เหมือนกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเจือทองคำขาว (Pt) ที่บริเวณด้านล่างของตัวไดโอด (ด้านล่างของฐานรอง) โดยเมื่อเจือแล้วจะทำให้ ช่วงเวลาการผสมกลับเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับรังสีในทุกอุณหภูมิ ในอีกด้านหนึ่ง การได้รับรังสีและการเจือทองคำขาว ไม่ได้ทำให้ลักษณะของผลกระทบของอุณหภูมิ ที่ปกติแล้วช่วงเวลาการรวมตัวจะแปรผกผันตรงกับอุณหภูมินั้นเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้น ในการออกแบบหัวข้อวิจัยสิ่งที่จะสามารถนำไปพิจารณาด้วยดังนี้ ควรที่จะมีการเจือ
ทองคำขาวเพื่อให้อุณหภูมิมีผลกระทบต่อกระแสรั้น้อยลง และ โดยปกติแล้วหัวข้อวิจัยมักจะได้รับไบอัสยอนที่
ต่ำเพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงาน ทำให้หากต้องการให้กระแสรั้น้อยควรหาทางออกแบบให้ระยะเวลาแพร่และ
ช่วงเวลาการร่วมตัวน้อยๆ และ ถ้าต้องการออกแบบให้ผลกระทบจากแรงดันไบอัสยอนไม่คงที่ ซึ่งอาจจะเกิด
จากสัญญาณรบกวน หรือก็คือ ถ้าต้องการให้กระแสเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อแรงดันไบอัสยอนเปลี่ยนแปลงไป
สามารถทำได้โดยการหาทางออกแบบให้ไดโอดตัวนั้นมีช่วงเวลาการก่อเกิดที่หลายๆ ประกอบกับการนำข้อมูล
ผลกระทบของรังสี ซึ่งก็คือลักษณะการเพิ่มลดของพารามิเตอร์ต่างๆ ไปประกอบการออกแบบ



เอกสารอ้างอิง

- [1] โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. “ผลของรังสีชนิดก่อไอออนที่มีต่อสิ่งมีชีวิต.” [Online]. Available : <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=38&chap=7&page=t38-7-infodetail09.html>. 2561.
- [2] wavelet_spaghetti. “**Portable Radiation Detector.**” [Online]. Available : <https://www.instructables.com/id/Radiation-Detector/>. 2561.
- [3] ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฟิสิกส์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 13. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2555.
- [4] ศูนย์บริหารความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล. แนวทางปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยทางรังสี. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี : ทองสุขพรินท์. 2555.
- [5] สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข. “เกรย์กับซีเวิร์ต และการป้องกันรังสี.” [Online]. Available : <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc55/content55/nstkc55-088.html>. 2555.
- [6] ทรงพล กาญจนชูชัย. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2559.
- [7] สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : มิน เซอร์วิส ซัพพลาย. 2559.
- [8] Poyai A. “**Defect Assessment in Advanced Semiconductor Materials and Device.**” Ph.D. Thesis of Katholieke Universiteit Leuven. 2002.
- [9] สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. ศัพทานุกรมนิวเคลียร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. 2552.
- [10] Dieter K. Schroder. **Semiconductor Material and Device Characterization.** 3rd ED. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 2006.

ภาคผนวก ก

ตารางข้อมูลหน้าตัดของไดโอด

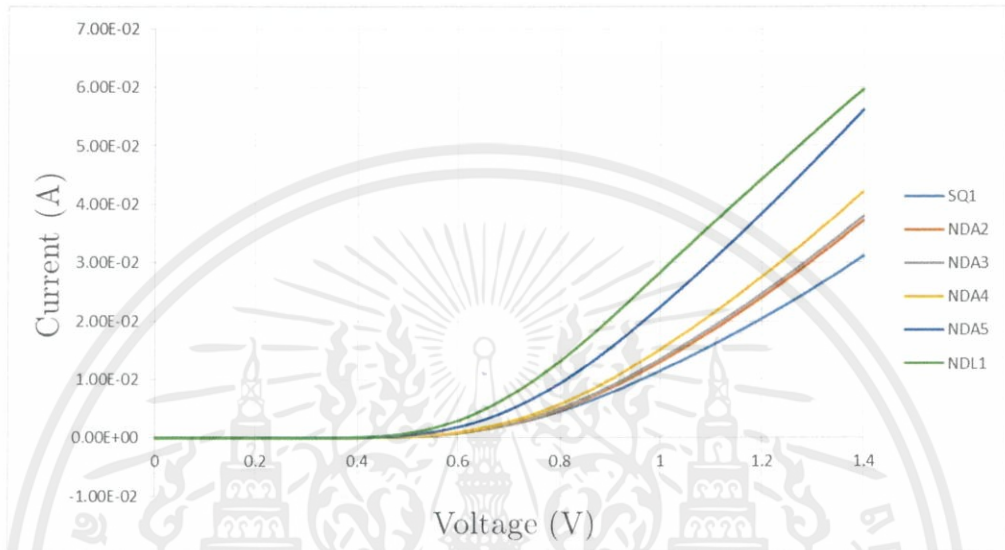
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลหน้าตัดของไดโอดพินที่เซ้

Device		X*Y(um)		No. of SQ	A(um ²)	A(cm ²)	P(um)	P(cm)	Nc	P/A(cm ⁻¹)	A/P(cm)
Structure	Label	X(um)	Y(um)								
PIN_Anode	SQA 1	400	400	1	160000	0.001600	1600	0.16	4	100	0.01
	NDA 1	30	334	10	100200	0.001002	7280	0.728	40	728	0.001374
	NDA 2	30	167	20	100200	0.001002	7880	0.788	80	788	0.001269
	NDA 3	30	84	40	100800	0.001008	9120	0.912	160	912	0.001096
ND_Anode	NDA 4	30	42	80	100800	0.001008	11520	1.152	320	1152	0.000868
	NDA 5	30	104	80	249600	0.002496	21440	2.144	320	858	0.001166
	NDL 1	30	417	40	500400	0.005004	35760	3.576	160	715	0.001398
	NDL 2	30	208	80	499200	0.004992	38080	3.808	320	762	0.001313
	NDL 3	30	104	160	499200	0.004992	42880	4.288	640	858	0.001166
NDL 4	30	52	320	499200	0.004992	52480	5.248	1280	1050	0.000953	

ภาคผนวก ข

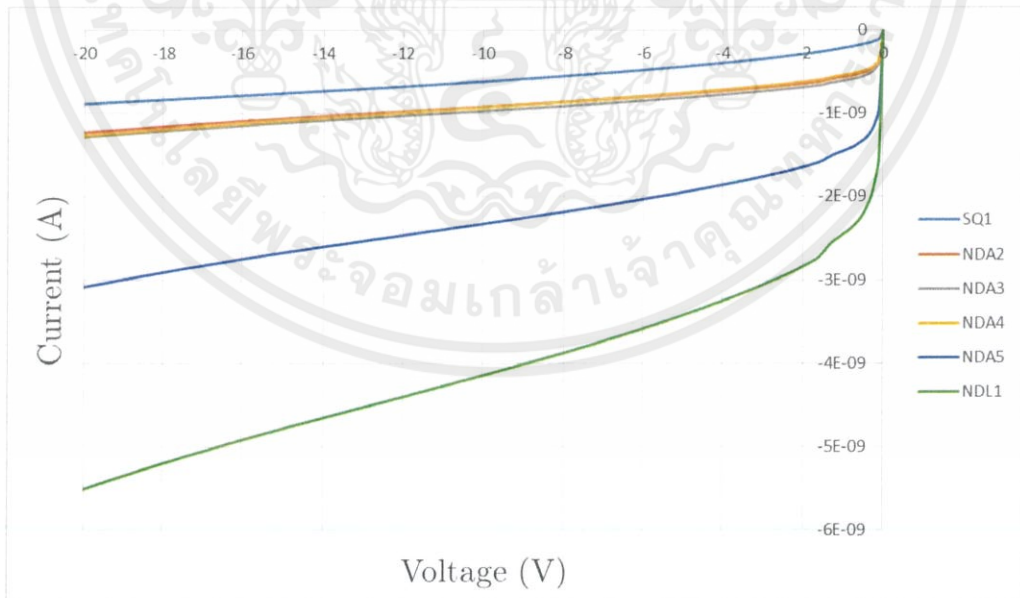
กราฟข้อมูลกระแสและข้อมูลความจุไฟฟ้าของแต่ละหน้าตัด

ข.1 กระแสขณะไบอัสตรง



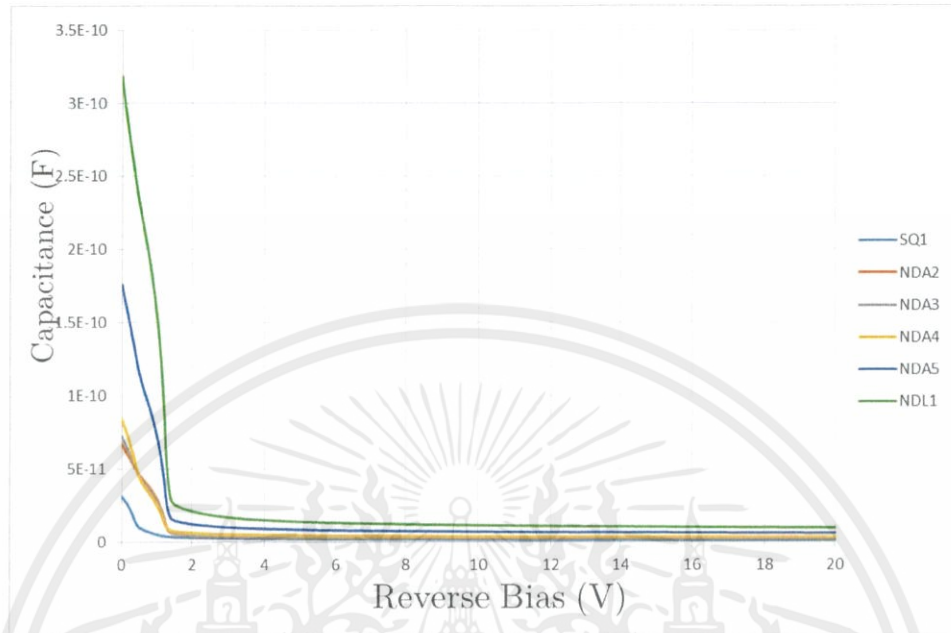
รูปที่ ข1 กระแสขณะไบอัสตรงของแต่ละหน้าตัด

ข.2 กระแสรั่วขณะไบอัสย้อน



รูปที่ ข2 กระแสรั่วขณะไบอัสย้อนของแต่ละหน้าตัด

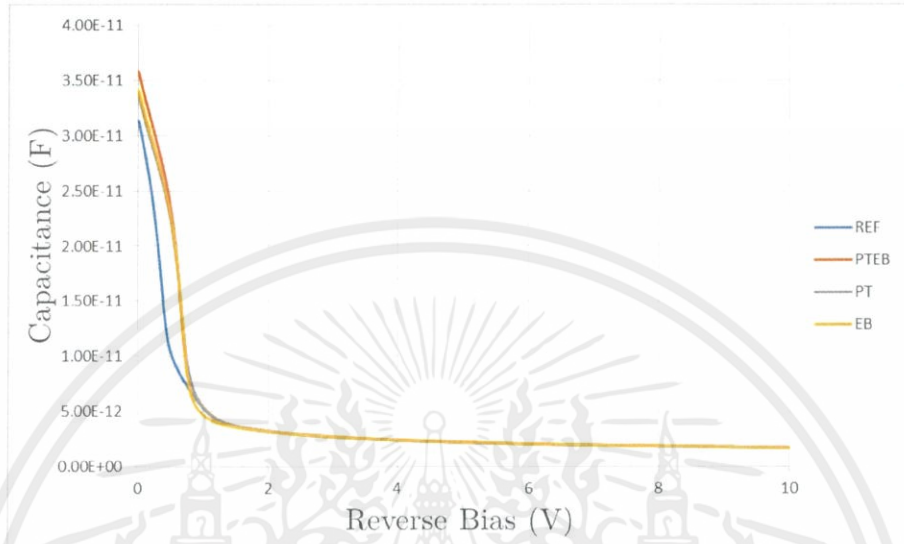
ข.3 ความจุไฟฟ้าขณะไบอัสย้อน



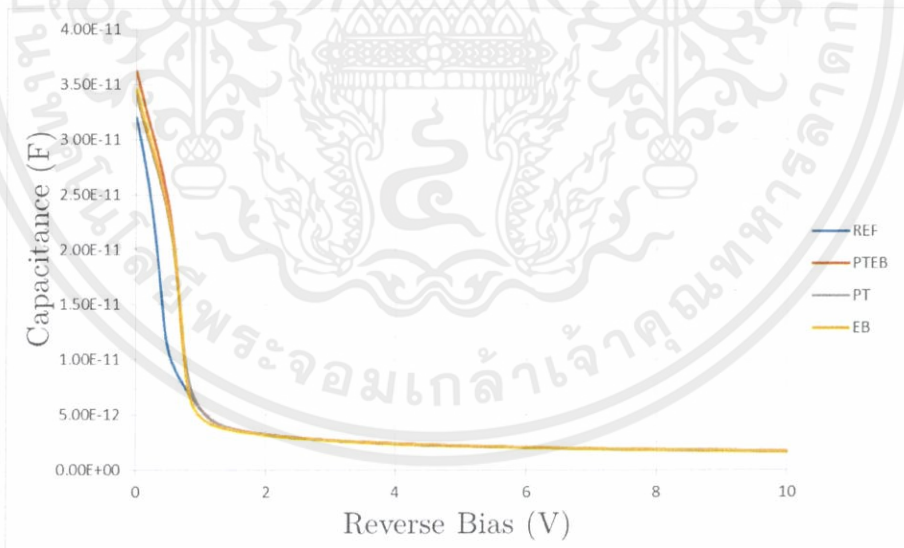
รูปที่ ข3 ความจุไฟฟ้าขณะไบอัสย้อนของแต่ละหน้าตัด

ภาคผนวก ค

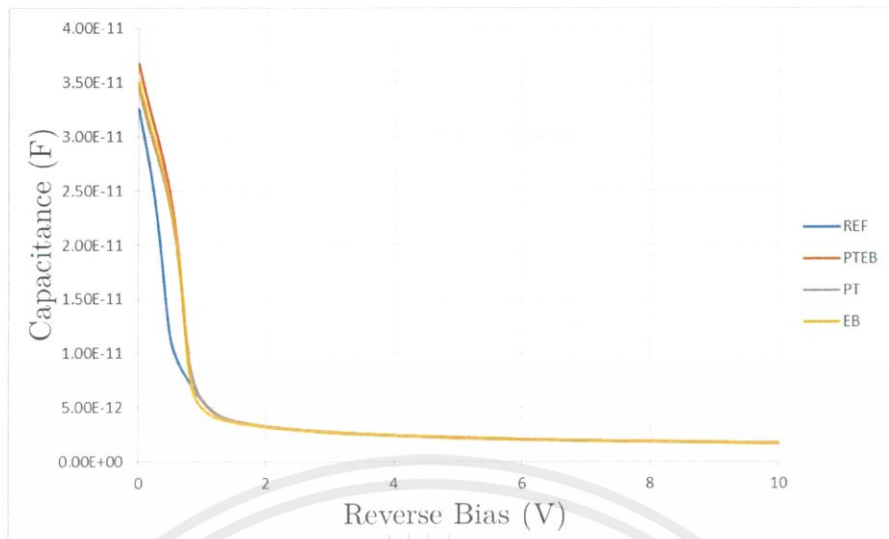
ข้อมูลความจุไฟฟ้าของไดโอด SQ1



รูปที่ ค1 ความจุไฟฟ้าของ SQ1 ที่ 27°C



รูปที่ ค2 ความจุไฟฟ้าของ SQ1 ที่ 37°C



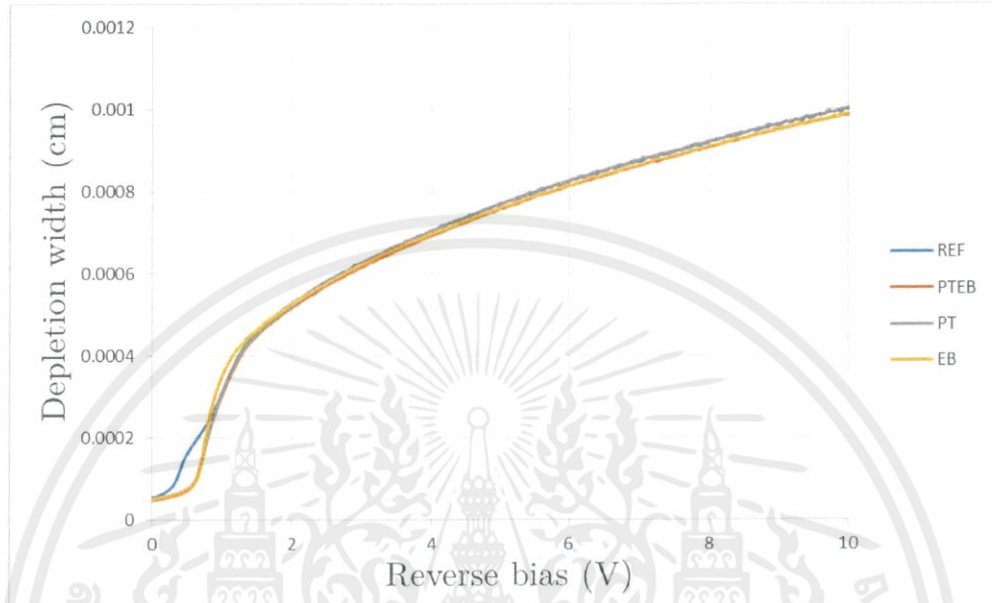
รูปที่ ค3 ความจุไฟฟ้าของ SQ1 ที่ 47°C



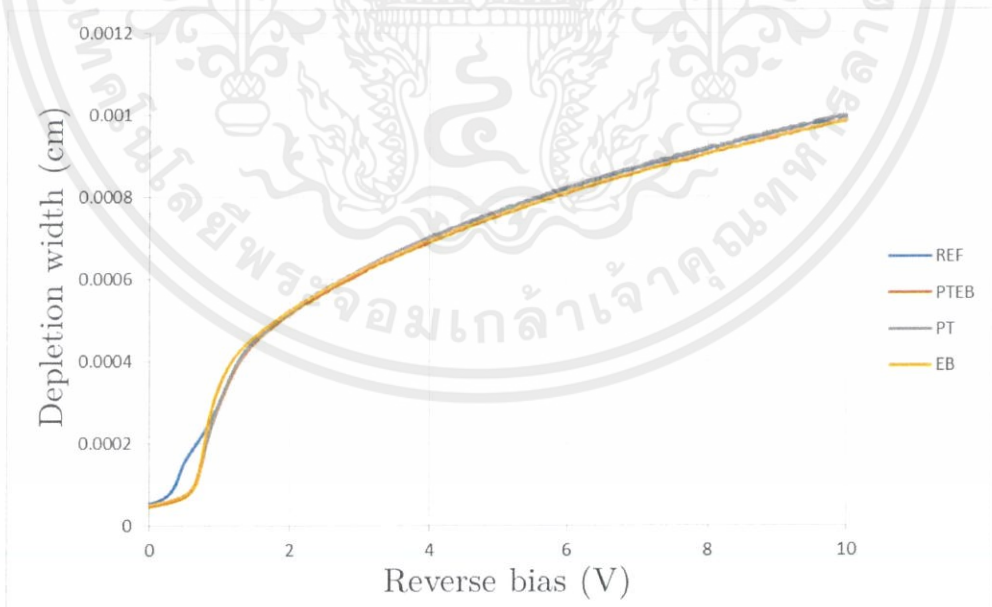
รูปที่ ค4 ความจุไฟฟ้าของ SQ1 ที่ 67°C

ภาคผนวก ง

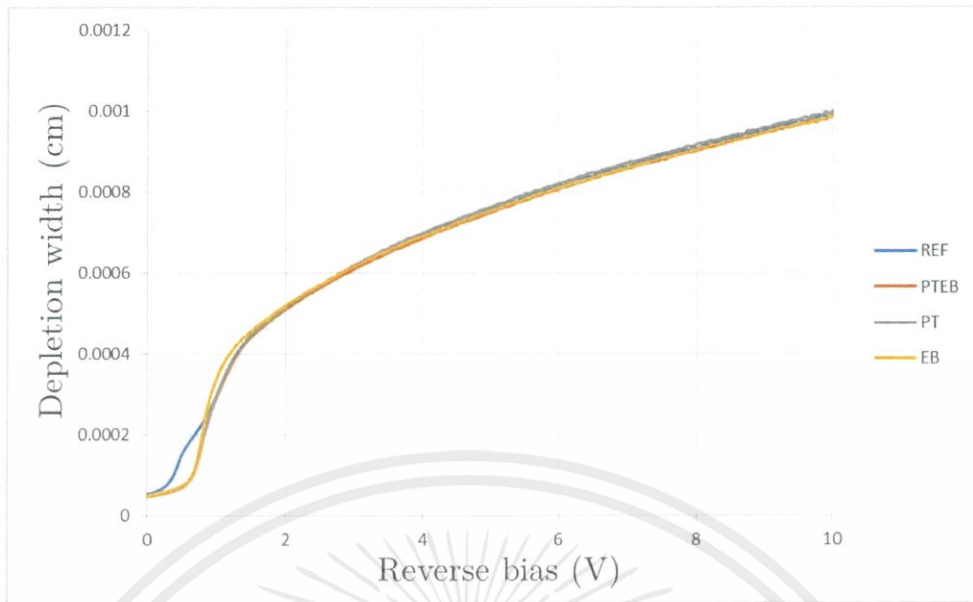
ข้อมูลความกว้างบริเวณพร่องพาหะของไดโอด SQ1



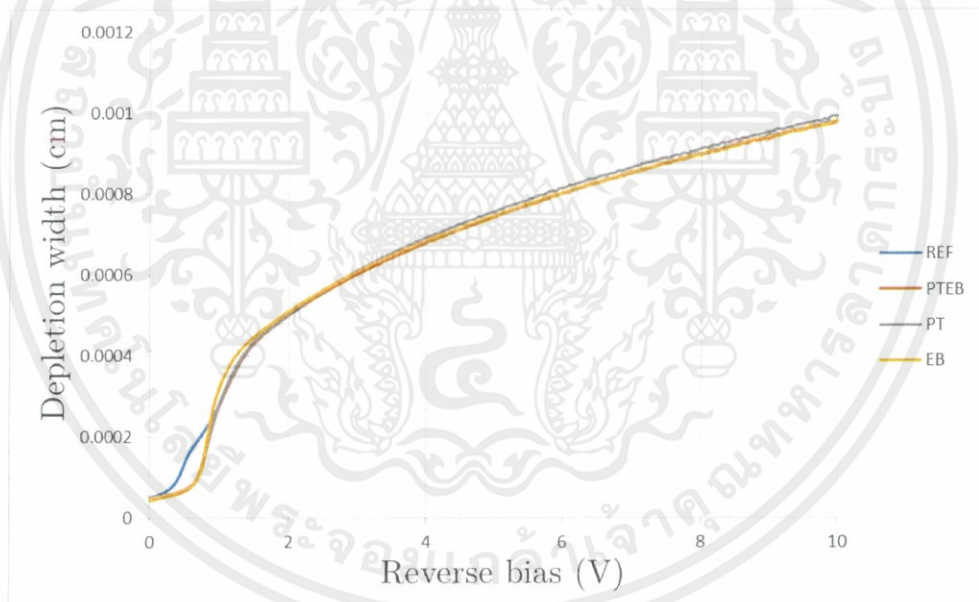
รูปที่ ง1 ความกว้างบริเวณพร่องพาหะ ที่ 27 °C



รูปที่ ง2 ความกว้างบริเวณพร่องพาหะ ที่ 37 °C



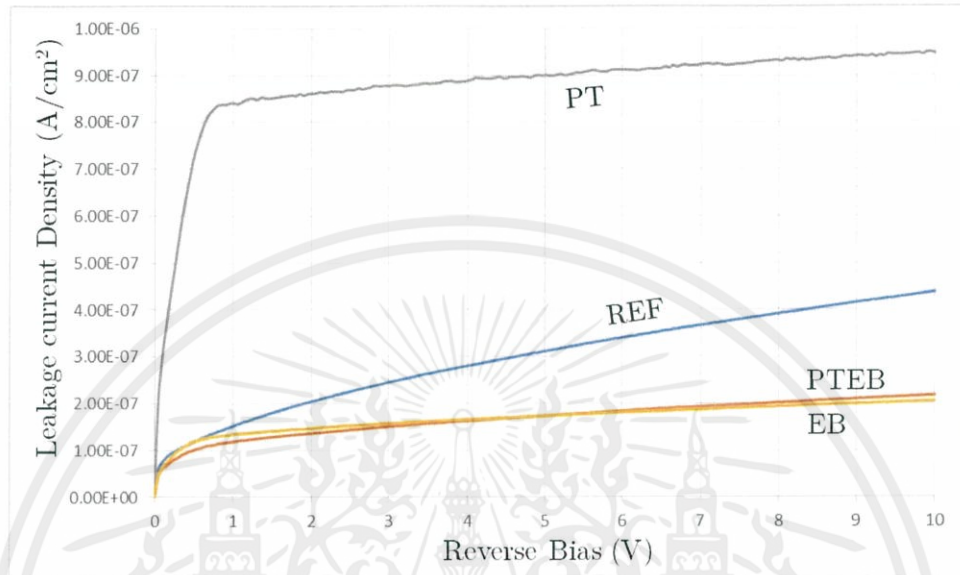
รูปที่ 3 ความกว้างบริเวณพร่องพาหะ ที่ 47 °C



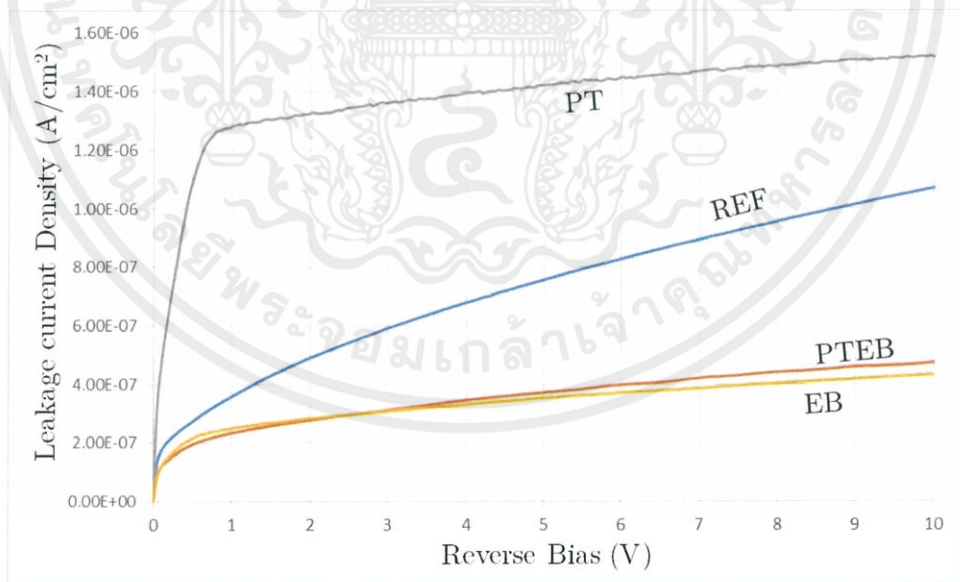
รูปที่ 4 ความกว้างบริเวณพร่องพาหะ ที่ 67 °C

ภาคผนวก จ

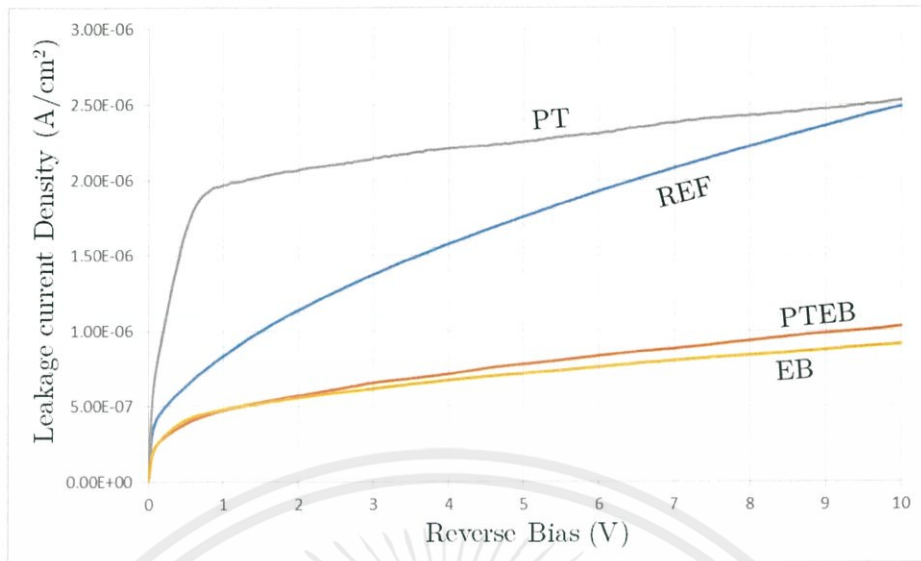
ข้อมูลความหนาแน่นกระแสรั่วกับแรงดัน



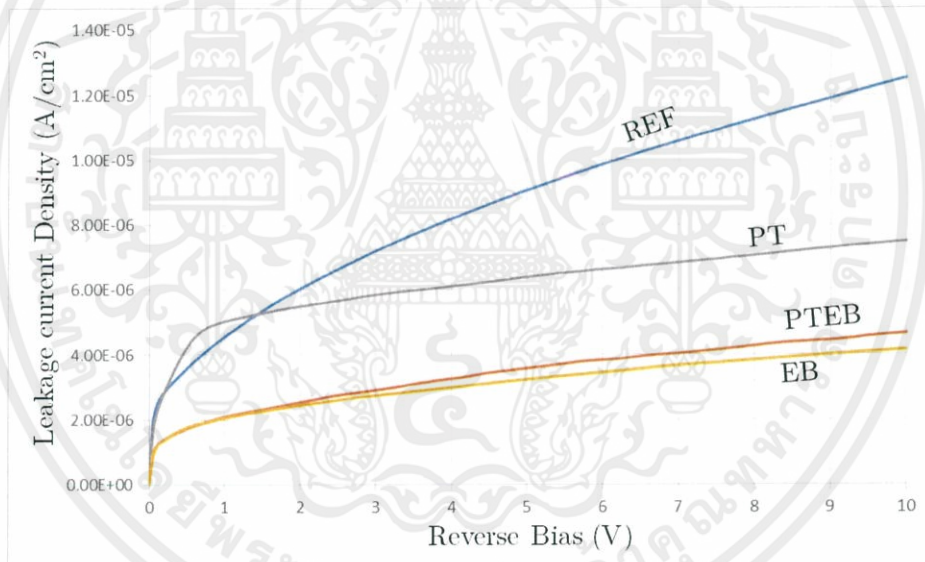
รูปที่ จ1 ความหนาแน่นกระแสรั่วขณะไบอัสย้อน ที่ 27 °C



รูปที่ จ2 ความหนาแน่นกระแสรั่วขณะไบอัสย้อน ที่ 37 °C



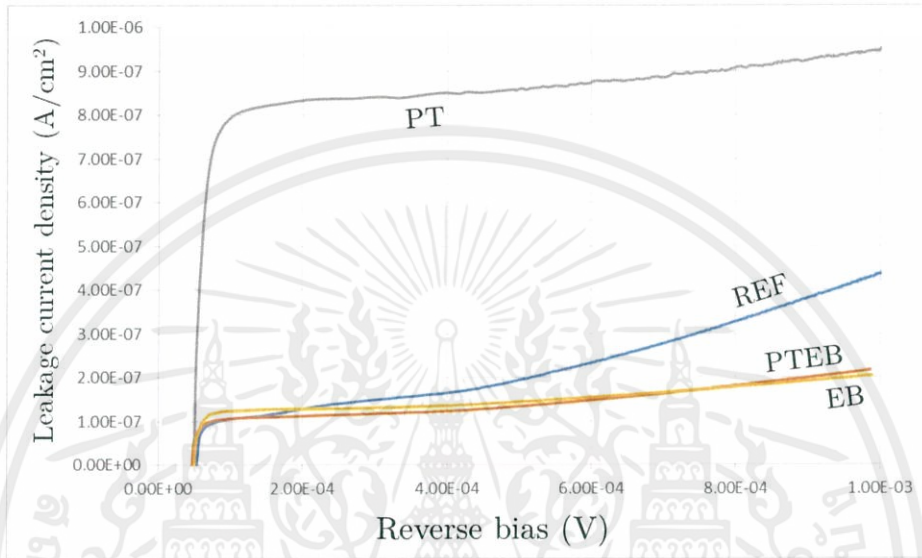
รูปที่ จ3 ความหนาแน่นกระแสรั่วขณะไบอัสย้อน ที่ 47 °C



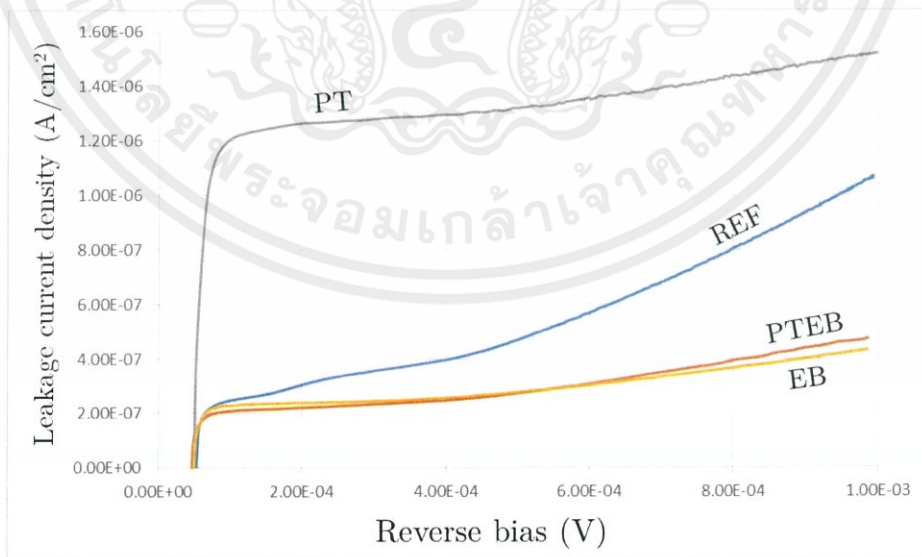
รูปที่ จ4 ความหนาแน่นกระแสรั่วขณะไบอัสย้อน ที่ 67 °C

ภาคผนวก ฉ

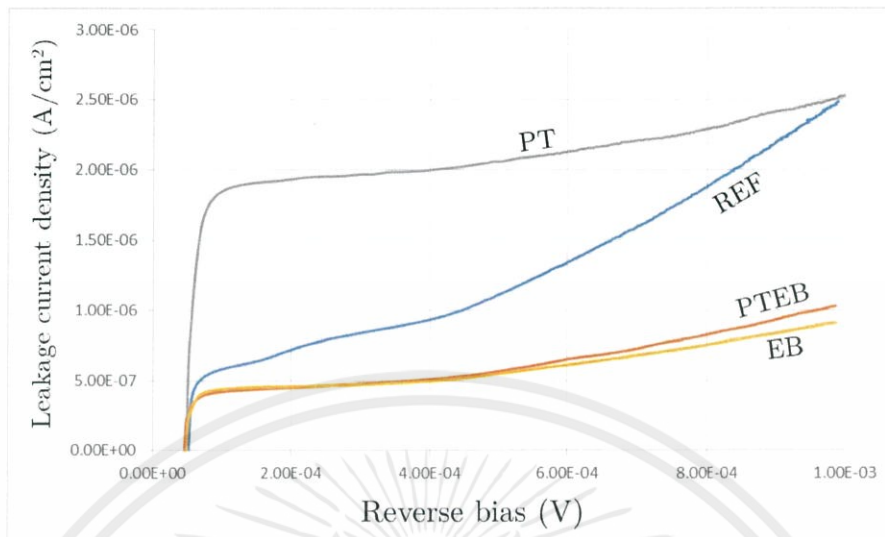
ข้อมูลความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณ
พร่องพาหะของไดโอด SQ1



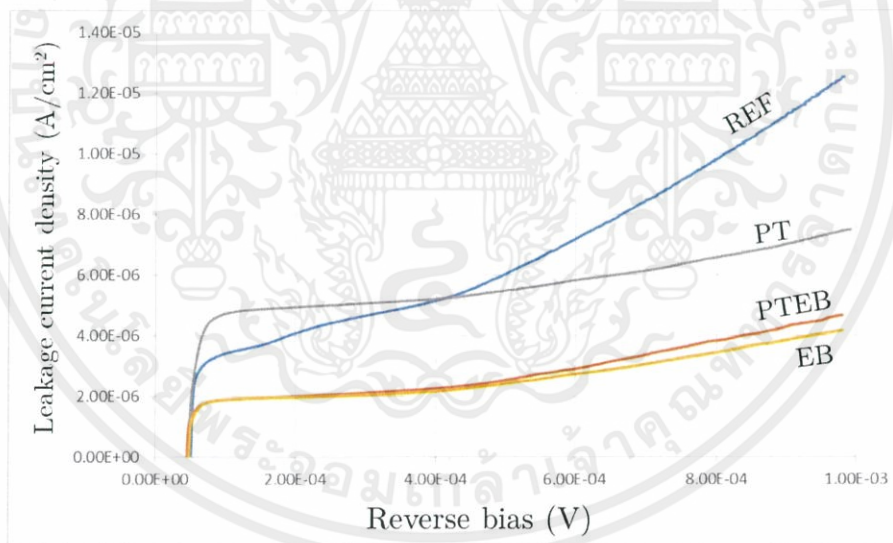
รูปที่ ฉ1 ความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะ
ของไดโอด SQ1 ขณะ 27 °C



รูปที่ ฉ2 ความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะ
ของไดโอด SQ1 ขณะ 37 °C



รูปที่ ๓ ความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะ
ของไดโอด SQ1 ขณะ 47 °C



รูปที่ ๔ ความหนาแน่นกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณพร่องพาหะ
ของไดโอด SQ1 ขณะ 67 °C

ภาคผนวก ข

ข้อมูลพารามิเตอร์ทั้งหมดของไดโอด SQ1 ที่วัดและคำนวณได้

ตารางที่ ข.1 พารามิเตอร์ของไดโอด SQ1 ที่วัดและคำนวณได้

Temp. (°C)	Type	n factor	Jo (uA/cm ²)	Vbi (V)	Nd (cm ⁻³)	Jr at 5V (uA/cm ²)	Jgen at 5V (uA/cm ²)	Dp (cm ² /s)	JdA (uA/cm ²)	Fd	Lp (um)	Tr (ps)	Tg (us)
27	REF	1.2600664	0.069336147	0.563144	1.193E+14	0.311875	0.22284387	7.376465	0.08903113	1	0.111	16.70312	8.13995
	EB	1.2651313	0.042399336	0.650992	1.24234E+14	0.17334375	0.05138488	7.376192	0.12195887	1	0.0783	8.311727	45.16492
	PT	1.4036299	0.224428627	0.395521	1.14326E+14	0.9006875	0.09057544	7.376742	0.81011206	1	0.014	0.2657	15.8467
	PTEB	1.2862209	0.064653883	0.524622	1.22061E+14	0.1741375	0.07150552	7.376312	0.10263198	1	0.0945	12.10666	30.17651
37	REF	1.217165	0.163602109	0.525603	1.20309E+14	0.7564375	0.55749253	7.177128	0.19894497	1	0.3244	146.626	8.097043
	EB	1.2003732	0.082778229	0.626047	1.24571E+14	0.3535	0.12762499	7.17691	0.22587501	1	0.276	106.1404	62.59967
	PT	1.3215093	0.329951978	0.366849	1.1462E+14	1.4218125	0.18871228	7.17742	1.23310022	1	0.0554	4.276133	26.30524
	PTEB	1.2260445	0.118941695	0.50162	1.22545E+14	0.37161875	0.17428247	7.177014	0.19733628	1	0.321	143.5709	33.4795
47	REF	1.1433399	0.34021031	0.468845	1.20825E+14	1.758375	1.28896085	6.991759	0.46941415	1	0.6186	547.31	7.437709
	EB	1.1358215	0.167183966	0.582061	1.24394E+14	0.7185625	0.28987759	6.99159	0.42868491	1	0.6578	618.8876	61.56225
	PT	1.2546526	0.525080805	0.329444	1.14568E+14	2.2525625	0.39068029	6.992056	1.86188221	1	0.1646	38.74849	25.62726
	PTEB	1.1476892	0.210642106	0.467454	1.22767E+14	0.7798125	0.38762671	6.991667	0.39218579	1	0.7286	759.2724	31.12313
67	REF	1.1523014	2.472000264	0.288301	1.19326E+14	9.06725	6.18564808	6.435425	2.88160192	1	1.45	3267.072	6.085765
	EB	1.1136193	1.04067044	0.442563	1.22511E+14	3.24775	1.40822525	6.435299	1.83952475	1	2.212	7603.289	51.43924
	PT	1.1629095	1.718953902	0.212258	1.13416E+14	6.3855625	1.71648311	6.43566	4.66907939	1	0.944	1384.685	26.72692
	PTEB	1.1211003	1.110081401	0.315698	1.20252E+14	3.58175	1.81979771	6.435388	1.76195229	1	2.354	8610.694	28.91887

ประวัติผู้เขียน

นายปิยวัฒน์ ยศธนาชน เพศชาย เกิดเมื่อวันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2540 ปัจจุบันอายุ 21 ปี ในด้านประวัติการศึกษา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา จากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ เมื่อปี พ.ศ. 2558 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับอุดมศึกษาที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สาขาอิเล็กทรอนิกส์ ในระดับชั้นปีที่ 4

วันที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2561

